

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.007

生物群体智能优化的投影寻踪模型在灌区水资源综合效益研究中的应用

许 准^{1,2},郭晓亮³,徐 昕^{1,2},董 壮¹,田 浪¹

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098;
2. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
3. 湖北省水利水电规划勘测设计院,湖北 武汉 430064)

摘要:将高维降维技术的投影寻踪模型引入到灌区水资源综合效益的研究中,并采用生物群体智能算法对投影寻踪模型进行优化,以提高投影寻踪模型的准确度。以经济效益、生态环境效益以及社会效益 3 方面建立指标体系,并提出了 5 类等级标准。以漳河灌区为例,利用所建模型对该灌区水资源综合效益进行研究,并对不同指标的贡献度进行了分析。结果表明,漳河灌区 2013 年的综合效益等级为等级Ⅲ(一般);在灌区水资源综合效益研究方面,优化后的投影寻踪模型具有较好的实用性和可信性。

关键词:生物群体智能;免疫蛙跳算法;投影寻踪模型;水资源综合效益;漳河灌区

中图分类号:S274 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)03-0038-06

Application of projection pursuit classification model basing on biological swarm intelligence in comprehensive benefit research of water resources in irrigation district

XU Zhun^{1,2}, GUO Xiaoliang³, XU Xin^{1,2}, DONG Zhuang¹, TIAN Lang¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract: The dimensionality reduction technology of projection pursuit classification (PPC) model, which was optimized by the biological swarm intelligence algorithm for improving the accuracy, was introduced into the comprehensive benefit research of water resources in irrigation district. An evaluation index system was established by taking three aspects into consideration, including the economic benefit, ecological environment benefit and social benefit, and five levels of evaluation criteria were proposed. Taking the Zhanghe Irrigation District as an example, the comprehensive benefit research of water resources was studied using the built model, and the contribution degree of different indices was analyzed. Results show that the comprehensive benefit of water resources in the Zhanghe Irrigation District in 2013 is of grade III (general). The optimized PPC model is with better usability and credibility in the comprehensive benefit research of water resources in irrigation district.

Key words: biological swarm intelligence; immune shuffled frog leaping algorithm; projection pursuit classification model; comprehensive benefit of water resources; Zhanghe Irrigation District

水资源是人类赖以生存的环境资源,与人类的生产和生活密不可分,具有不可替代性的作用^[1]。水资源同时具备自然、社会、环境以及经济等多重属性,是经济社会可持续发展的重要基础^[2]。进入 21

作者简介:许准(1990—),男,硕士研究生,研究方向为水资源规划利用。E-mail:xuzhun2003@163.com
通信作者:董壮,讲师,博士。E-mail:zdong2005@yahoo.com

世纪,随着社会经济的迅猛发展,水资源已经逐渐达到承载力的上限,水资源短缺问题日益成为我国社会经济发展的制约性因素。对灌区水资源综合效益进行研究可以为水资源优化配置提供指导依据,从而使水资源的综合效益发挥到最大程度,有利于“资源节约型,环境友好型”社会的建设,促进灌区经济可持续健康发展。

纵观传统的灌区水资源综合效益研究,主要存在以下几个方面的欠缺:①研究方法方面,多采用层次分析法^[3],通过专家咨询意见建立判断矩阵,该方法简单易行,但是仅将重要性程度通过主观认识实施,研究结论无法避免存在一定的主观性;②评价内容方面,多进行不同年份之间的效益对比,而对于水资源综合效益评价等级标准的研究甚少。本文将投影寻踪模型引入到灌区水资源的综合效益研究中。投影寻踪模型属于样本数据驱动的探索性数据分析方法,避免了主观分析方法带来的主观随机性,许多研究人员对投影寻踪模型提出了一些优化投影指标函数的方法,但部分优化方法在处理多变量寻优时往往易陷入局部最优“早熟”或提前收敛,寻求不到真正的最优解。本文选用生物群体智能算法对投影寻踪模型进行优化,由于生物群体智能算法具备不依赖目标函数梯度的特点,所以特别适合解决大规模复杂优化问题。当前生物智能算法的发展迅速,颇具代表性的算法有:蚁群算法^[4-5]、狼群算法^[6]、遗传算法^[7]、混合蛙跳算法^[8]以及粒子群算法^[9-10]等。本文选用免疫蛙跳算法控制收敛方向,提高了蛙跳算法的收敛速度和鲁棒性^[11],将优化后的投影寻踪模型应用于湖北省漳河灌区水资源综合效益研究中。

1 投影寻踪模型

通过投影寻踪模型去分析和观察原始数据,以最大程度寻求和挖掘数据的信息和特征,每一组数据均反映了整体数据的一部分特征。本文运用投影寻踪模型探索原始数据中各因子之间的贡献度大小,以此客观而准确地求得评价指标对应的计算权重。

1.1 高维样本数据预处理

为了将各种单位不同、数量级别差异较大的原始数据统一起来,首先应将原始数据进行归一化和标准化,计算公式如下:

对于高优或者正向指标:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (1)$$

对于低优或者负向指标:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{\max}(j) - x_{ij}}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (2)$$

式中: i 为数据集的维度; j 为 i 维度下第 j 个评价指标; x_{ij} 为评价因子的指标值; x_{ij}^* 为归一化和标准化后的数值; $x_{\max}(j)$ 和 $x_{\min}(j)$ 分别为数据集中第 j 个评价指标值的最大值和最小值。

1.2 数据综合特征值的确立

将处理后的数据按照一定的方向进行投影,使每个待评研究对象都只得到一个反映其数据信息和特征的值。假定沿着 $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$ (n 为数据集的总维度)的方向进行投影,则存在:

$$z_i = \sum_{j=1}^n a_j x_{ij}^* \quad (3)$$

$\mathbf{z} = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_n)$ 为投影方向的一维投影值,即数据向量。

1.3 构造投影目标函数

假定投影目标函数为 $Q(\mathbf{a})$,则:

$$Q(\mathbf{a}) = d_{\text{is}}(\mathbf{a}) \times d_{\text{en}}(\mathbf{a}) \quad (4)$$

式中: $d_{\text{is}}(\mathbf{a})$ 表示类间距离,即投影值 z_i 的标准差; $d_{\text{en}}(\mathbf{a})$ 表示类内密度,即投影值 z_i 的局部密度; $d_{\text{is}}(\mathbf{a})$ 和 $d_{\text{en}}(\mathbf{a})$ 的计算公式如下:

$$d_{\text{is}}(\mathbf{a}) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (z_i - \bar{z}_a)^2 / (n-1)} \quad (5)$$

$$d_{\text{en}}(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m (R - r_{ik}) f(R - r_{ik}) \quad (6)$$

$$r_{ik} = |z_i - z_k| \quad (7)$$

式中: k 为 i 维度下第 k 个数据; m 为投影目标函数总维度; $\bar{z}_a$ 是 z_i ($i=1, 2, \dots, n$)的均值; R 为密度窗宽, $R=2m=\max(r_{ik})+m/2$,由数据特征确定; r_{ik} 为样本投影特征值间的距离; f 为单位阶跃函数,若 $R \geq r_{ik}$, $f(R-r_{ik})=1$,若 $R < r_{ik}$, $f(R-r_{ik})=0$ 。

1.4 优化投影目标函数

若类间距离 $d_{\text{is}}(\mathbf{a})$ 愈大,则数据指标的分布范围愈广泛;若类内密度 $d_{\text{en}}(\mathbf{a})$ 愈大,则数据指标特征的差异性表现得愈强烈。当各指标值的样本集给定时,投影目标函数 $Q(\mathbf{a})$ 只随着投影方向 $\mathbf{a}$ 的变化而变化,不同的投影方向反映不同的数据结构特征,最优投影方向就是最大可能暴露高维数据某类特征结构的投影方向,因此可以通过求解目标函数最大化问题来估计最优投影方向向量,即问题可转化为式(8)描述的优化问题:

$$\begin{cases} \max [Q(\mathbf{a})] \\ \|\mathbf{a}\| = 1 \end{cases} \quad (8)$$

2 免疫蛙跳优化算法

混合蛙跳算法 (shuffled frog leaping algorithm,

SFLA)属于生物群体智能算法的一类典型性代表优化算法,其本质是模仿自然生物(蛙群)寻找食物时的后启发式计算技术^[12-13],是基于群体协同搜索的生物进化算法。SFLA 不仅融合了模因演算和粒子群算法的各自优势,且需要率定的参数少、运算速度快,所以一经提出就在多属性多目标决策领域得到广泛应用。但这种交流机制在实现青蛙个体之间的信息传递的同时,也会造成青蛙个体在局部搜索最优解的过程中力度不足,甚至忽略最优解、减低收敛效率。为了提高算法的收敛效率,对传统的混合蛙跳算法进行了改进,提出了免疫蛙跳算法(immune shuffled frog leaping algorithm, ISFLA),即在对群体进行控制调节的过程中加入免疫机制,目标函数以及对应的约束条件作为蛙群的抗原,确保优化问题与生成的蛙群直接相关联,收敛方向得以控制。选择性记忆与抗原亲和力高的青蛙群体,对抗体群注射从中提取的免疫疫苗,保证抗体群在进化更新时的多样性,避免抗体群发生退化。基于 ISFLA 和 SFLA 混合优化算法的基本原理,免疫蛙跳算法的运算步骤如下:

步骤 1:抗原的输入。目标函数和多种约束条件作为 ISFLA 的抗原,本文的目标函数主旨在于优化投影寻踪模型的投影方向,将高维数据指标转换至低维的子空间。

步骤 2:生成初始抗体。针对 K 只青蛙(青蛙代表不同的解集),以产生初始的群体,生成初始的抗体群 T ,假定促进记忆的蛙群为 T_1 ,检测记忆蛙群为 T_2 。

步骤 3:计算抗体适应度。由于蛙群的抗体和抗原之间存在一定的亲和力,本文采用式(9)表示:

$$bx_v = o_v \tag{9}$$

式中: x_v 为抗体和抗原之间的亲和力; b 为预先设定的亲和力系数; o_v 为抗原与抗体之间的匹配度。

K 只青蛙抗体的信息熵为

$$E(T) = \frac{1}{M \sum_{j=1}^M E_j(T)} \tag{10}$$

$$E_j(T) = \sum_{i=1}^S -P_{ij} \log P_{ij} \tag{11}$$

式中: M 为信息熵的总数; S 为抗体数据集的总数; $E_j(T)$ 为抗体群 T 中第 j 位信息熵; k_i 为有效抗体阈值; P_{ij} 为抗体中第 j 位数值为 k_i 的概率。

则抗体 η 与抗体 λ 之间的亲和力为

$$by_{\eta\lambda} = \frac{1}{(1 + E(2))} \tag{12}$$

抗体 η 的浓度范围可以表示为

$$c_{\eta} = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T bc_{\eta n} \tag{13}$$

$$bc_{\eta n} = \begin{cases} 1 & by_{\eta\lambda} \geq T_s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{14}$$

式中: $y_{\eta\lambda}$ 为抗体 η 与抗体 λ 之间的亲和力大小; c_{η} 为抗体 η 的浓度; $c_{\eta n}$ 为 c_{η} 数据集中第 n 个值; T_s 为预先设立的亲和力阈值。

步骤 4:更新免疫记忆蛙群。据一定的比例,在抗体群中选择亲和力高的抗体,用它们替代促进记忆蛙群 T_1 以及亲和力低的抗体;并将亲和力低的抗体加入到检测记忆蛙群 T_2 ,替代检测记忆蛙群中亲和力高的抗体,以达到更新功效。

步骤 5:促进与抑制抗体群。记忆青蛙群 T_1 中抗体的浓度会随着蛙群更新而逐渐升高,达到一定的峰值,如抗体峰值浓度低于抗体浓度阈值时,记忆蛙群中的抗体会趋于多样化;若抗体峰值浓度超过抗体的浓度阈值时,记忆蛙群中的抗体会趋于单一化,且达到饱和状态,此时浓度大的抗体会被淘汰,新个体的随机产生会不断替换被淘汰的抗体。

步骤 6:生成新的青蛙抗体。结合促进记忆的蛙群 T_1 与经检测后的蛙群抗体 T ,从而生成新的青蛙抗体种群;按适应值由小到大排序, K 只青蛙分成 w 个子群体,每一子群体中选优出最优个体以及最差个体,针对每个子群体,通过适应值的降序排列,重新分配,并进行混合蛙跳运算。

步骤 7:判断终止条件。看运算结果是否满足要求,若满足,则迭代结束;反之,则转向步骤 3 依次向下运行。

3 灌区水资源综合效益研究

3.1 指标体系的构建

水资源具有社会属性、经济属性以及环境属性等多重效益^[14],水资源综合效益是社会效益、经济效益、生态环境效益的统一。因此,水资源综合效益研究指标的选择应涵盖这 3 大效益指标。本文选取了其中有代表性的 14 项详尽指标,构建的灌区水资源综合效益指标体系,其中渠系水利用系数 C_1 与灌区土壤、渠道工程状况、灌溉放水强度、放水历时等因素有关,该指标将反映灌区的管理水平;灌溉水利用系数 C_2 指的是灌区实际灌溉面积上有效利用的水资源量(不包括深层渗漏和田间流失的水量)与渠首引水总量之间的比值,它反映灌区各级渠道输水设施状况与田间用水效率状况,故本文选用这两种利用系数指标;由于在灌区内污水的排放和处理的效果对灌区水质产生较大的影响,良好的水质环境有利于灌区的生态效益的发挥和灌区综合效益的

实现,所以灌区污水处理率 C_{13} 以及工业废水的排放达标率 C_{14} 在一定程度上反映灌区水资源的生态环境效益。灌区水资源综合效益研究指标体系见表 1。

表 1 灌区水资源综合效益研究指标体系		
总目标	要素层	详尽指标
灌区水资源综合效益	经济效益	C_1 渠系水利用系数(%)
		C_2 灌溉水利用系数(%)
		C_3 耕地有效灌溉率(%)
		C_4 单位体积灌溉水粮食产量(kg)
		C_5 单位体积水工业产值(元)
		C_6 复种指数(%)
		C_7 水资源开发利用率(%)
	社会效益	C_8 人均粮食占有量(kg)
		C_9 人均 GDP(元)
		C_{10} 城镇居民年人均收入(元)
		C_{11} 农民年人均收入(元)
		C_{12} 地下水开采系数(%)
	生态环境效益	C_{13} 污水处理率(%)
		C_{14} 工业废水排放达标率(%)

3.2 水资源综合效益等级标准

确定等级标准是水资源综合效益研究的基础,目前关于水资源综合效益的等级标准研究甚少。本文参考了联合国粮农组织所推荐的灌区综合评价指南以及有关学者所著论文^[15],综合考虑了全国平均水平、湖北省平均水平以及国际通用标准,以此建立了灌区水资源综合效益等级标准和指标阈值,见表 2。

3.3 漳河灌区水资源综合效益研究

漳河灌区位于湖北省长江支流沮漳河东支的漳河上,1958 年动工兴建,至 1966 年基本建成并投入使用。灌溉荆门、荆州、当阳及钟祥等市县的大部分耕地,由漳河水库供水,灌区面积 5544 km²。灌区规划灌溉面积约 18 万 hm²,实际有效灌溉面积约 15 万 hm²。灌区现有人口 160 万,其中包括 110 余万农业人口。灌区共有 9 级渠道近 14 000 条,总长度约 7 168 km,因灌溉面积大,历史上灌溉水利用系数曾一度低至 0.37。近年来,由于在田间推行科学的

灌溉制度与节水方法,灌区内灌溉水利用率及水分生产率逐年提高,在水资源的配置和利用方面积累了很多经验。本文采用漳河灌区 2013 年的运行状况数据资料对其水资源综合效益展开研究。

本文提出的 12 个详尽指标均为高优指标,即越大越优型,指标 C_7 与 C_{12} 为低优指标,即越小越优型,为便于投影寻踪模型的运用,基于择优原理选取表 2 中的上限阈值作为不同等级的综合效益水平,并与漳河灌区 2013 年的运行状况数据资料进行比对(表 3),以期得到漳河灌区水资源综合效益等级水平。

表 3 漳河灌区 2013 年的运行状况数据						
指标	水资源综合效应等级					实测值
	I	II	III	IV	V	
C_1	100	85	70	50	30	67
C_2	100	80	60	40	20	51
C_3	100	90	70	50	30	84.3
C_4	4	3.1	2.2	1.2	0.7	2.09
C_5	1 670	1 100	350	120	65	316
C_6	215	180	150	120	100	185
C_7	0	20	35	50	65	41.7
C_8	1 100	900	690	455	240	491
C_9	100 000	87 000	49 500	13 000	5 600	42 348
C_{10}	90 000	45 000	25 000	8 500	4 000	19 364
C_{11}	25 000	15 000	8 500	5 000	1 600	8 137
C_{12}	0	30	60	80	100	134
C_{13}	100	90	80	60	50	73
C_{14}	100	90	80	70	55	82

根据表 3 中的数据,采用 MATLAB 进行编程,以获取基于 ISFLA 的投影寻踪模型的投影方向,选择青蛙的总数 $K=1\,750$ 只,种群分组数为 50 组,每组青蛙包含的个数为 35 只,子群体内更新 40 次,并设定抗体浓度阈值为 0.85,循环迭代次数为 40 次。以此求得最大的投影值为 4.4667,最佳的投影方向 a :

$$a = (0.106\,6, 0.137\,1, 0.026\,3, 0.147\,6, 0.243\,3, 0.003\,2, 0.149\,0, 0.336\,1, 0.188\,7, 0.354\,3, 0.278\,6,$$

表 2 灌区水资源综合效益标准					
评价指标	良好(I)	较好(II)	一般(III)	较差(IV)	极差(V)
C_1	85 ~ 100	70 ~ 85	50 ~ 70	30 ~ 50	0 ~ 30
C_2	80 ~ 100	60 ~ 80	40 ~ 60	20 ~ 40	0 ~ 20
C_3	90 ~ 100	70 ~ 90	50 ~ 70	30 ~ 50	0 ~ 30
C_4	3.1 ~ 4.0	2.2 ~ 3.1	1.2 ~ 2.2	0.7 ~ 1.2	0 ~ 0.7
C_5	1 100 ~ 1 670	350 ~ 1 100	120 ~ 350	65 ~ 120	0 ~ 65
C_6	180 ~ 215	150 ~ 180	120 ~ 150	100 ~ 120	0 ~ 100
C_7	0 ~ 20	20 ~ 35	35 ~ 50	50 ~ 65	65 ~ 100
C_8	900 ~ 1100	690 ~ 900	455 ~ 690	240 ~ 455	0 ~ 240
C_9	87 000 ~ 100 000	49 500 ~ 87 000	13 000 ~ 49 500	5 600 ~ 13 000	0 ~ 5 600
C_{10}	45 000 ~ 90 000	25 000 ~ 45 000	8 500 ~ 25 000	4 000 ~ 8 500	0 ~ 4 000
C_{11}	15 000 ~ 25 000	8 500 ~ 15 000	5 000 ~ 8 500	1 600 ~ 5 000	0 ~ 1 600
C_{12}	0 ~ 30	30 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	100 ~ 250
C_{13}	90 ~ 100	80 ~ 90	60 ~ 80	50 ~ 60	0 ~ 50
C_{14}	90 ~ 100	80 ~ 90	70 ~ 80	55 ~ 70	0 ~ 55

0.739 8,0.053 0,0.112 5)
综合效益的投影值 z 为:
 $z = (4.466\ 7, 3.046\ 8, 2.128\ 4, 1.772\ 6, 0.025\ 9, 2.772\ 7)$

将综合效益投影值按优劣性排序,则:
等级I>等级II>实测值>等级III>等级IV>等级V
因为等级 I、II、III、IV、V 均为等级标准,所以可以得出漳河灌区 2013 年的综合效益为等级 III(一般),表明灌区近年来修建防渗渠道和低压管道输水工程、推广节水灌溉及相应的配套技术取得了一定的成效,但与高利用率的要求存在较大差距。通过与物元分析评价方法^[16]进行比对,结论也是一致的。

基于最佳投影方向,进一步分析各项指标对灌区水资源综合效益的贡献程度,即将最佳投影向量 a 按降序排列,由此得到各项指标对灌区水资源综合效益的贡献率,见图 1。

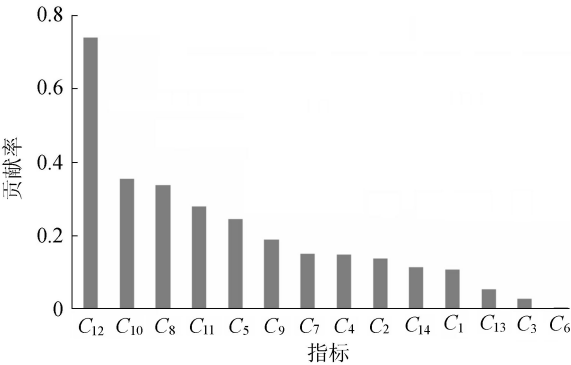


图 1 各项指标基于最佳投影方向贡献率排序

由图 1 可知,地下水开采系数(C_{12})和城镇居民人均收入(C_{10})为影响灌区水资源综合效益的重要因素,地下水开采系数为首要因素。随着地下水无节制地过度开采,会严重影响灌区的水资源利用和效益的输出,这与实际情况相符;在几类要素层中,社会效益要素层和生态环境效益要素层占主导地位,也与实际情况相符;在追求经济效益的同时,应重视和兼顾环境保护和区域农业的可持续发展,在下一阶段中,除继续推行现有的工程措施技术外,还应加强水资源的优化调度与合理配置,工作重点应向提高经济效益和生态环境效益倾斜。

4 结 论

a. 传统的数据分析方法对于高维非正态,非线性数据分析很难收到很好效果,而基于投影寻踪模型的免疫蛙跳算法是在混合蛙跳算法的基础上融入免疫调节机制,从而促进了青蛙群体的多样化更新,避免局部收敛,并可以提高全局搜索能力以及收敛速度,很大程度促进了投影寻踪模型在搜索最佳投影方向的可信度和效率。

b. 漳河灌区 2013 年的水资源综合效益等级为 III 级(一般),表明灌区近年来推行的节水灌溉及相应的配套技术取得了一定的成效,但与高层次的利用效益尚存在较大差距。

c. 地下水开采系数(C_{12})和城镇居民人均收入(C_{10})为影响灌区水资源综合效益的重要因素,其中,地下水开采系数(C_{12})为首要因素。建议持续提高节水灌溉及相应的配套技术,遏制地下水无节制的开采利用。

灌区的水资源综合效益研究属于多属性、多目标的科学决策问题,主要涉及经济效益、社会效益、生态环境效益等多方面、多层次的效益。本文建立的研究体系属于尝试性探索,在今后的研究中,还需综合而全面地考虑各方面影响因素。

参考文献:

[1] 雷波,姜文来. 节水农业综合效益评价研究进展[J]. 灌溉排水学报,2004,23(3): 65-69. (LEI Bo, JIANG Wenlai. Research on appraisalment system of multi-effect of dryland water-saving agriculture [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(3): 65-69. (in Chinese))

[2] 费良军,武锦华,游黎,等. 基于支持向量机模型的大型灌区运行状况综合评价研究[J]. 沈阳农业大学学报. 2010-08, 41(4): 492-495. (FEI Liangjun, WU Jinhua, YOU Li, et al. Support vector machine model based on large-scale irrigation system performance evaluation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010-08, 41(4):492-495. (in Chinese))

[3] 朱秀珍. 大型灌区运行状况综合评价研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.

[4] 杨剑峰. 蚁群算法及其应用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.

[5] 倪庆剑,邢汉承,张志政,等. 蚁群算法及其应用研究进展[J]. 计算机应用与软件,2008,25(8): 12-16. (NI Qingjian, XING Hancheng, ZHANG Zhizheng, et al. Research on ant colony algorithm and application research progress [J]. Computer Applications and Software, 2008,25(8):12-16. (in Chinese))

[6] 王建群,贾洋洋,肖庆元. 狼群算法在水电站水库优化调度中的应用[J]. 水利水电科技进展,2015,35(3): 1-4. (WANG Jianqun, JIA Yangyang, XIAO Qingyuan. Application of wolf pack search algorithm to optimal operation of hydropower station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015,35(3): 1-4. (in Chinese))

[7] 李世玲. 基于投影寻踪和遗传算法的一种非线性系统建模方法[J]. 系统工程理论与实践,2005(4): 22-28. (LI Shiling. A nonlinear system modeling method based

on projection pursuit and genetic algorithm [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2005 (4): 22-28. (in Chinese))

[8] 崔文华, 刘晓冰, 王伟, 等. 混合蛙跳算法研究综述[J]. 控制与决策, 2012, 27 (4): 481-486. (CUI Wenhua, LIU Xiaobing, WANG Wei, et al. Survey on shuffled frog leaping algorithm [J]. Control and Decision, 2012, 27 (4): 481-486. (in Chinese))

[9] 雷开友. 粒子群算法及其应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006.

[10] 张长胜, 孙吉贵, 欧阳丹彤. 一种自适应离散粒子群算法及其应用研究[J]. 电子学报, 2009, 37 (2): 299-304. (ZHANG Changsheng, SUN Jigui, OUYANG Dantong. A selfadaptive discrete particle swarm optimization algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37 (2): 299-304. (in Chinese))

[11] 纪昌明, 李继伟, 张新明, 等. 基于免疫蛙跳算法的梯级水库群优化调度[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33 (8): 2125-2132. (JI Changming, SUN Jiwui, ZHANG Xinming. Optimal operation of cascade reservoirs based on immune-shuffled frog leaping algorithm [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2013, 33 (8): 2125-2132. (in Chinese))

[12] 王辉, 钱锋. 群体智能优化算法[J]. 化工自动化及仪表, 2007, 34 (5): 7-13. (WANG Hui, QIAN Feng. A

survey of swarm intelligence optimization algorithm [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2007, 34 (5): 7-13. (in Chinese))

[13] 郭景录, 付平. 登月软着陆轨道优化算法研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26 (12): 70-73. (GUO Jinglu, FU Ping. Research on trajectory optimization of lunar soft landing [J]. Computer Simulation, 2009, 26 (12): 70-73. (in Chinese))

[14] 仲艳维. 潮白河流域水土保持效益评价及生态补偿制度构建研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.

[15] 刘邦贵, 刘永强, 王浩, 等. 基于物元分析法的区域水资源安全评价[J]. 南水北调与水利科技, 2014 (5): 100-103. (LIU Banggui, LIU Yongqiang, WANG Hao, et al. Evaluation of regional water security based on matter element analysis [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014 (5): 100-103. (in Chinese))

[16] 王婷, 郑小华. 物元分析方法在水资源承载能力综合评价中的应用[J]. 水文, 2006, 26 (6): 33-35. (WANG Ting, ZHENG Xiaohua. Application of material-units analyzing method in comprehensive evaluation of water resources carrying capacity [J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26 (6): 33-35. (in Chinese))

(收稿日期: 2015 - 09 - 16 编辑: 王 芳)

(上接第 18 页)

[7] 孙国春, 卞学洛. 非含水层水质咸化的“井水咸化”现象分析[J]. 地下水, 2011, 33 (3): 17-20. (SUN Guochun, BIAN Xueluo. The phenomenon analysis of well water salinization which is not aquifer water salinization [J]. Groundwater, 2011, 33 (3): 17-20. (in Chinese))

[8] 卞学洛. 天津市深层淡水井的水质咸化分类: 以东丽区为例[J]. 地下水, 2008, 30 (1): 15-20. (BIAN Xueluo. Classification of water saltilization in the deep fresh-water well in Tianjin: take Dongli district for example [J]. Groundwater, 2008, 30 (1): 15-20. (in Chinese))

[9] 宋海波, 张兆吉, 费宇红, 等. 开采条件下河北平原中部咸淡水界面下移[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34 (1): 44-52. (SONG Haibo, ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, et al. Down-movement of the fresh-saline groundwater interface in the middle of the Hebei Plain under the condition of exploitation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34 (1): 44-52. (in Chinese))

[10] 左文喆, 万力. 天津市平原区咸淡水界面下移特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33 (2): 13-18. (ZUO Wenzhe, WAN Li. Characteristics of down-

movement of the fresh-saline groundwater interface in the plain region of Tianjin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33 (2): 13-18. (in Chinese))

[11] 高业新. 华北平原典型地区大规模开采条件下不同层位含水组地下水互动关系研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.

[12] 李亚美, 成建梅, 崔莉红, 等. 分层监测孔现场分级联合试验确定含水层参数[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11 (3): 132-137. (LI Yamei, CHENG Jianmei, CUI Lihong, et al. Determination of aquifer parameters from comprehensive in-situ pumping and tracing test in the multi-layer monitoring boreholes [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11 (3): 132-137. (in Chinese))

(收稿日期: 2015 - 03 - 19 编辑: 王 芳)

