

静电放电算法-投影寻踪融合模型及其在水质综合评价中的应用

李祥蓉¹, 崔东文²

(1. 云南省水文水资源局文山分局 云南 文山 663000; 2. 云南省文山州水务局, 云南 文山 663000)

摘要: 为拓展智能算法与投影寻踪(PP)融合模型在水质综合评价中应用,介绍一种新型群体智能算法——静电放电算法(ESDA),选取6个典型测试函数对ESDA进行仿真验证,并与当前寻优效果较好的教学优化(TLBO)算法、灰狼优化(GWO)算法和鲸鱼优化算法(WOA)的仿真结果进行对比。构建ESDA-PP评价模型,以文山州盘龙河干流4个断面2015-2017年共30个月水功能区水质综合评价为例进行实例研究。结果表明:ESDA寻优精度远优于TLBO、GWO、WOA,具有出色的寻优精度和全局搜索能力。ESDA-PP模型对实例天生桥、灰土寨、花桥和天保大桥断面水质综合评价达标率分别为93.3%、83.3%、83.3%和100%,能满足或基本满足水功能区水质保护目标要求。天生桥、灰土寨、花桥断面枯水期水质总体上优于丰水期,面源污染是主导因素;天保大桥断面丰水期水质总体上优于枯水期,点源污染是主导因素。

关键词: 静电放电算法; 投影寻踪; 水质评价; 仿真验证; 盘龙河

中图分类号:X824

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)06-0096-06

Application of electrostatic discharge algorithm - projection pursuit fusion model in water quality assessment

LI Xiangrong¹, CUI Dongwen²

(1. Wenshan Branch, Yunnan Bureau of Hydrology and Water Resources, Wenshan 663000, China;

2. Wenshan Water Bureau of Yunnan Province, Wenshan 663000, China)

Abstract: In order to expand the application of intelligent algorithm and projection pursuit (PP) fusion model in comprehensive evaluation of water quality, a new group intelligence algorithm - electrostatic discharge algorithm (ESDA) was introduced. Six typical test functions were selected to simulate and verify the ESDA. The simulation results of the current optimization teaching and learning optimization (TLBO) algorithm, the gray wolf optimization (GWO) algorithm and the whale optimization algorithm (WOA) were compared. The ESDA-PP evaluation model was constructed. The water quality evaluation of the water function area of the four sections of the Panlong River in Wenshan Prefecture from 2015 to 2017 was carried out as an example. The results showed that the accuracy of ESDA optimization is much better than that of TLBO, GWO and WOA, and it has excellent optimization precision and global search ability. The ESDA-PP model has a comprehensive evaluation rate of 93.3%, 83.3%, 83.3% and 100% for the water quality of the Tianshengqiao, Lishizhai, Huaqiao and Tianbao Bridges, respectively, which can meet or basically meet the water quality protection target requirements of the water function area. The water quality of Tianshengqiao, Lishizhai and Huaqiao in the dry season is generally better than that in the flood season, and the non-point source pollution is the dominant factor. The water quality of Tianbao Bridge during the flood season is generally better than the dry season, and point source pollution is the dominant factor.

收稿日期:2019-05-18; 修回日期:2019-06-29

作者简介:李祥蓉(1984-),女,云南马关人,本科,工程师,主要从事水文与水资源工程调查评价、水质评价等方面的工作。

通讯作者:崔东文(1978-),男,云南玉溪人,本科,教授级高级工程师,主要从事水资源管理保护及智能算法在水文水资源系统中的应用研究等工作。

Key words: electrostatic discharge algorithm; projection pursuit; water quality assessment; simulation verification; Panlong River

1 研究背景

科学、客观评价水功能区水质状况对于区域河长制考核评价、落实最严格水资源管理制度具有重要意义。开展水质综合评价方法研究一直是水资源评价领域的热点和难点,目前灰色关联法^[1]、TOPSIS法^[2]、神经网络法^[3]、模糊法^[4]、支持向量机法^[5]、集对分析法^[6]等方法已在水质综合评价中得到应用。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来获取最优空间投影向量,目前已在水质综合评价^[7-9]中得到广泛应用。研究表明,PP在实际应用过程中,科学确定其最优投影向量是客观评价的基础和关键。传统遗传算法(GA)、粒子群优化(PSO)算法等普遍存在收敛速度慢、易陷入局部最优等问题,很难搜索得到真正意义上的最优投影向量^[10]。目前一些新型群体智能算法尝试用于投影寻踪最优空间投影向量的优化,并取得了较好的优化效果,如足球联赛竞争(SLC)算法^[11]、鸡群优化(CSO)算法^[12]、蛾群算法(MSA)^[13]、风力驱动优化(WDO)^[14]算法等。

为能科学、客观评价水功能区水质状况,进一步拓展新型群体智能算法与投影寻踪融合模型在水质综合评价中的应用范畴,本文内容安排如下:(1)介绍一种新型群体智能算法——静电放电算法(Electrostatic Discharge Algorithm, ESDA),选取6个标准测试函数对ESDA进行仿真测试,并与当前具有较好寻优能力的新型群体智能算法——教学优化(TLBO)算法、灰狼优化(GWO)算法、鲸鱼优化算法(WOA)的仿真结果进行比较。(2)以文山州盘龙河干流4个断面2015-2017年共30个月水功能区水质综合评价分析为例,采用实测水质数据和所选评价指标在《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中I~V类分级阈值构建水质综合评价投影目标函数,利用ESDA求解该目标函数最佳投影方向,构建ESDA-PP模型对实例水功能区水质进行综合评价及分析。

2 静电放电算法及仿真验证

2.1 静电放电算法

静电放电算法(Electrostatic Discharge Algorithm, ESDA)是Houssem^[15]于2019年受静电放电

事件启发提出的一种新型元启发式优化算法。ESDA假设电子设备适应度与搜索空间位置有关,利用电子设备个体间直接或间接静电放电现象,通过具有最低适应度值电子设备向高适应度值电子设备移动来改变其位置以获得最佳空间位置,即问题最优解^[15]。与传统群智能算法相比,ESDA设置参数少、收敛速度快、寻优精度高,是一种具有较好竞争力的群体智能算法。

ESDA数学描述简述如下^[15]:

(1)初始化阶段。在搜索空间中随机生成群体大小 n ,即电子设备数量。每个电子设备由类似设计变量的不同组件组成。电子设备适应度与搜索空间中设备的位置有关,适应度值越大,设备的免疫力就越强。每个设备都有一个计数器,用于计算该设备作为损害设备的次数。

在搜索空间中,利用公式(1)随机生成 n 个电子设备初始解:

$$x_i = LB + \text{rand}(UB - LB) \quad (1)$$

式中: x_i 为电子设备群体中第 i 个电子设备的空间位置($i = 1, 2, \dots, n$); UB 、 LB 分别为搜索空间的上、下界。

(2)在每次迭代过程中,从电子设备群体中随机选择3个电子设备的适应度值并按降序排序(即最佳适应度值个体排序为第1)。生成随机数 r_1 ,如果 $r_1 > 0.5$,则静电放电现象仅在两个电子设备间发生;否则,涉及所有3个电子设备。每当设备受损害或电子设备受到静电放电时,该设备计数器将增加1。

①若 $r_1 > 0.5$,假设具有最低适应度值的电子设备2朝着具有最高适应度值的电子设备1移动。当电子设备2移动到电子设备1附近时,假设在两个个体之间发生静电放电现象,且电子设备2受到损害,这相当于直接静电放电事件。电子设备2新位置更新公式如下:

$$x_{2\text{new}} = x_2 + 2\beta_1(x_1 - x_2) \quad (2)$$

式中: $x_{2\text{new}}$ 为电子设备2新空间位置; x_1 、 x_2 分别为电子设备1、2当前空间位置; β_1 为服从正态分布的随机数,其均值 $\mu = 0.7$,标准差 $\sigma = 0.2$ 。

②若 $r_1 \leq 0.5$,静电放电涉及所有随机选择的3个电子设备,假设第3个电子设备正朝着另外两个电子设备移动。当电子设备3移动到电子设备1和电子设备2附近时,认为发生静电放电现象,且电子设

备 3 受到损害,这相当于间接静电放电事件。电子设备 3 新位置更新公式如下:

$$x_{3new} = x_3 + 2\beta_2(x_1 - x_3) + 2\beta_3(x_2 - x_3) \quad (3)$$

式中: x_{3new} 为电子设备 3 新空间位置; x_1 、 x_2 、 x_3 分别为电子设备 1、2、3 当前空间位置; β_2 和 β_3 均为服从正态分布的随机数,其均值 $\mu = 0.7$,标准差 $\sigma = 0.2$ 。

(3) 假设电子设备受静电放电超过 3 次,则认为该电子设备已被损坏,必须更新,即在搜索空间中随机生成新电子设备;否则,如果电子设备受静电放电事件影响小于或等于 3 次,则产生随机数 r_2 ,如果 $r_2 < 0.2$,则假定该电子设备的一部分已损坏并且必须改变,否则电子设备组件是安全的。

(4) 将新增电子设备补充到原电子设备群体中并保存,再按照电子设备个体适应度值的大小进行降序排序,选择前 n 个电子设备作为下一次迭代群体总量。

2.2 仿真实验

为验证 ESDA 寻优能力,利用 ESDA 对文献[16]中 Sphere、Griewank、Quadric、Rastrigin、Schwefel 2.22 和 Ackley 6 个典型测试函数进行仿真实验,并与当前具有较好寻优能力的新型群体智能算法 TLBO、GWO 和 WOA 的仿真结果进行比较。其中函数 Sphere、Quadric、Schwefel 2.22 为单峰函数,用于测试算法的寻优精度;函数 Griewank、Rastrigin、Ackley 为多峰函数,用于测试算法的全局搜索能力。4 种算法对 6 个基准测试函数重复进行 20 次寻优计算,并从平均值、标准差 2 个方面进行评估,见表 1。

验证实验参数设置如下:ESDA、TLBO、GWO 和 WOA 4 种算法最大迭代次数 $T = 100$,群体规模 $N = 100$ 。其中,TLBO 算法参数 T_F 为 1~10 之间随机整数;WOA 对数螺旋形状常数 $b = 2$;其他参数采用各算法默认值。

表 1 6 个典型测试函数优化结果对比

函数	算法	平均值	标准差	函数	算法	平均值	标准差
Sphere	ESDA	0	0	Rastrigin	ESDA	0	0
	TLBO	7.32×10^{-14}	2.26×10^{-14}		TLBO	0.6745	0.8530
	GWO	2.53×10^{-5}	1.67×10^{-5}		GWO	2.02×10	8.0556
	WOA	8.74×10^{-17}	1.76×10^{-16}		WOA	2.19×10^{-9}	4.88×10^{-9}
Griewank	ESDA	0	0	Ackley	ESDA	8.88×10^{-16}	1.97×10^{-31}
	TLBO	5.71×10^{-11}	1.37×10^{-10}		TLBO	4.68×10^{-8}	1.09×10^{-8}
	GWO	2.19×10^{-2}	3.01×10^{-2}		GWO	1.09×10^{-3}	4.09×10^{-4}
	WOA	2.62×10^{-15}	6.2×10^{-15}		WOA	1.72×10^{-9}	2.24×10^{-9}
Quadric	ESDA	0	0	Schwefel 2.22	ESDA	0	0
	TLBO	0.2734	0.1396		TLBO	1.99×10^{-7}	3.65×10^{-8}
	GWO	2.03×10	1.70×10		GWO	7.71×10^{-4}	2.79×10^{-4}
	WOA	1.11×10^2	6.82×10		WOA	7.87×10^{-11}	1.24×10^{-10}

从表 1 可以看出,对于 Sphere、Griewank、Quadric、Rastrigin、Schwefel 2.22 函数,ESDA 20 次寻优均获得了理论最优值 0,寻优效果远优于 TLBO、GWO 和 WOA 3 种算法;对于多峰函数 Ackley,ESDA 20 次寻优均获得相对理论最优值 8.88×10^{-16} ,寻优精度高于 TLBO、GWO、WOA 算法 6 个数量级以上。可见,无论是单峰函数还是多峰函数,ESDA 均表现出较为理想的寻优效果,其具有出色的搜索平衡能力、极值寻优能力和跳出局部极值能力。

3 ESDA-PP 评价模型

3.1 投影寻踪(PP)技术

投影寻踪技术简要算法如下^[10-14]:

(1) 利用公式(4)、(5) 分别对正向、负向指标

进行处理。

$$x(i,j) = (x(i,j) - x_{\min}(j)) / (x_{\max}(j) - x_{\min}(j)) \quad (4)$$

$$x(i,j) = (x_{\max}(j) - x(i,j)) / (x_{\max}(j) - x_{\min}(j)) \quad (5)$$

式中: $x(i,j)$ 为指标归一化序列; $x_{\max}(j)$ 、 $x_{\min}(j)$ 分别为第 j 个指标值上、下限值。

(2) 构造投影值 $z(i)$ 指标函数:

$$z(i) = \sum_{j=1}^m a(j)x(i,j) \quad (6)$$

式中: a 为单位长度向量。

(3) 将搜寻最优投影向量问题转化为单目标非线性最优求解问题,即:

$$\begin{cases} \max: Q(a) = S_z D_z \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad a \in [-1, 1] \end{cases} \quad (7)$$

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 表达式参见文献[12]; $Q(a)$ 为待优化目标函数。

3.2 ESDA-PP 模型评价实现步骤

ESDA-PP 水质综合评价模型的实现步骤归纳如下:

Step1 选取水质综合评价指标、序列长度和各评价指标 I~V 类阈值,对样本进行一致性处理,利用处理后的样本构建水质评价待优化目标函数 $Q(a)$,利用 ESDA 对 $Q(a)$ 投影向量进行优化求解。

Step2 设置 ESDA 群体规模 N 、最大迭代次数和算法终止条件;利用公式(1)生成电子设备初始空间位置,令当前迭代次数 $t = 0$ 。

Step3 随机选择 3 个电子设备,计算待优化问题目标函数适应度值并按降序进行排序。

Step4 在 $(0, 1)$ 之间生成随机数 r_1 , 如果 $r_1 > 0.5$, 则静电放电现象仅在两个电子设备间发生,利用公式(2)更新电子设备 2 位置;若 $r_1 \leq 0.5$, 涉及所有 3 个电子设备,利用公式(3)更新电子设备 3 位置。

Step5 检查电子设备空间位置是否超出搜索范围,若电子设备空间位置位于搜索空间之外,则利用公式(1)将其强制带回搜索空间。

Step6 依据电子设备受静电放电次数更新电子设备群体,并将新增电子设备补充到原电子设备种群中并保存。按电子设备个体适应度值的大小进降序排序,选择前 N 个电子设备作为下一次迭代群体规模。

Step7 令 $t = t + 1$, 判断算法是否满足终止条件,若是,输出最优解 x_{best} , 寻优过程结束;否则重复 Step3 ~ Step7。

Step8 输出 ESDA 最优解 x_{best} , 即最佳投影向量 a 。利用 a 计算各评价对象投影值 z 及各水质类别分级投影值 z' , 利用水质类别分级投影值 z' 对实例水功能区水质进行综合评价及分析。

4 应用实例

4.1 研究区概况与数据来源

盘龙河属红河流域, 泸江水系, 发源于红河州蒙自县三道湾, 流经砚山、文山等 6 县市, 于天保船头注入越南。盘龙河中越国界以上流域面积 6 497 km², 河长 247 km, 落差 1 803 m, 平均坡降 7.24‰, 多年平均水资源量 26.7 × 10⁸ m³。依据《文山州地

表水功能区划(2015 修订)》, 盘龙河干流由上至下依次划分为盘龙河砚山-文山农业工业用水区, 水质代表断面天生桥 2020 和 2030 年(规划年)的水质保护目标为 II 类; 盘龙河文山饮用水源区的水质代表断面为灰土寨, 规划年水质保护目标为 II 类; 盘龙河文山景观农业用水区的水质代表断面为花桥, 规划年水质保护目标为 III 类; 盘龙河文山-麻栗坡保留区的水质代表断面为天保大桥, 规划年水质保护目标为 III 类。开展盘龙河干流水功能区水质综合评价对于区域河长制考核评价、落实最严格水资源管理制度具有重要意义。

本文选取对水功能区水质影响较大的 DO、NH₃-N、COD_{Mn}、BOD₅ 和 TP 作为水质综合评价因子, 通过构建 ESDA-PP 模型对盘龙河干流天生桥、灰土寨、花桥、天保大桥 4 个断面 2015-2017 年水功能区水质进行综合评价, 其中 2015 年为双月监测, 2016、2017 年为逐月监测。限于篇幅, 水质监测数据从略。

4.2 模型求解

依据 ESDA-PP 水质综合评价模型实现步骤, 利用天生桥、灰土寨、花桥、天保大桥 4 个断面 2015-2017 年共 30 个月断面水质实测数据和所选 5 个评价指标在《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 中 I~V 类分级阈值构建水质综合评价投影目标函数 $Q(a)$, 利用 ESDA 求解 $Q(a)$ 最佳投影方向向量 a 。ESDA 参数设置同上。经求解, 20 次优化目标 $Q(a)$ 值均为 18 934.447, 标准差均为 0; 20 次优化投影向量均相同, 即 $a = (-0.0754 \ 0.5530 \ 0.4440 \ 0.5530 \ 0.4307)$ 。该实例优化结果再次验证了 ESDA 具有较好的寻优精度和极值寻优能力。

4.3 结果与分析

(1) 构造水质评价等级标准。利用上述优化获得的最佳投影向量 a 和经一致性处理后的 I~V 类分级阈值, 基于公式(6)计算得到 I~V 类分级标准投影值 z' , z' 即为水质综合评价分级标准, 即: I 类 < 0.1801、II 类 ∈ [0.1801, 0.3303)、III 类 ∈ [0.3303, 0.5795)、IV 类 ∈ [0.5795, 0.9411)、V 类 ∈ [0.9411, 1.4574) 和劣 V 类 ≥ 1.4574。

(2) 综合评价。同理, 依据上述优化获得的最佳投影向量 a 和经一致性处理后的天生桥、灰土寨、花桥、天保大桥 4 个断面 2015-2017 年共 30 个月断面水质实测数据, 基于公式(6)计算得到各断面各月份综合投影值 z , 利用水质综合评价分级标准 z' 进行评价与分析, 见表 2 及图 1~2。

表 2 2015 – 2017 年盘龙河 4 个断面水质综合投影值及评价结果

时间/ (年-月)	天生桥断面			灰土寨断面			花桥断面			天保大桥断面		
	投影值	评价类别	单因子评价类别	投影值	评价类别	单因子评价类别	投影值	评价类别	单因子评价类别	投影值	评价类别	单因子评价类别
2015-02	0.1707	I	II	0.0769	I	II	0.3642	III	IV	0.0028	I	I
2015-04	0.2156	II	III	0.0512	I	II	0.7181	IV	劣 V	0.0155	I	II
2015-06	0.1674	I	III	0.1643	I	III	0.4636	III	V	0.1518	I	III
2015-08	0.1592	I	II	0.3388	III	IV	0.5135	III	IV	0.1153	I	II
2015-10	0.1998	II	III	0.4860	III	IV	0.5112	III	V	0.2413	II	II
2015-12	0.2568	II	III	0.1716	I	II	0.3905	III	IV	0.1688	I	II
2016-01	0.0939	I	III	0.1599	I	II	0.4539	III	IV	0.1736	I	II
2016-02	0.0879	I	III	0.0661	I	II	0.3377	III	IV	0.0574	I	II
2016-03	0.1447	I	II	0.1711	I	III	0.2954	II	III	0.1719	I	II
2016-04	0.1236	I	II	0.0771	I	II	0.4456	III	IV	0.0685	I	II
2016-05	0.1378	I	II	0.1942	II	II	0.7479	IV	劣 V	0.0393	I	I
2016-06	0.2476	II	II	0.2112	II	II	0.7007	IV	V	0.2070	II	II
2016-07	0.2686	II	III	0.2379	II	II	0.4826	III	III	0.1194	I	II
2016-08	0.2217	II	III	0.1768	I	III	0.2973	II	III	0.2573	II	III
2016-09	0.1915	I	II	0.1828	II	III	0.2942	II	III	0.1634	I	II
2016-10	0.3737	III	III	0.4097	III	III	0.5217	III	IV	0.2797	II	II
2016-11	0.3019	II	II	0.3993	III	IV	0.4573	III	IV	0.2841	II	II
2016-12	0.1452	I	II	0.0738	I	I	0.5730	III	V	0.1886	II	II
2017-01	0.0940	I	III	0.1778	I	III	0.3135	II	III	0.1249	I	III
2017-02	0.1423	I	III	0.1222	I	II	0.3279	II	IV	0.0361	I	II
2017-03	0.0754	I	II	0.0478	I	I	0.1715	I	III	0.0887	I	I
2017-04	0.1185	I	III	0.1329	I	II	0.4054	III	III	0.2364	II	III
2017-05	0.1202	I	III	0.1098	I	III	0.3458	III	IV	0.1490	I	III
2017-06	0.1231	I	II	0.0445	I	II	0.7154	IV	劣 V	0.0083	I	I
2017-07	0.3493	III	IV	0.3461	III	IV	0.5115	III	V	0.0491	I	II
2017-08	0.2254	II	III	0.2152	II	II	1.2036	V	劣 V	0.0602	I	II
2017-09	0.1614	I	II	0.1904	II	III	0.0986	I	II	0.0452	I	II
2017-10	0.0726	I	II	0.0227	I	I	0.1577	I	II	0.0707	I	I
2017-11	0.1296	I	I	0.0978	I	II	0.1108	I	II	0.0855	I	II
2017-12	0.3000	II	III	0.1653	I	III	0.4767	III	V	0.0205	I	I

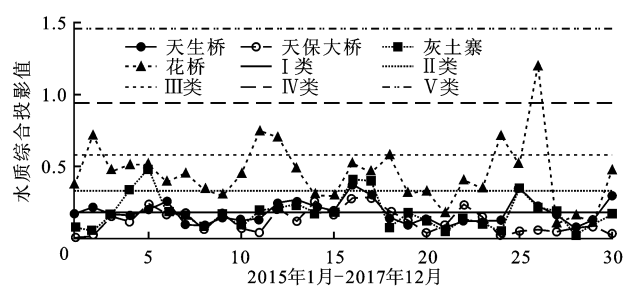


图 1 2015 – 2017 年 30 个月各断面水质评价结果

从表 2 及图 1、2 可以得出以下结论：

(1)ESDA – PP 模型对盘龙河 4 个断面评价结果与单因子评价结果存在差异,总体评价结果要优于单因子评价结果 I ~ II 类。从评价数据来看,影响盘龙河水质主要因子为 $\text{NH}_3\text{—N}$,单因子评价法

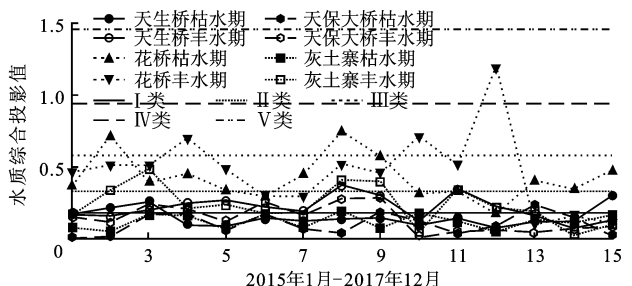


图 2 2015 – 2017 年 30 个月各断面枯、丰水期水质评价结果

仅依据 $\text{NH}_3\text{—N}$ 单项指标评价各断面水质类别,显然不够科学、客观。

(2)依据 ESDA – PP 模型评价结果,并按频次法大于等于 80% 即为达标来看,天生桥、灰土寨、花桥和天保大桥断面在研究期的 30 个月内水功能区

水质达标率分别为93.3%、83.3%、83.3%和100%,能满足或基本满足水功能区水质保护目标要求。其中天生桥断面水质处于Ⅰ~Ⅲ类之间,水质保护目标Ⅱ类,30个月水功能区水质达标率为93.3%,水功能区水质能满足Ⅱ类水质保护目标要求;灰土寨断面水质处于Ⅰ~Ⅲ类之间,水质保护目标Ⅱ类,30个月水功能区水质达标率为83.3%,水功能区水质基本能满足Ⅱ类水质保护目标要求;花桥断面总体水质处于Ⅱ~Ⅴ类,水质保护目标Ⅲ类,30个月水功能区水质达标率为83.3%,水功能区水质基本能满足Ⅱ类水质保护目标要求;天保大桥断面水质处于Ⅰ~Ⅱ类,水质保护目标Ⅲ类,30个月水功能区水质达标率为100%,水功能区水质完全能满足Ⅱ类水质保护目标要求。若按单因子评价法进行水功能区水质达标评价,则天生桥、灰土寨、花桥、天保大桥30个月水功能区水质达标率分别为46.7%、56.7%、33.3%、100%,除天保大桥外,其余3个断面均不能满足水功能区水质保护目标要求。

(3)天生桥、灰土寨、花桥断面枯水期水质总体上要优于丰水期,说明农田和城市面源污染是影响盘龙河水质的主导因素。天保大桥位于盘龙河下游,汛期来水较大,丰水期水质总体上要优于枯水期,说明盘龙河下游段水质总体尚好的主要原因是巨大的水量和流量,也间接说明点源污染是影响盘龙河下游段水质的主要因素。

5 结 论

本文介绍一种新型群体智能算法——静电放电算法(ESDA),通过对ESDA进行仿真验证和构建ESDA-PP评价模型对盘龙河4个断面2015-2017年30个月水功能区水质进行实例综合评价,得出以下结论:

(1)选取6个标准测试函数对ESDA进行仿真验证,并与TLBO、GWO、WOA仿真结果进行对比,结果表明ESDA寻优精度远优于TLBO、GWO、WOA,具有出色的寻优精度和全局搜索能力,是一种具有较好竞争力的群体智能算法。

(2)ESDA-PP模型对实例评价结果显示,盘龙河天生桥、灰土寨、花桥和天保大桥断面2015-2017年30个月水功能区水质达标率分别为93.3%、83.3%、83.3%和100%,能满足或基本满足水功能区水质保护目标要求。天生桥、灰土寨、花

桥断面枯水期水质总体上要优于丰水期,农田和城市面源污染是影响盘龙河水质的决定因素;天保大桥丰水期水质总体上要优于枯水期,点源污染是制约盘龙河下游段水质的主要因素。

参考文献:

- [1] 吕平毓,曾雨虹.灰色关联法在长江宜宾-万州段水质评价的应用[J].人民长江,2016,47(S2):19-22.
- [2] 孙彦,杨侃,刘建林,等.基于TOPSIS和变权模糊的再生水水质评价模型[J].人民黄河,2018,40(8):57-61.
- [3] 李松青,王心义,姬红英,等.基于遗传算法-BP神经网络法的深埋地下水水质评价[J].水电能源科学,2019,37(1):49-52+16.
- [4] 何福娟,刘永强.基于动态可变模糊综合评判法地下水水质评价[J].水资源与水工程学报,2017,28(6):38-43.
- [5] 龙必能.支持向量机在饮用水水源地水质评价中的应用[J].人民珠江,2016,37(5):85-89.
- [6] 黄瑞,张防修.基于优化集对分析模型的水质综合评价方法[J].长江科学院院报,2016,33(5):6-10+17.
- [7] 吴光琼,方金鑫.基于SSO-PP模型的滇池流域水质综合评价[J].长江科学院院报,2016,33(10):18-23.
- [8] 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.
- [9] 月敏,孙秀玲,曹升乐,等.基于投影寻踪技术的南四湖下级湖水水质评价[J].水电能源科学,2016,34(3):49-51+54.
- [10] 程刚,陈金红.节水型社会建设区域类型综合评价的CKGSA-PP模型及应用[J].水资源与水工程学报,2017,28(6):62-68+73.
- [11] 崔东文.文山州近10年水资源利用效率评价SLC-PP模型及应用[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(2):129-136.
- [12] 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+41.
- [13] 崔东文.蛾群算法与投影寻踪耦合模型在区域水资源脆弱性评价中的应用[J].三峡大学学报(自然科学版),2017,39(4):10-18.
- [14] 崔东文,金波.基于WDO-PP模型的文山州近10年水资源承载力评价[J].水利经济,2016,34(6):43-49+81.
- [15] HOUSSEM B. Electrostatic discharge algorithm; a novel nature-inspired optimization algorithm and its application to worst-case tolerance analysis of an EMC filter[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2019, 13(4): 491-499.
- [16] 崔东文.正弦余弦算法-投影寻踪水污染物总量分配模型[J].水资源保护,2016,32(6):75-81+97.