

基于MAGA-PPC模型的水资源配置方案综合评价

王庆杰, 岳春芳, 李艺珍

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐830052)

摘要: 针对水资源配置方案的多目标性、模糊性和不确定性的特点,采用投影寻踪方法将高维数据投影到二维空间,结合聚类算法和多智能体遗传算法建立水资源配置方案综合评价投影寻踪聚类模型(MAGA-PPC),并通过指标的相关性分析验证模型的有效性确保求得最优解。以陕西省引汉济渭受水区为例进行研究。结果表明:MAGA-PPC能够较为系统地量化各方案在社会、经济、生态和资源等方面的综合差异,其评价结果符合研究区水资源开发利用的实际情况,MAGA-PPC在水资源合理配置方案评价中有较好的实用性。

关键词: 水资源配置方案; 综合评价; 投影寻踪聚类模型(PPC); 多智能体遗传算法(MAGA)

中图分类号: TV213.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2018)03-0105-06

Comprehensive evaluation of water resources allocation schemes based on MAGA-PPC model

WANG Qingjie, YUE Chunfang, LI Yizhen

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: According to the characteristics of multi-objective, fuzziness and uncertainty of water resource allocation scheme, projection pursuit method was used to project high dimensional data into two-dimensional space, and combined with the clustering algorithm and multi-agent genetic algorithm, a projection pursuit clustering comprehensive evaluation model (MAGA-PPC) of water resources allocation was established. The validity of the model is verified by the correlation analysis of the index to ensure that the optimal solution is obtained. Meanwhile, the Hanjiang-to-Weihe water transfer project in Shaanxi province was taken as an example, and the evaluation results show that MAGA-PPC can comprehensively and systematically quantify the differences in social, economic, ecological, resources aspects of various programs, and this evaluation result is consistent with the development and utilization of water resources in the study area. Moreover, MAGA-PPC has good practicability in the evaluation of rational allocation of water resources.

Key words: water resources allocation schemes; comprehensive evaluation; projection pursuit clustering (PPC) model; multi-agent genetic algorithm (MAGA)

1 研究背景

随着工、农业的发展和城市化进程的加快,水资源短缺、水资源利用率低、水生态环境恶化等一系列水问题已制约着我国经济社会的可持续发展^[1],水资源合理配置是解决这些问题的有效途径之一。区域水资源配置涉及经济、社会、资源、生态等多方面的内容,现有的水资源配置模型虽然能够考虑多方

面的因素,但由于配置的多目标性导致模型优化出的可行性方案较多,管理者在方案决策时难以做出判断,水资源配置评价可为方案决策提供技术支持。

常用的水资源配置评价方法有TOPSIS法^[2]、模糊物元分析法^[3]、D-S证据理论^[4]、格序理论^[5]、模糊熵模型^[6]、灰色聚类模型^[7]、概率神经网络模型^[8]等,这些方法各具特色,如前6种方法属于半定量研究方法,需权重参与评价,而权重确定的合

收稿日期:2017-11-09; 修回日期:2018-01-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51569032)

作者简介:王庆杰(1994-),男,四川雅安人,硕士研究生,主要从事水资源优化配置研究。

通讯作者:岳春芳(1972-),女,陕西长安人,副教授,硕士生导师,从事水资源管理研究。

理性直接影响方案评价的结果,神经网络法需要较多专业知识和经验对构造的网络模型进行训练和学习,主成分分析法建模时必须判定多种现象和确定多个合理参数,而且需要大量的样本参与评价。

Friedman 等^[9]于 1974 年提出处理高维、非线性、非正态数据特点的投影寻踪聚类(PPC)技术,1986 年李国英^[10]将其引入国内,自 2000 年被张欣莉等^[11]在水质评价中首次应用后,PPC 评价模型能够有效解决方案优劣评价、等级划分、指标性质探索及重要性排序等问题。多智能体遗传算法(MAGA)是将人工智能中的多智能体引入到遗传算法中而成的一种混合进化算法,在超高维函数优化、线性系统逼近、多目标优化等领域已经取得了较好的应用效果^[12]。在水资源配置方案评价中尝试使用 MAGA 进行 PPC 建模,旨在提高水资源配置评价结果的可靠性,为水资源管理决策分析提供新的方法。

2 构建水资源配置方案评价模型

2.1 样本数据预处理

设水资源配置方案集为 $\{x_{ij}^0 \mid i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m\}$, 其中 x_{ij}^0 为样本 i 的第 j 指标值, m 为指标数, n 为方案数。

为了避免评价指标间的量纲影响,按以下公式进行标准化处理^[13]:

效益型指标:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}^0 - x_{j \min}^0}{x_{j \max} - x_{j \min}} \quad (1)$$

成本型指标:

$$x_{ij} = \frac{x_{j \max} - x_{ij}^0}{x_{j \max} - x_{j \min}} \quad (2)$$

区间型指标为:

$$\begin{cases} 1 - \frac{S_1 - x_{ij}^0}{\max(S_1 - x_{j \min}^0, x_{j \max}^0 - x_{ij}^0)} & x_{ij}^0 < S_1 \\ 1 & S_1 \leq x_{ij}^0 \leq S_2 \\ 1 - \frac{x_{ij}^0 - S_2}{\max(S_1 - x_{j \min}^0, x_{j \max}^0 - x_{ij}^0)} & x_{ij}^0 > S_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x_{j \max}$ 、 $x_{j \min}$ 分别为第 j 评价指标中的最大值、最小值; $[S_1, S_2]$ 为第 j 指标的最佳区间。

2.2 聚类分析

设投影方向为 $a_j (j = 1, 2, \dots, m)$, 则第 i 个样本的一维投影特征值为:

$$Z_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

通过最大化投影值 Z_i 的标准差 $s(a)$ 和类内密度 $d(a)$ 来寻找最优投影方向^[14-15], 投影指标函数表达式 $Q(a)$ 见公式(5), 最优投影方向的实现见公式(6)。

$$Q(a) = s(a)d(a) \quad (5)$$

$$\begin{cases} \max Q(a) \\ \text{s. t. } \|a\| = \sum_{i=1}^n a_i^2 = 1 \quad -1 \leq a_i \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

$s(a)$ 和 $d(a)$ 的计算见公式(7), 其中 r_{ik} 为两方案投影值间的距离 $r_{ik} = |Z_i - Z_k|$, $u(R - r_{ik})$ 为单位阶跃函数, 当 $R > r_{ik}$ 时, $u(R - r_{ik}) = 1$, 否则 $u(R - r_{ik}) = 0$, 密度窗宽 R 的取值以楼文高^[16]推荐的取 $\max(r_{ik})/5 \leq R \leq \max(r_{ik})/3$ 为标准。

$$\begin{cases} s(a) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}{n-1}} \\ d(a) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n ((R - r_{ik})u(R - r_{ik})) \end{cases} \quad (7)$$

2.3 寻找最优投影方向

采用多智能体遗传算法(MAGA)^[17-18], 用投影方向向量进行编码, 将每一个投影方向视为一个智能体储存于一个 $L \times L$ 的网格环境中。程序初始化时, 赋予所有智能体等于投影指标值相反的能量; 程序运行时, 互为邻域的智能体间通过竞争、高斯变异、自我学习的方式增加能量实现进化。计算过程如下:

设 L_t 为第 t 代智能体网格, $L_{t+1/3}$ 、 $L_{t+2/3}$ 为 L_t 和 L_{t+1} 间的中间代智能体网格; $Best^t$ 为 L_0, L_1, \dots, L_t 中的最优智能体; $Cbest^t$ 为 L_t 中的最优智能体; $Energy(L_t)$ 是智能体的能量; Pc 、 Pm 为预先设定的参数, 分别控制领域正交叉算子和高斯变异算子的执行; $U(0, 1)$ 为 $0 \sim 1$ 间均匀分布的随机数。

步骤 1: 初始化参数和智能体网格 L_0 , 计算每个智能体的能量, 找出能量最大的智能体 $Cbest^0$, 令 $t = 0$ 开始迭代循环。

步骤 2: 对每个智能体执行领域竞争算子, 得到新的智能体网格 $L_{t+1/3}$ 。

步骤 3: 若 $U(0, 1) < Pc$, 对 $L_{t+1/3}$ 中的智能体执行正交叉算子, 得到智能体网格 $L_{t+2/3}$ 。

步骤 4: 若 $U(0, 1) < Pc$, 对 $L_{t+2/3}$ 中的智能体执行高斯变异算子, 得到智能体网格 L_{t+1} 。

步骤 5: 从 L_{t+1} 找出 $Cbest^t$ 执行自学习算子。

步骤 6: 若 $Energy(Cbest^t) > Energy(Best^{t-1})$,

则令 $Best^t = Cbest^t$, 否则 $Best^t = Best^{t-1}$ 。

步骤 7:判断进化代数是否达到最大迭代次数 N ,若是,输出 $Best^t$,否则, $t = t + 1$ 并转步骤 2。

步骤 8:根据 $Best^t$ 投影指标函数,输出模型运算结果。

3 算例分析

3.1 基础数据的收集

渭河发源于甘肃渭源县鸟鼠山,流经甘肃、宁夏、陕西 3 省,流域总面积 $13.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,兴水治旱是渭河流域治理的主题。这里借鉴文献[19]中的成果,以陕西省引汉济渭受水区 5 座大城市、13 座小城市和 8 个工业园区的水资源配置研究为例,从水资源的需求侧、供给侧、模型侧 3 个方面入手设置 13 个水资源配置方案,详见表 1。

根据水资源供需平衡分析,方案 7 缺水较为严重不纳入评价。考虑水资源管理的相关政策以及受水区水资源开发利用的现状,从社会、经济、生态和资源 4 个方面构建水资源配置评价指标体系见表 2,根据表 2 中指标的计算方法,确定各方案的具体评价指标值见表 3。

3.2 模型建立及验证

首先建立 MAGA - PPC 水资源配置方案评价模型,模型中智能体网格大小 L 取为 30,最大迭代次数 $N = 200$,竞争概率 $Po = 0.2$,交叉概率 $Pc = 0.1$,变异概率 $Pm = 0.1$,密度窗宽 $R = r_{\max}/3$ 。

为了保证方案评价的准确性,评价前需检验所建立的 MAGA - PPC 模型。考虑算例中指标较多验证过程较复杂,故筛选出 5 个代表性较好、灵敏性较高的指标,采用楼文高等^[16]推荐的方法,随机增设 3 个虚拟指标 $R'_1 = 1$ 、 $R'_2 = 1 - R_2$ 、 $R'_3 = R_3$,利用

变量间的相关性分析检验模型,确保求出真正的全局最优解。标准化处理后的数据见表 4,模型试运算结果见表 5。

表 5 结果显示,当增加 R'_1 、 R'_3 、 R'_3 3 个虚拟指标,模型运算后 $aR'_1 \approx 0$ 、 $aR'_2 \approx -aR_2$ 、 $aR'_3 \approx aR_3$,这表明建立的模型合理、有效;删除虚拟指标 R'_2 、 R'_3 ,仅增加虚拟指标 R'_1 时, $aR'_2 \approx 0$,样本值都相等的指标投影向量系数等于 0,分别采用成本型和效益性标准化处理后的指标投影向量系数互为相反数,数值完全相同的两个指标投影向量系数相同,这与文献[17]中所述的模型验证结果一致,表明 MAGA - PPC 模型编程和参数设置有效,最优化过程能求得全局最优解。

3.3 水资源配置方案评价

采用公式(1)~(3)标准化处理表 3 中的方案评价指标,根据研究区的现状特点,水资源开发利用率取[0.45,0.5]为最优区间,标准化值见表 6。

经 MAGA - PPC 模型计算,目标函数值 $Q(a) = 1762.7$,投影窗宽半径 $R = 0.9209$,最优投影方向 $a = (0.0015, 0.1496, 0.1535, 0.4222, 0.4253, -0.1279, 0.4268, 0.1275, 0.1251, -0.0334, 0.426, 0.4262)$ 。根据 MAGA - PPC 模型计算得出的评价结果,将其与文献[19]的评价结果进行对比,结果见表 7。

评价结果中,成本型指标 R_6 的投影向量 $a_{R_6} = -0.1279 < 0$,将模型约束条件变更为 $\sum_{j=1}^m a_j^2 = 1$, $0 \leq a_j \leq 1$,其它条件不变,结果变为 $a_{R_6} = 0$ 。在模型合理有效的前提下,理论上的成本型指标,实际却反映出越大越好的规律,这可能是数据不精确导致,删除指标后再运算模型,其评价结果基本保持不变。

表 1 2020 年陕西省引汉济渭受水区水资源配置方案集设置

调控手段	配置措施	方案												
		1	2	3	4	4	6	7	8	9	10	11	12	13
引汉济渭工程	调水 $15.5 \times 10^8 \text{ m}^3$	√	√						√	√				
	调水 $12.0 \times 10^8 \text{ m}^3$			√	√						√	√		
	调水 $10.0 \times 10^8 \text{ m}^3$						√	√					√	√
水资源配置模型	不调水							√						
	模拟模型	√	√	√	√	√	√	√						
	优化模型								√	√	√	√	√	√
节水手段	工业节水 5%		√		√		√			√		√		√

注:“√”表示采取的措施。

表2 2020年陕西省引汉济渭受水区水资源配置方案评价指标体系

目标	评价准则	评价指标	指标类型	备注
水资源配置效果	社会合理性	生活用水保证率 $R_1 / \%$	\wedge	正常供水的年数占总年数的百分比
		工业用水保证率 $R_2 / \%$	\wedge	正常供水的年数占总年数的百分比
		缺水率 $R_3 / \%$	\vee	缺水量/需水量 $\times 100\%$
	经济合理性	人均 GDP $R_4 / 10^4$ 元	\wedge	GDP/总人口数
		单位水 GDP $R_5 / (\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	\wedge	GDP/总耗水量
		新增水利工程投资 $R_6 / 10^8$ 元	\vee	增加的供水工程投资
	生态合理性	二产产值占 GDP 的百分数 $R_7 / \%$	\wedge	第二产业产值/GDP
		生态用水缺水率 $R_8 / \%$	\vee	生态环境缺水量/生态环境需水量 $\times 100\%$
		生态用水保证率 $R_9 / \%$	\wedge	正常供水的年数占总年数的百分比
	资源利用合理性	水资源开发利用效率 $R_{10} / \%$	区间型	年总供水量/水资源总量 $\times 100\%$
		工业用水定额 $R_{11} / (\text{m}^3 \cdot \text{元}^{-1})$	\vee	单位产品或万元产品耗水量定额
		人均综合用水定额 $R_{12} / 10^4 \text{m}^3$	\vee	区域年总用水量/区域总人口数

注“ \wedge ”表示效益型指标,“ \vee ”表示成本型指标。

表3 2020年陕西省引汉济渭受水区水资源配置方案评价指标值

方案	评价指标											
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}
1	100	84.74	4.23	7.49	289.28	85	47.42	12.77	87.23	51.88	19.99	256.28
2	100	90.39	2.82	7.88	315.59	85	49.92	11.06	88.94	50.74	18.99	246.99
3	100	65.10	10.47	7.49	289.28	82	47.42	16.98	83.02	48.50	19.99	256.28
4	100	69.41	8.74	7.88	315.95	82	49.92	15.12	84.88	47.65	18.99	246.99
5	100	51.99	15.68	7.49	289.28	80	47.42	24.14	75.86	45.68	19.99	256.28
6	100	57.91	13.33	7.88	315.95	80	49.92	22.31	77.69	45.25	18.99	246.99
8	100	95.14	0.94	7.49	289.28	85	47.42	14.58	85.42	53.67	19.99	256.28
9	100	95.14	0.43	7.88	315.95	85	49.92	14.58	85.42	51.99	18.99	246.99
10	100	74.22	7.60	7.49	289.28	82	47.42	37.15	62.85	50.00	19.99	256.28
11	100	74.22	4.20	7.88	315.95	82	49.92	37.15	62.85	49.90	18.90	246.99
12	100	44.39	13.45	7.49	289.28	80	47.42	57.41	42.59	46.89	19.99	256.28
13	100	59.81	10.65	7.88	315.95	80	49.92	45.25	54.75	46.65	18.99	246.99

表4 模型验证指标

方案	检验指标							
	R_2	R_3	R_5	R_9	R_{10}	$R'_1 \equiv 1$	$R'_2 = 1 - R_2$	$R'_3 = R_3$
1	0.7951	0.7508	0	0.9631	0.4877	1	0.2049	0.7508
2	0.9064	0.8433	1	1.0000	0.7983	1	0.0936	0.8433
3	0.4081	0.3416	0	0.8723	1.0000	1	0.5919	0.3416
4	0.4930	0.4551	1	0.9124	1.0000	1	0.5070	0.4551
5	0.1498	0.0000	0	0.7178	1.0000	1	0.8502	0.0000
6	0.2664	0.1541	1	0.7573	1.0000	1	0.7336	0.1541
8	1.0000	0.9666	0	0.9241	0.0000	1	0.0000	0.9666
9	1.0000	1.0000	1	0.9241	0.4578	1	0.0000	1.0000
10	0.5878	0.5298	0	0.4371	1.0000	1	0.4122	0.5298
11	0.5878	0.7528	1	0.4371	1.0000	1	0.4122	0.7528
12	0.0000	0.1462	0	0.0000	1.0000	1	1.0000	0.1462
13	0.3038	0.3298	1	0.2624	1.0000	1	0.6962	0.3298

表 5 模型验证时的最优投影方向向量

项目	指标投影分向量							
	a_{R_2}	a_{R_3}	a_{R_5}	a_{R_9}	$a_{R_{10}}$	$a_{R'_1}$	$a_{R'_2}$	$a_{R'_3}$
情形 1	0.4377	0.4217	0.2707	0.3086	-0.3093	0.0023	-0.4338	0.4222
情形 2	0.5251	0.5019	0.4425	0.3953	-0.3469	-0.0002		
情形 3	0.5227	0.5023	0.4422	0.3961	-0.3493			

注:情形 1 表示增加 3 个虚拟指标后的运算结果;情形 2 表示仅增加虚拟指标 R'_1 时的运算结果;情形 3 表示不添加虚拟指标的运算结果。

表 6 2020 年陕西省引汉济渭受水区水资源配置方案评价指标标准化值

方案	评价指标											
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}
1	0	0.7951	0.7508	0	0	0.0	0	0.9631	0.9631	0.4877	0	0
2	0	0.9064	0.8433	1	1	0.0	1	1.0000	1.0000	0.7983	1	1
3	0	0.4081	0.3416	0	0	0.6	0	0.8723	0.8723	1.0000	0	0
4	0	0.4930	0.4551	1	1	0.6	1	0.9124	0.9124	1.0000	1	1
5	0	0.1498	0.0000	0	0	1.0	0	0.7178	0.7178	1.0000	0	0
6	0	0.2664	0.1541	1	1	1.0	1	0.7573	0.7573	1.0000	1	1
8	0	1.0000	0.9666	0	0	0.0	0	0.9241	0.9241	0.0000	0	0
9	0	1.0000	1.0000	1	1	0.0	1	0.9241	0.9241	0.4578	1	1
10	0	0.5878	0.5298	0	0	0.6	0	0.4371	0.4371	1.0000	0	0
11	0	0.5878	0.7528	1	1	0.6	1	0.4371	0.4371	1.0000	1	1
12	0	0.0000	0.1462	0	0	1.0	0	0.0000	0.0000	1.0000	0	0
13	0	0.3038	0.3298	1	1	1.0	1	0.2624	0.2624	1.0000	1	1

表 7 2020 年陕西省内引汉济渭受水区水资源配置方案评价结果

方案	评价模型及优劣排序			
	MAGA - PPC	优劣排序	模糊优选	优劣排序
1	0.47	8	0.55	4
2	2.65	2	0.57	2
3	0.26	9	0.51	7
4	2.44	3	0.53	5
5	0.08	11	0.46	11
6	2.26	5	0.49	9
8	0.51	7	0.57	2
9	2.66	1	0.58	1
10	0.22	10	0.50	8
11	2.39	4	0.52	6
12	-0.09	12	0.42	12
13	2.18	6	0.47	10

(1)方案可划分为两个等级,即方案 9、2、4、11、6、13 的水资源配置情况较优,为等级 I;方案 8、1、3、10、5、12 的水资源配置情况一般,为等级 II。由表 1 可知:等级 I 中的方案均采取了强化节水措施,等级 II 中的方案均未采取强化节水措施;同等级中的方案,调水量越多,方案越优;等级 I 和等级 II 中,在调水和其他配置措施相同的情况下,选用优化模型与模拟模型的两个方案评价结果相近,即方案 1 和方案 8、方案 2 和方案 9、方案 3 和方案 10、方案 4 和方案 11、方案 5 和方案 12、方案 6 和方案 13 评价结果相近。

(2)MAGA - PPC 模型的评价结果与模糊优选模型都确定方案 9 的水资源配置情况最优、方案 12 的水资源配置情况最差,在等级划分上 MAGA - PPC 模型与模糊优选模型存在一定的差异,即 MAGA - PPC 中凡采取了强化节水措施的方案均比不节水方案优,而模糊优选模型结果表明调水越多,方案越优;此外,MAGA - PPC 模型评价后的投影特征值间的差异较为明显。

对综合评价结果进行分析,得出结论如下:

4 结 论

(1)相比现有的水资源配置评价方法,PPC在无需权重参与的情况下联通各参评指标间的数据信息,能够较为系统、精确地量化各方案在社会、经济、生态和资源等方面上的综合差异,且其评价结果与研究区的水资源开发利用状况和经济发展状况相符合,在水资源配置方案评价方面有很好的适应性。

(2)考虑到已有文献中对PPC建模合理性检验较少,以陕西省2020年水资源配置方案为例,从3个方面增设虚拟指标,并通过MAGA-PPC计算出的投影向量系数分析虚拟指标和评价指标的相关性,结果数值相同的指标的投影向量系数相等、所有样本数据完全相等的指标投影向量系数等于0、改变指标归一化方式后的指标投影向量系数为原指标的相反数,这表明MAGA-PPC模型编程和参数设置有效,该方法能够保证模型建立的合理性。

(3)陕西省内引汉济渭受水区2020年的水资源配置评价结果表明,MAGA-PPC模型能够客观、真实对水资源的配置情况做出评价。相比已有的水资源配置评价方法,PPC主要在大样本的情况下使用,对评价样本和指标的数量存在一定的要求,仍具有一定的局限性。

参考文献:

- [1] 左其亭,李可任.最严格水资源管理制度理论体系探讨[J].南水北调与水利科技,2013,11(1):34-38+65.
- [2] 熊雪珍,何新玥,陈星,等.基于改进TOPSIS法的水资源配置方案评价[J].水资源保护,2016,32(2):14-20.
- [3] 孟春红,路振广,马细霞,等.灌区水资源合理配置的模糊物元综合评价[J].人民黄河,2013,35(9):86-88+121.
- [4] 董前进,陈森林,张柳波,等.基于D-S证据理论的水资源合理配置方案综合评价[J].数学的实践与认识,2011,41(23):26-30.
- [5] 吴凤平,贾鹏,张丽娜.基于格序理论的水资源配置方案综合评价[J].资源科学,2013,35(11):2232-2238.
- [6] 余建星,蒋旭光,练继建.水资源优化配置方案综合评价的模糊熵模型[J].水利学报,2009,40(6):729-735.
- [7] ZHANG lina, WU Fengping, PENG Jia. Grey evaluation model based on reformative triangular whitenization weight function and its application in water rights allocation system [J]. The Open Cybernetics & Systemic Journal, 2013, 7(1):1-10.
- [8] 崔东文,郭荣.基于概率神经网络的文山州水资源配置合理性评价分析[J].长江科学院院报,2012,29(10):57-62.
- [9] FRIEDMAN J H, TUKEY J W. A Projection Pursuit Algorithm for Exploratory Data Analysis [J]. IEEE Transactions on Computers, 2006, C-23(9):881-890.
- [10] 李国英.什么是投影寻踪[J].数理统计与管理,1986(4):21-23+36.
- [11] 张欣莉,丁晶,李祚泳,等.投影寻踪新算法在水质评价模型中的应用[J].中国环境科学,2000(2):187-189.
- [12] PAN Xiaoying, JIAO Licheng, LIU Fang. An improved multi-agent genetic algorithm for numerical optimization [J]. Natural Computing, 2011, 10(1):487-506.
- [13] HUANG Hong, LU Jun. Identification of river water pollution characteristics based on projection pursuit and factor analysis [J]. Environmental earth sciences, 2014, 72(9):3409-3417.
- [14] ZHANG Chi, DONG Sihui. A new water quality assessment model based on projection pursuit technique [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(9):S154-S157.
- [15] 梁跃强,林辰,宫伟东,等.投影寻踪聚类方法在煤与瓦斯突出危险性预测中的应用[J].中国安全生产科学技术,2017,13(1):46-50.
- [16] 楼文高,乔龙.投影寻踪分类建模理论的新探索与实证研究[J].数理统计与管理,2015,34(1):47-58.
- [17] 钟伟才.多智能体进化模型和算法研究[D].西安:西安电子科技大学,2004.
- [18] 袁满,刘耀林.基于多智能体遗传算法的土地利用优化配置[J].农业工程学报,2014,30(1):191-199.
- [19] 赵晶.区域水资源配置方案综合评价研究[D].西安:西安理工大学,2009.