

# GSA - PP 模型在区域水资源承载力评价中的应用

饶均辉

(云南省水文水资源局文山分局, 云南 文山 663000)

**摘要:** 为研究引力搜索算法(GSA) - 投影寻踪(PP)模型应用于区域水资源承载力评价中的有效性和可行性。从水资源系统、经济社会系统和水环境系统遴选14个指标构建区域水资源承载力评价指标体系及分级标准,利用GSA算法优化PP模型最佳投影方向,提出GSA - PP水资源承载力评价模型,并构建粒子群优化(PSO)算法、差分进化(DE)算法和布谷鸟搜索(CS)算法优化的PP模型作对比,以文山州8县市水资源承载力评价为例进行实例研究。结果表明:GSA算法连续10次优化PP模型获得的适应度值均为1147.9363,均优于PSO、DE和HS算法,具有较高的求解精度和稳定性能。GSA - PP模型对麻栗坡县、马关县和文山市的评价结果为“可承载”,对其余5县的评价结果为“基本可承载”。GSA - PP模型对实例评价及排序结果与DE - PP模型相同;与PSO - PP、CS - PP模型评价结果相同,但在排序上存在差异。实例验证了智能算法求解精度的高低决定着评价效果的优劣。

**关键词:** 水资源承载力; 指标体系; 投影寻踪; 引力搜索算法; 文山州

中图分类号: TV212

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)06-0095-06

## Application of GSA - PP model in water resources carrying capacity evaluation

RAO Junhui

(Yunnan Province Hydrology Water Resources Bureau Wenshan Branch Bureau, Wenshan 663000, China)

**Abstract:** In order to study the effectiveness and feasibility of the gravitational search algorithm (GSA) - Projection Pursuit (PP) model applying to evaluate the carrying capacity of water resources, the regional water resources carrying capacity evaluation index system and classification standards were constructed by selecting 14 indicators from the water system, economic and social system, and water environmental system, the best projection direction was optimized using GSA algorithm, and the GSA - PP evaluation model for water resources carrying capacity was also proposed, then the PP models established by particle swarm optimization (PSO) algorithm, differential evolution (DE) algorithm and cuckoo search (CS) algorithm optimization were respectively compared with the GSA - PP model, finally the water resources carrying capacity in 8 Wenshan counties was evaluated as case studies. The results showed that the fitness value of 10 consecutive optimizations by GSA algorithm is 1147.9363, they were all better than algorithms of PSO, DE and HS, it has higher solution accuracy and stable performance. The evaluation results of GSA - PP model in Malipo County, Maguan County and Wenshan city were “may carrying capacity”, the evaluation results of the remaining five counties as “basically may carrying capacity”. The evaluated and sorted results of GSA - PP were similar to the DE - PP model; and the evaluation results of GSA - PP were also same as PSO - PP and CS - PP model, but there were differences in the sorted results. Therefore, the solution accuracy of the intelligent algorithm determines the pros and cons of evaluation effects.

**Key words:** water resources carrying capacity; index system; projection pursuit; gravitational search algorithm; Wenshan

水资源承载力是衡量区域水资源支撑经济社会可持续发展能力大小的重要指标。虽然提出时间较

早,但尚未形成普遍认同的评价指标体系与分级标准,原因在于:水资源存在南北方差异,即相对丰富区

域与缺水区域在降水、水资源开发利用等指标值上存在较大差异;经济社会发展存在差距,即沿海经济发达地区与内地经济欠发达地区在用水效率方面存在明显差距;涉及水资源、经济社会等复杂系统。水资源承载力评价涉及水资源、经济社会、水环境等多方因素,属多指标、高维、非线性系统问题,指标的选取难以达成共识。目前,常用于水资源承载力评价的方法有模糊评价法、主成分分析法、神经网络法等<sup>[1-4]</sup>,虽然取得了一定的评价效果,但存在评价精度低、主成分分析降维易造成的指标信息量丢失等不足。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研究的统计方法,在克服维数祸根、解决超高维等问题中具有明显优势,在水资源承载力评价中得到应用<sup>[5-6]</sup>。在实际应用中,PP模型最佳投影方向的合理选取是决定其评价精度的关键所在,目前,除遗传算法<sup>[6]</sup>(Genetic Algorithm, GA)被广泛用于PP模型最佳投影方向 $\vec{a}$ 的选取外,粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法<sup>[7]</sup>、差分进化(Differential Evolution, DE)算法<sup>[8]</sup>等在优化PP模型最佳投影方向上得到了尝试和应用,并取得不错的优化效果。

为进一步拓展智能算法在PP模型最佳投影方向优化上的应用,本文利用引力搜索算法(Gravitational Search Algorithm, GSA)优化PP模型最佳投影方向,提出GSA-PP水资源承载力评价模型,并构建PSO-PP、DE-PP、和布谷鸟搜索(Cuckoo Search, CS)-PP作对比分析模型,从水资源系统、经济社会系统和水环境系统遴选14个指标构建区域水资源承载力评价指标体系,并采用各评价指标均值及标准差构建水资源承载力分级标准,以文山州8县市水资源承载力评价为例进行实例研究,旨在验证GSA-PP模型应用于水资源承载力评价中的可行性和有效性。

## 1 水资源承载力指标体系

近年来,国内外开展水资源承载力评价分析的相关研究较多,但尚未形成普遍认同的指标体系<sup>[5-6,9]</sup>。笔者充分考虑区域水资源特点及经济社会发展状况,遵行科学性、可操作性和可量化的原则,从水资源系统、经济社会系统和水环境系统遴选14个指标构建具有目标层A、准则层B和指标层C的区域水资源承载力评价指标体系,见表1。

表1 区域水资源承载力评价指标体系

目标层 A	准则层 B	指标层 C	表 征
水资源系统	水资源开发利用率 $C_1 / \%$		负向指标,表征在统计期内水资源开发利用程度
	降水量 $C_2 / \text{mm}$		正向指标,表征在统计期内降水量大小
	人均水资源可利用量 $C_3 / \text{m}^3$		正向指标,表征在统计期内人均可利用的水资源量
	水资源密度 $C_4 / 10^4 (\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$		正向指标,表征在统计期内单位面积上的水资源量
	供水量模数 $C_5 / 10^4 (\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$		正向指标,表征在统计期内单位面积上的供水能力
水资源承载力	万元 GDP 用水量 $C_6 / \text{m}^3$		负向指标,表征在统计期内万元 GDP 所用的水资源量
	灌溉水利用系数 $C_7$		正向指标,表征在统计期内灌溉水利用系数的大小
	万元工业增加值用水量 $C_8 / \text{m}^3$		负向指标,表征产生同样的工业增加值所用的水资源量
	工业用水重复利用率 $C_9 / \%$		正向指标,表征在统计期内工业用水重复利用率大小
	城镇人均生活用水量 $C_{10} / (\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$		正向指标,表征在统计期内城镇人口生活的用水水平
水环境系统	农村人均生活用水量 $C_{11} / (\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$		正向指标,表征在统计期内农村人口生活的用水水平
	人均 COD 环境容量 $C_{12} / \text{kg}$		正向指标,表征一个地区在统计期 COD 环境容量水平大小
	人均 $\text{NH}_3\text{-N}$ 环境容量 $C_{13} / \text{kg}$		正向指标,表征一个地区在统计期 $\text{NH}_3\text{-N}$ 环境容量水平大小
	城市污水处理率 $C_{14} / \%$		正向指标,表征一个地区在统计期内城市污水处理水平

注:  $C_1$ 、 $C_6$  和  $C_8$  为负向指标,指标越大,其水资源承载力越小;其余为正向指标,指标越大,其水资源承载力越大。

## 2 GSA-PP 水资源承载力评价模型

### 2.1 投影寻踪模型

PP模型用于水资源承载力评价的简要算法如

下<sup>[10-11]</sup>:

Step1 数据预处理。设样本评价指标集为  $\{x(i, j) \mid i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m\}$ , 对于正向指标利用式(1)进行处理;负向指标取倒后乘 100

后再利用式(1) 进行数据处理。

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

式中:  $x(i, j)$  为指标特征值归一化序列;  $x_{\max}(j)$ 、 $x_{\min}(j)$  分别为第  $j$  个指标值的最大和最小值;  $n$ 、 $m$  分别为样本容量和指标数目。

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。

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:

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

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 引力搜索算法(GSA)

引力搜索算法(GSA)<sup>[12]</sup> 是 Rashedi 等人提出的一种新型启发式优化搜索算法,在解决连续变量函数优化问题时,GSA 算法将优化问题的解视为一组在空间运行的物体,物体之间通过万有引力作用相互吸引,物体运动遵循动力学规律,万有引力的作用使得物体朝着质量最大的物体移动,而质量最大的物体占据最优位置,从而求出优化问题的最优解。GSA 算法步骤可归纳如下<sup>[13-14]</sup>:

(1) 初始化。设在一个  $D$  维搜索空间中包含  $N$  个物体,定义第  $i$  个物体的位置为:

$$X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^k, \dots, x_i^D); i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中:  $x_i^k$  为第  $i$  个物体在第  $k$  维上的位置。

(2) 计算万有引力。定义在  $t$  时刻物体  $j$  对物体  $i$  的引力为:

$$F_{ij}^k(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \cdot M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \chi} (x_j^k(t) - x_i^k(t)) \quad (6)$$

式中:  $M_{pi}(t)$  为被作用物体  $i$  的惯性质量;  $M_{aj}(t)$  为作用物体  $j$  的惯性质量;  $\chi$  为一个常数,防止分母为

0;  $G(t)$  为  $t$  时刻的万有引力常数,其值由宇宙的真实年龄决定的,随着宇宙年龄增大而变小,用式(7) 表示;  $R_{ij}(t)$  表示物体  $i$  和物体  $j$  之间的欧氏距离,用式(8) 表示。

$$G(t) = G_0 \cdot e^{-\alpha t/T} \quad (7)$$

$$R_{ij}(t) = \|X_i(t), X_j(t)\| \quad (8)$$

式中:  $G_0$  为宇宙最初  $t_0$  时刻的万有引力常数,一般取值取 100;  $\alpha$  等于 20;  $T$  为最大迭代次数。

(3) 适应度值更新。在物体运动过程中,需要利用适应度值  $fit_i(t)$  不断对物体惯性质量进行更新:

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - \text{worst}(t)}{\text{best}(t) - \text{worst}(t)} \quad (9)$$

$$M_i(t) = m_i(t) / \sum_{j=1}^N m_j(t) \quad (10)$$

式中:  $m_i(t)$  为中间变量;  $fit_i(t)$  为物体在  $t$  时刻的适应度函数值;  $\text{best}(t)$  和  $\text{worst}(t)$  分别为在  $t$  时刻整个物体群的最优和最差适应度函数值。在求解目标函数最小值时,  $\text{best}(t)$  和  $\text{worst}(t)$  定义如下:

$$\text{best}(t) = \min_{j \in \{1, 2, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (11)$$

$$\text{worst}(t) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (12)$$

(4) 计算合力。设  $t$  时刻在第  $k$  维作用在第  $i$  个物体上的总作用力  $F_i^k(t)$  等于其他所有物体对它的作用力之和,计算公式如下:

$$F_i^k(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \text{rand}_j \cdot F_{ij}^k(t) \quad (13)$$

式中:  $\text{rand}_j \in [0, 1]$  内随机数;  $F_{ij}^k(t)$  为第  $k$  维空间上第  $j$  个物体作用在第  $i$  个物体的引力。

(5) 更新加速度、速度和位置。标准 GSA 算法在  $t$  时刻物体  $i$  在第  $k$  维的加速度、速度和位置更新公式为:

$$\begin{cases} v_i^k(t+1) = \text{rand}_i \cdot v_i^k(t) + \alpha_i^k(t) \\ x_i^k(t+1) = x_i^k(t) + v_i^k(t+1) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\alpha_i^k(t)$  为  $t$  时刻物体  $i$  在第  $k$  维上的加速度,用下式(15) 表示:

$$\alpha_i^k(t) = F_i^k(t) / M_i(t) \quad (15)$$

式中:  $\text{rand}_i \in [0, 1]$  内随机数。

## 2.3 GSA-PP 水资源承载力计算实现步骤

GSA-PP 水资源承载力计算步骤可归纳如下(PSO、DE、CS 算法评价步骤可参考实现):

Step1 构建水资源承载力评价指标体系和分级标准(利用各评价指标均值及标准差构建水资源承载力分级标准),利用公式(1) 进行指标一致性处理。

Step2 确定公式(4) 作为 GSA、PSO、DE 和 CS 算法的优化目标函数,即适应度函数。

Step3 初始化算法参数。设置物体数量  $N$ , 最大迭代次数  $T$ , 万有引力常数  $G_0$  及  $\alpha$  值、 $\chi$  值。

Step4 适应度值计算。利用公式(6)~(8)计算万有引力;利用公式(4)计算适应度函数值,判断算法是否满足终止条件。若满足,则转至 Step 7;否则转到 Step 5。

Step5 GSA 算法寻优。利用公式(9)~(12)进行适应度值更新操作;利用公式(13)计算合力;利用公式(14)~(15)更新加速度、速度和位置。

Step 6 判断算法是否满足终止条件。若满足,则转至 Step 7;否则重复 Step 4~Step 5。

Step7 输出质量最大物体适应度值及所处空间位置,即最佳投影方向  $\vec{a}$ , 算法结束。

Step8 将最佳投影方向  $\vec{a}$ (各用指标权重)代入公式(2)求得各县市水资源承载力综合投影值  $z(i)$  及各分级标准投影值  $z'(s)$ ( $s$  为分级标准级数,本文利用  $z'(s)$  将水资源承载力大小划分为“绝对可承载”、“可承载”、“基本可承载”和“不可承载”4个等级)。

Step9 分别利用  $z(i)$  及  $z'(s)$  对文山州各县市水资源承载力大小排序和等级评价分析。

## 3 实例应用

### 3.1 数据来源

文山州位于云南省东南部,东邻广西,北接曲靖,西与红河州毗邻,南与越南接壤,全州总面积 31 456 km<sup>2</sup>,分属珠江、红河两大流域,多年平均降水量 1 210 mm,径流深 501 mm,水资源总量 157.7 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,占全省水资源总量的 7.1%,属相对丰水

地区,但受季风气候影响,区域降水量和径流量的年际变化大、年内降水高度集中,造成了水旱灾害和水资源供需矛盾十分突出。2015年,全州用水量 9.56 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,所辖部分县市用水量已逼近控制总量上限值,万元工业增加值用水量 70.6 m<sup>3</sup>/万元,渠系有效利用系数 0.522,水功能区达标率为 61.5%(全指标评价)，“三条红线”考核形势不容乐观。且随着文山州经济社会的快速发展、人口增加、城镇化进程加快,水资源供需矛盾日益加剧,水环境污染日趋严峻,水资源支撑经济社会可持续发展的要求越来越迫切。因此,科学客观评价区域水资源承载力,对于实现水资源可持续利用,实行最严格水资源管理制度,推进全面建成小康社会和水生态文明建设具有重要意义。

文山州 8 个县市水资源承载力评价指标值见表 2。利用表 2 中  $C_1 \sim C_{14}$  的平均值  $\bar{C}$  及标准差  $\sigma$  构建水资源承载力评价分级标准,即“Ⅰ级绝对可承载  $\in [\bar{C} + 2\sigma, \infty]$ ”、“Ⅱ级可承载  $\in [\bar{C}, \bar{C} + 2\sigma]$ ”、“Ⅲ级基本可承载  $\in [\bar{C} - 2\sigma, \bar{C}]$ ”和“Ⅳ级不可承载  $\in [0, \bar{C} - 2\sigma]$ ”。

### 3.2 水资源承载力评价模型求解及评价结果分析

3.2.1 算法参数设置 GSA 算法最大迭代次数  $T = 100$ ,种群规模  $N = 100$ ,万有引力常数  $G_0 = 100$ ,  $\alpha = 20$ ,  $\chi = 10^{-8}$ 。PSO 算法最大迭代次数  $T = 100$ ,种群规模  $N = 100$ , $\omega = 0.729$ ,局部学习因子、全局学习因子  $c_1 = c_2 = 2.0$ ,个体速度限制为  $[-0.5, 0.5]$ 。DE 算法最大迭代次数  $T = 100$ ,种群规模  $N =$

表 2 云南省区域水资源承载力评价指标数据<sup>[15]</sup>

区域	$C_1 /$ %	$C_2 /$ mm	$C_3 /$ m <sup>3</sup>	$C_4 /$ 10 <sup>4</sup> (m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	$C_5 /$ 10 <sup>4</sup> (m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	$C_6 /$ m <sup>3</sup>	$C_7$	$C_8 /$ m <sup>3</sup>	$C_9 /$ %	$C_{10} /$ (L·d <sup>-1</sup> )	$C_{11} /$ (L·d <sup>-1</sup> )	$C_{12} /$ kg	$C_{13} /$ kg	$C_{14} /$ %
文山州	6.0	1363.3	1407.6	50.1	3.09	144.8	0.52	70.6	75.0	103.2	64.0	1.1602	0.1287	78.0
文山市	12.0	1168.5	971.5	44.0	4.75	77.0	0.53	70.0	93.8	109.4	61.0	1.2040	0.0571	88.7
砚山县	11.4	1111.8	923.4	31.4	3.63	131.3	0.53	71.0	88.2	106.4	59.0	0.1433	0.0387	60.6
西畴县	5.7	1405.5	1728.9	59.0	3.25	165.2	0.51	74.5	68.2	101.3	59.1	5.5225	0.6148	41.9
麻栗坡县	5.1	1440.5	1623.3	74.0	3.85	157.7	0.51	69.0	61.5	101.3	69.9	11.3862	0.8186	91.7
马关县	3.9	1539.8	1486.9	83.1	3.62	137.1	0.52	71.0	65.2	98.0	72.7	4.4510	0.5317	75.8
丘北县	5.8	1316.8	1355.9	43.7	2.52	201.7	0.53	72.0	59.1	109.8	70.0	4.1176	0.2301	50.0
广南县	4.9	1400.9	2052.1	46.8	2.23	175.8	0.52	75.0	57.7	99.2	58.8	3.9878	0.6214	92.5
富宁县	5.4	1512.0	1437.1	52.2	2.63	204.5	0.51	76.0	55.6	95.0	65.0	3.9389	0.3576	82.8
$\bar{C} + 2\sigma$	14.7	1090.7	780.2	23.5	1.82	425.0	0.50	76.9	43.6	93.0	54.2	0.8659	0.1119	38.6
$\bar{C}$	5.9	1362.1	1443.0	53.8	3.29	143.5	0.52	72.0	69.4	102.6	64.4	3.9902	0.3511	70.1
$\bar{C} - 2\sigma$	3.7	1633.5	2105.8	84.1	4.76	86.3	0.54	67.8	95.2	112.2	74.6	7.1145	0.6433	108.6

100,上下限的尺度因子分别为 0.8、0.2,交叉率  $CR = 0.2$ 。CS 算法最大迭代次数  $T = 100$ ,鸟窝位置数  $N = 25$ 、发现概率  $p_a = 0.25$ 。

3.2.2 模型求解 依据 GSA-PP 水资源承载力评价模型优化步骤(其他 3 种算法优化步骤可参考实现),采用公式(1)对表 2 中各县市用水指标按正向指标进行一致性处理,利用处理后的指标数据构造投影指标函数,并运用 GSA、PSO、DE 和 CS 算法求解 PP 模型最佳投影方向。将 4 种模型连续运行 5

次,计算出最佳投影方向  $\vec{a}$ 、适应度值  $Q(a)$  的取值范围,见表 3;利用 5 次最佳投影方向  $\vec{a}$  均值计算水资源承载力评价分级标准  $z'(s)$ ,见表 4;各县市综合投影值  $z(i)$  (5 次平均) 及排序、评价结果见表 5;4 种算法进化过程见图 1(为了便于观察,图 1 为纵坐标轴 [1145, 1148] 上的截图)。

依据 PP 模型优化原理,适应度值越大,表示其所对应的 PP 模型投影方向越佳;投影值越大,表示水资源承载力水平越高。

表 3 各种算法 PP 模型优化结果

优化结果	SLC-PP 模型	PSO-PP 模型	DE-PP 模型	CS-PP 模型
$a_1$	0.2970 ~ 0.2970	0.2126 ~ 0.3093	0.2837 ~ 0.3023	0.2854 ~ 0.3014
$a_2$	0.2921 ~ 0.2921	0.2725 ~ 0.3661	0.2882 ~ 0.2985	0.2799 ~ 0.3033
$a_3$	0.2754 ~ 0.2754	0.2189 ~ 0.2901	0.2752 ~ 0.2811	0.2679 ~ 0.2907
$a_4$	0.3189 ~ 0.3189	0.3243 ~ 0.3390	0.3163 ~ 0.3208	0.2921 ~ 0.3160
$a_5$	0.2801 ~ 0.2801	0.2061 ~ 0.3337	0.2806 ~ 0.2944	0.2802 ~ 0.2921
$a_6$	0.2264 ~ 0.2264	0.2062 ~ 0.2591	0.2082 ~ 0.2393	0.2131 ~ 0.2388
最佳投影方向 $\vec{a}$	$a_7$ 0.2338 ~ 0.2338	$a_8$ 0.2204 ~ 0.4042	$a_9$ 0.2209 ~ 0.2426	$a_{10}$ 0.2185 ~ 0.2437
	$a_{11}$ 0.2909 ~ 0.2909	$a_{12}$ 0.2180 ~ 0.3019	$a_{13}$ 0.2854 ~ 0.3043	$a_{14}$ 0.2850 ~ 0.3045
	$a_{15}$ 0.2355 ~ 0.2355	$a_{16}$ 0.2125 ~ 0.2531	$a_{17}$ 0.2316 ~ 0.2415	$a_{18}$ 0.2403 ~ 0.2460
	$a_{19}$ 0.2357 ~ 0.2357	$a_{20}$ 0.2112 ~ 0.2634	$a_{21}$ 0.2247 ~ 0.2379	$a_{22}$ 0.2229 ~ 0.2484
	$a_{23}$ 0.3040 ~ 0.3040	$a_{24}$ 0.1820 ~ 0.3255	$a_{25}$ 0.2930 ~ 0.3085	$a_{26}$ 0.2883 ~ 0.3049
	$a_{27}$ 0.1989 ~ 0.1989	$a_{28}$ 0.1275 ~ 0.2008	$a_{29}$ 0.1964 ~ 0.2012	$a_{30}$ 0.1905 ~ 0.2041
	$a_{31}$ 0.2366 ~ 0.2366	$a_{32}$ 0.2001 ~ 0.2835	$a_{33}$ 0.2312 ~ 0.2389	$a_{34}$ 0.2208 ~ 0.2570
	$a_{35}$ 0.2844 ~ 0.2844	$a_{36}$ 0.2522 ~ 0.3689	$a_{37}$ 0.2797 ~ 0.2983	$a_{38}$ 0.2753 ~ 0.3040
适应度值 $Q(a)$ 5 次均值	1147.9363 ~ 1147.9363	1147.2825 ~ 1147.5882	1147.6737 ~ 1147.8793	1146.9920 ~ 1147.3105

表 4 各评价模型评价等级划分结果

评价等级	GSA-PP 模型	PSO-PP 模型	DE-PP 模型	CS-PP 模型
不可承载	$\leq 0.3990$	$\leq 0.3937$	$\leq 0.3985$	$\leq 0.3845$
基本可承载	(0.3990, 1.7871]	(0.3937, 1.7672]	(0.3985, 1.7862]	(0.3845, 1.7223]
可承载	(1.7871, 3.2119]	(1.7672, 3.1800]	(1.7862, 3.2105]	(1.7223, 3.0909]
绝对可承载	$> 3.2119$	$> 3.1800$	$> 3.2105$	$> 3.0909$

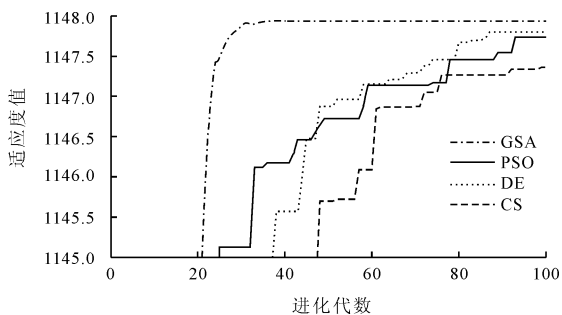


图 1 4 种算法模型求解进化过程图

3.2.3 结果分析 从表 3~5 及图 1 可以得到以下结论:

(1)从表 3 及图 1 来看,GSA 算法 5 次优化 PP 模型所获得的适应度值  $Q(a)$  均为 1147.9363,5 次  $\vec{a}_{GSA}$  均为 (0.2970 0.2921 0.2754 0.3189 0.2801 0.2264 0.2338 0.2909 0.2355 0.2357 0.3040 0.1989 0.2366 0.2844),优化效果均优于 PSO、DE 和 CS 3 种算法,表明 GSA 算法具有较好的求解精度和算法稳定性。4 种算法优化效果由优劣依次

是 GSA、DE、PSO 和 CS 算法。

(2)从表 5 GSA - PP 模型评价及排序结果来看,仅麻栗坡县、马关县和文山市的投影值高于全州投影值 1.7391,评价结果为“可承载”,表明麻栗坡县、马关县和文山市的水资源承载力高于全州平均水平。从表 2 来看,麻栗坡县在水资源系统、水环境系统指标上表现较好;马关县在水资源系统和社会经济系统指标上表现优良;而文山市为文山州经济、

政治、文化中心,水资源利用效率较高,其在全州经济系统指标上表现突出。其余 5 县的投影值均低于全州 1.7391,评价结果为“基本可承载”,主要在经济社会系统和水环境系统指标方面表现较差。全州各县市水资源承载力均未达到“绝对可承载”水平,“十三五”期间,通过推进节水型社会建设、实施最严格水资源管理、提高用水效率等措施,水资源承载力还有进一步提升的空间。

表 5 各县市水资源承载力投影值及评价、排序结果

区域	GSA - PP 模型			PSO - PP 模型			DE - PP 模型			CS - PP 模型		
	投影值 $z(i)$	排序 结果	评价 结果	投影值 $z(i)$	排序 结果	评价 结果	投影值 $z(i)$	排序 结果	评价 结果	投影值 $z(i)$	排序 结果	评价 结果
文山州	1.7391		Ⅲ级	1.7237		Ⅲ级	1.7388		Ⅲ级	1.6631		Ⅲ级
文山市	1.8622	3	Ⅱ级	1.8698	3	Ⅱ级	1.8634	3	Ⅱ级	1.7810	3	Ⅱ级
砚山县	1.3945	8	Ⅲ级	1.3957	8	Ⅲ级	1.3949	8	Ⅲ级	1.3404	8	Ⅲ级
西畴县	1.6706	6	Ⅲ级	1.6446	5	Ⅲ级	1.6700	6	Ⅲ级	1.6367	5	Ⅲ级
麻栗坡县	2.3458	1	Ⅱ级	2.2975	1	Ⅱ级	2.3457	1	Ⅱ级	2.2318	1	Ⅱ级
马关县	2.2615	2	Ⅱ级	2.2240	2	Ⅱ级	2.2602	2	Ⅱ级	2.1722	2	Ⅱ级
丘北县	1.6762	5	Ⅲ级	1.6439	6	Ⅲ级	1.6720	5	Ⅲ级	1.6335	6	Ⅲ级
广南县	1.7362	4	Ⅲ级	1.7316	4	Ⅲ级	1.7336	4	Ⅲ级	1.6722	4	Ⅲ级
富宁县	1.5582	7	Ⅲ级	1.5463	7	Ⅲ级	1.5570	7	Ⅲ级	1.5035	7	Ⅲ级

注:PSO - PP、DE - PP、CS - PP 投影值由最佳投影方向 5 次均值计算而来。

(3)从最佳投影方向  $\vec{a}_{GSA}$  来看,水资源密度、农村人均生活用水量、水资源开发利用、降水量、万元工业增加值用水量、城镇污水处理率、供水量模数、人均水资源可利用量的投影分量相对较大,其对水资源承载力评价的影响也最大;其余指标的投影分量在 0.1989 ~ 0.2366 之间,其对水资源承载力评价的影响相对较小。

(4)从 4 种模型评价及排序结果来看,GSA - PP 模型与 DE - PP 模型对 8 个县市水资源承载力评价结果与排序结果均相同;与 PSO - PP、CS - PP 模型评价结果相同,但在排序上存在差异。实例验证了智能算法极值寻优能力的强弱决定着评价精度的高低,影响着评价结果及效果。

## 4 结 论

本文从水资源系统、经济社会系统、水环境系统遴选 14 个指标构建区域水资源承载力评价指标体系,并利用各评价指标均值及标准差构建水资源承载力评价分级标准。基于 PP 模型及 GSA 基本原理,提出 GSA - PP 水资源承载力评价模型,并构建 PSO - PP、DE - PP 和 CS - PP 模型作为对比分析模

型。结果表明:

(1)GSA 算法具有较好的求解精度和算法稳定性,利用 GSA 算法搜寻 PP 模型最佳投影方向,可有效提高 PP 模型的评价精度。

(2)GSA - PP 模型对麻栗坡县、马关县和文山市的评价结果为“可承载”,对其余 5 县的评价结果为“基本可承载”。GSA - PP 模型对实例评价及排序结果与 DE - PP 模型相同;与 PSO - PP、CS - PP 模型评价结果相同,但在排序上存在差异。

(3)本文通过实例验证了 GSA - PP 模型应用于区域水资源承载力评价中的有效性和可行性,且通过验证表明智能算法极值寻优能力的强弱决定着评价精度的高低。

## 参考文献:

- [1] 周念清,杨 硕,朱 勃,等. 承载指数与模糊识别评价许昌市水资源承载力[J]. 水资源保护,2014,30(6):31 - 34.
- [2] 雷艳娇,葛 强. 云南省地市(州)水资源承载力模糊综合评判[J]. 人民珠江,2016,37(4):21 - 24.
- [3] 童纪新,顾 希. 基于主成分分析的南京市水资源承载力研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(1):122 - 125.

(下转第 107 页)

- sludges and their effect on organics removal in wastewater treatment[J]. *Water Research*,2011,45(2):819-827.
- [15] Marques RRN, Font J, Fortuny A, et al. Performance of sludge based activated carbons in catalytic wet air oxidation of phenol[J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*,2010,8(1):47-54.
- [16] 黄利华. 剩余污泥制备活性炭及其应用研究[J]. *环境工程学报*,2008,2(11):1555-1559.
- [17] 马国斌. 负载  $MnO_2$  改性活性炭工艺对甲醛吸附去除的效能[J]. *净水技术*,2015,34(2):32-36.
- [18] Raij BV, Peech M. Electrochemical properties of some Oxisols and Alfisols of the tropics[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1972,36(4):587-593.
- [19] Bader H, Hoigné J. Determination of ozone in water by the indigo method[J]. *Water Research*,1981,15(4):449-456.
- [20] Rivera-Utrilla J, Sánchez-Polo M. Ozonation of 1,3,6-naphthalenetrisulphonic acid catalysed by activated carbon in aqueous phase[J]. *Applied Catalysis B Environmental*,2002,39(4):319-329.
- [21] 国伟林,姬广磊,王西奎. 载锰活性炭对甲基紫染料微波降解作用研究[J]. *济南大学学报(自然科学版)*,2004,18(4):373-373.
- [22] 石锐,张华,童少平,等. 臭氧及催化臭氧氧化降解 2,4-滴丙酸动力学研究[J]. *环境科学学报*,2009,29(8):1701-1706.
- [23] 尚会建,周艳丽,赵彦,等. 活性炭催化臭氧氧化处理低浓度氨氮废水[J]. *化工环保*,2012,32(5):405-408.
- [24] Huang W J, Cheng Y L. Effect of characteristics of activated carbon on removal of bromate[J]. *Separation and Purification Technology*,2008,59(1):101-107.
- [25] Li Laisheng, Ye Weiyang, Zhang Qiuyun, et al. Catalytic ozonation of dimethyl phthalate over cerium supported on activated carbon[J]. *Journal of Hazardous Materials*,2009,170(1):411-416.
- [26] Huang Ruihuan, Lan Bingyan, Chen Zhongying, et al. Catalytic ozonation of p-chlorobenzoic acid over MCM-41 and Fe loaded MCM-41[J]. *Chemical Engineering Journal*,2012,180:19-24.
- [27] Kasprzyk-Hordern B, Ziólek M, Nawrocki J. Catalytic ozonation and methods of enhancing molecular ozone reactions in water treatment[J]. *Applied Catalysis B Environmental*,2003,46(4):639-669.
- [28] Ren Yueming, Dong Qing, Feng Jing, et al. Magnetic porous ferrosin NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: a novel ozonation catalyst with strong catalytic property for degradation of di-n-butyl phthalate and convenient separation from water[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*,2012,382(1):90-96.
- [29] Alvarez PM, García-Araya JF, Beltrán FJ, et al. The influence of various factors on aqueous ozone decomposition by granular activated carbons and the development of a mechanistic approach[J]. *Carbon*,2006,44(14):3102-3112.
- [30] Guzman-Perez C A, Soltan J, Robertson J. Kinetics of catalytic ozonation of atrazine in the presence of activated carbon[J]. *Separation and Purification Technology*,2011,79(1):8-14.

(上接第100页)

- [4] 郭晓英,陈兴伟,陈莹,等. 基于粗糙集和BP神经网络组合法的水资源承载力动态变化分析[J]. *南水北调与水利科技*,2015,13(2):236-240.
- [5] 彭忠福,马学明,刘雁翼. 江西省水资源承载力评价研究[J]. *人民长江*,2011,42(18):73-76.
- [6] 王淑娟. 基于投影寻踪模型和加速遗传算法的石羊河流域水资源承载力综合评价[J]. *地下水*,2009,31(6):82-84.
- [7] 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.
- [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] 姜秋香,董鹤,付强,等. 基于SD模型的城市水资源承载力动态仿真——以佳木斯市为例[J]. *南水北调与水利科技*,2015,13(5):827-831.
- [10] 刀海娅,孙艳. 萤火虫算法-投影寻踪模型在云南省洪灾评估中的应用[J]. *水利经济*,2015,33(6):22-25.
- [11] 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.
- [12] Rashedi E, Nezamabadi-Pour H, Saryazdi S. GSA: a gravitational search algorithm[J]. *Intelligent Information Management*,2012,4(6):390-395.
- [13] 张维平,任雪飞,李国强,等. 改进的万有引力搜索算法在函数优化中的应用[J]. *计算机应用*,2013,33(5):1317-1320.
- [14] 刘勇,马良. 非线性极大极小问题的混沌万有引力搜索算法求解[J]. *计算机应用研究*,2012,29(1):47-49.
- [15] 2015年文山州水资源公报[R]. 云南:文山州水务局,2015.