DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.06.11

节水型社会建设区域类型综合评价的CKGSA-PP模型及应用

程 刚，陈金红
（云南省水利水电勘测设计研究院，云南 昆明 650021）

摘　要：为科学评价云南省16个州市节水型社会建设类型，建立混沌引力搜索算法（CKGSA）-投影寻踪（PP）评价模型。从水资源条件、经济社会条件和节水潜力条件3个方面分别构建指标体系和分级标准，在各分级标准阈值间，采用随机内插的方法生成样本构建基于水资源条件、经济社会条件和节水潜力条件的投影指标函数，采用CKGSA分别搜索最优投影向量并计算各州市综合投影值以及各分级标准阈值投影值，利用分级标准阈值投影值进行各区域节水型社会建设类型综合评价。结果表明：昆明市节水类型评价为"极度缺水-发达-潜力较小"型；玉溪市评价为"严重缺水-较发达-潜力较大"型；楚雄州评价为"严重缺水-中度发达-潜力适中"型；怒江州评价为"富水-欠发达-潜力巨大"型；普洱市、德宏州、迪庆州评价为"轻度缺水-中度发达-潜力较大"型；红河州、大理州评价为"严重缺水-中度发达-潜力较大"型；其他州市评价为"中度缺水-中度发达-潜力较大"型。评价结果可为云南省分区域开展节水型社会建设提供参考。

关键词：节水型社会；区域类型；指标体系；混沌引力搜索算法；投影寻踪；云南省
中图分类号：TV213.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-643X(2017)06-0062-07

CKGSA-PP model and application of comprehensive evaluation of regional types of water saving society construction

CHENG Gang, CHEN Jinhong
(*Yunnan Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute*, *Kunming* 650021, *China*)

Abstract: In this paper, a chaotic gravitational search algorithm (CKGSA) - Projection Pursuit (PP) evaluation model is proposed to scientifically evaluate the construction types of water-saving society in 16 states in Yunnan Province. The index system and grading standard were constructed from the three aspects of water resources, economic and social conditions and water saving potential conditions. The random interpolation method was used to generate samples to build projection index function based on water resources, economic and social conditions and water saving conditions. The optimal projection vector is searched by CKGSA and the comprehensive projection value of each state is calculated, and the threshold projection value of each grading standard is calculated. The comprehensive evaluation of water saving society construction type is carried out by using the graded standard threshold projection value. The results show that the water-saving type evaluation in Kunming is "extremely poor water-developed-less potential" type. Yuxi city evaluated as "severe water shortage-more developed-potential" type. Chuxiong state as "severe water shortage-Moderate development-moderate potential "type. Nujiang state evaluated as" rich water-underdevelopment-great potential "type. Pu'er City, Dehong, Diqing state as" relatively deficient water-moderate development-great potential "Red River, Dali state as" serious shortage of water-moderate development-large potential "type; other state assessed as " moderate water shortage-moderate development-great potential "type. The evaluation results can provide reference for the construction of water-saving society in sub-region of Yunnan Province.

收稿日期：2017-05-20；　**修回日期**：2017-07-10
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(2015IC013)
作者简介：程 刚(1982-)，男，云南玉溪人，学士，工程师，主要从事水利建设与水资源规划工作。

Key words：water-saving society；area type；index system；chaotic gravitational search algorithm；projection pursuit；Yunnan Province

开展节水型社会建设是推进生态文明建设、完善最严格水资源管理制度、落实水污染防治工作的重要内容，同时也是践行习总书记“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”新时期治水方针的重要举措。然而，开展节水型社会建设的各区域间在水资源禀赋、经济社会发展水平、节水潜力大小等方面存在较大差异，采用同一节水方略难以体现国家节水型社会建设规划中提出的“因地制宜、适水发展”的基本原则，也难以达到节水型社会建设的最终目标[1]。因此，研究节水型社会建设区域类型综合评价对于“因地制宜、因域施策”地开展节水型社会建设具有重要意义。目前，国内研究节水型社会建设区域类型评价或划分的文献不多，且多偏重于体系构建和理论研究[2－6]，对于评价方法探讨的文献寥寥。由于节水型社会建设区域类型综合评价涉及水资源、经济社会、节水潜力等方面，属多维、非线性系统评价问题，本文选用对高维、非线性典型问题具有较好处理能力的方法——投影寻踪（projection pursuit，PP）技术对云南省 16 个州市节水型社会建设区域类型进行综合评价和分析。

PP 技术是通过数学方法将高维数据投影到低维空间，在低维空间进行数据分析以获取评价指标最优空间投影向量，并通过投影向量计算评价对象的综合投影值来完成评价分析的，目前已在水资源承载力评价[7]、洪害评估[8]、水资源利用效率[9]、水污染物分配[10]等方面得到应用。PP 技术评价过程中，最优投影向量的科学确定是客观评价节水型社会建设区域类型的关键所在。

目前，由于遗传算法、粒子群优化算法等传统智能算法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。鉴于此，本文利用混沌引力搜索算法（Chaotic Kbest Gravitational Search Algorithm，CKGSA）优化 PP 技术最佳投影向量，建立 CKGSA－PP 节水型社会建设区域类型评价模型，并从水资源条件、经济社会条件和节水潜力条件 3 个方面构建节水型社会建设区域类型分类评价指标体系和分级标准，利用 CKGSA－PP 模型对云南省 16 个州市节水型社会建设区域类型进行分类评价，旨在为云南省分区域开展节水型社会建设提供借鉴，同时验证 CKGSA－PP 模型用于节水型社会建设区域类型评价的可行性。

1　评价指标体系及分级标准

根据不同区域水资源禀赋、经济社会发展水平、节水潜力大小、产业结构和用水水平等“因地制宜”、“因域施策”确定节水目标、方向和重点任务是最终实现节水型社会建设的关键。本文以云南省 16 个州市节水型社会建设区域类型评价为例，在充分考虑各区域水资源禀赋、经济社会发展水平和节水潜力大小 3 个方面的条件下，参考文献[1－6]，从水资源条件筛选出水资源开发利用率、降水量等 5 个指标，从经济社会条件筛选出人均 GDP、城镇化率等 5 个指标，从节水潜力条件筛选出供水管网漏损率、城镇污水处理率等 5 个指标，分别构建节水型社会建设区域类型分类评价指标体系和分级标准，并综合考虑云南省现阶段性水资源、经济社会、节水水平现状等因素，拟定现状条件下节水型社会建设区域类型分类评价指标在各分级的范围，并依据云南省各州市及分级阈值的最优值、最劣值上下浮动 20% 确定各指标上下限值，对于 W_5 等百分比指标以“100”作为其上限值。指标类型及指标分级划分标准见表 1。

2　CKGSA－PP 评价模型

2.1　引力搜索算法

在引力搜索算法（GSA）中，对于连续优化问题，粒子群（空间物体）通过万有引力作用相互吸引，相互之间的作用力使粒子（物体）朝着质量最大的粒子（物体）方向移动，质量最大粒子（物体）空间位置就是待优化问题的最优解[11－12]。

GSA 主要步骤如下[11－14]：

（1）定义 N 个粒子在 D 维搜索空间中第 i 个物体（粒子）的位置为：

$$X_i = (x_i^1, x_i^2, \cdots, x_i^k, \cdots, x_i^n) \quad i = 1,2,\cdots,N \tag{1}$$

式中：x_i^k 为第 i 个物体在第 k 维上的空间位置。

（2）定义第 t 次迭代第 k 维作用在第 i 个粒子上的总作用力 $F_i^k(t)$ 和第 t 次迭代粒子 $K_{best}(t)$ 的数量（$K_{best} \in N$）如下：

$$F_i^k(t) = \sum_{j=1,j\neq i}^{K_{best}} rand_j \times F_{ij}^k(t) \tag{2}$$

$$K_{best}(t) = final\_per + (\frac{1-t}{T}) \times (100 - final\_$$

$per)$ (3)

式中：$ran_j \in [0,1]$ 内随机数；$F_{ij}^k(t)$ 为第 k 维空间上第 j 个粒子作用在第 i 个粒子的引力；$final\_per$ 为对其他粒子施加作用力的粒子占粒子群数量的百分数；T 为最大迭代次数。

（3）定义第 t 次迭代粒子 j 对粒子 i 的引力为：

$$F_{ij}^k(t) = G(t)\frac{M_{pi}(t)\times M_{ai}(t)}{R_{ij}(t)+\varepsilon}(x_j^k(t)-x_i^k(t)) \quad (4)$$

式中：$M_{pi}(t)$ 为被作用粒子 i 的惯性质量；$M_{ai}(t)$ 为作用粒子 j 的惯性质量；ε 为一个较小常数；$G(t)$ 为万有引力常数，用式(5) 表示；$R_{ij}(t)$ 为粒子 i 和粒子 j 之间的欧氏距离，用式(6) 表示。

$$G(t) = G_0 \times e^{-\alpha t/T} \quad (5)$$

$$R_{ij}(t) = \| X_i(t), X_j(t) \| \quad (6)$$

式中：G_0 为宇宙最初万有引力常数，一般值取 100；α 取 20。

表 1 节水型社会建设区域类型分类评价指标体系及分级标准

水资源条件 W	类型	指标上下限	富水	轻度缺水	中度缺水	严重缺水	极度缺水
水资源利用率 W_1 /%	负向	[0.9,44.5]	<5	[5,10)	[10,20)	[20,30)	≥30
降水量 W_2 /mm	正向	[480,2126]	≥1200	[1000,1200)	[800,1000)	[600,800)	<600
人均水资源量 W_3 /m^3	正向	[600,32260]	≥6000	[4000,6000)	[2000,4000)	[1000,2000)	<1000
人均供水量 W_4 /m^3	正向	[133,1500]	≥1200	[800,1200)	[400,800)	[200,400)	<200
水功能区达标率 W_5/ %	正向	[12,100]	≥90	[80,90)	[70,80)	[60,70)	<60
经济社会条件 E	类型	指标上下限	发达	较发达	中度发度	欠发达	贫困
人均 GDP E_1 /万元	正向	[0.8,6.75]	≥5.0	[3.5,5.0)	[2.0,3.5)	[1.0,2.0)	<1.0
城镇化率 E_2 /%	正向	[16,83]	≥60	[45,60)	[30,45)	[20,30)	<20
人口密度 E_3 (人/km^2)	正向	[14,370]	≥300	[200,300)	[100,200)	[50,100)	<50
人均纯收入 E_5 /万元	正向	[0.35,1.25]	≥0.9	[0.75,0.9)	[0.60,0.75)	[0.45,0.60)	<0.45
第三产业比重 E_5 /%	正向	[20,72]	≥60	[50,60)	[35,50)	[25,35)	<25
节水潜力条件 P	类型	指标上下限	潜力巨大	潜力较大	潜力适中	潜力较小	潜力很小
供水管网漏损率 P_1/ %	正向	[4,36]	≥30	[20,30)	[10,20)	[5,10)	<5
城镇污水处理率 P_2/ %	负向	[30,100]	<60	[60,70)	[70,80)	[80,90)	≥90
工业用水重复利用率 P_3/ %	负向	[30,100]	<65	[65,75)	[75,85)	[85,95)	≥95
农业节水灌溉率 P_4/ %	负向	[4.5,60]	<20	[20,30)	[30,40)	[40,50)	≥50
再生水利用率 P_5/ %	负向	[0,70]	<10	[10,20)	[20,30)	[30,40)	≥40

（4）定义第 t 次迭代粒子质量计算公式及求解目标函数极大值时的 $best(t)$ 和 $worst(t)$，见式(7)～(10)：

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (7)$$

$$M_i(t) = m_i(t) \Big/ \sum_{j=1}^{N} m_j(t) \quad (8)$$

$$best(t) = \max_{j\in\{1,2,\cdots,N\}} fit_j(t) \quad (9)$$

$$worst(t) = \min_{j\in\{1,2,\cdots,N\}} fit_j(t) \quad (10)$$

式中：$m_i(t)$ 为中间变量；$fit_i(t)$ 为粒子第 t 次迭代的适应度值；$best(t)$ 和 $worst(t)$ 分别表示第 t 次迭代时整个粒子群的最优和最差适应度值。

（5）定义第 $t+1$ 次迭代粒子 i 在第 k 维的加速度和速度、位置更新公式：

$$\alpha_i^k(t) = F_i^k(t)/M_i(t) \quad (11)$$

$$\begin{cases} v_i^k(t+1) = rand_i \times v_i^k(t) + \alpha_i^k(t) \\ x_i^k(t+1) = x_i^k(t) + v_i^k(t+1) \end{cases} \quad (12)$$

式中：$\alpha_i^k(t)$ 为第 t 次迭代体 i 在第 k 维上的加速度；$rand_i \in [0,1]$ 内随机数。

2.2 混沌 K_{best} 引力搜索算法（CKGSA）

相关研究表明[15]，在智能算法中引入混沌优化机制，利用混沌运动的非线性、遍历性和发散性可以有效改进智能算法的优化性能。本文参考文献[13]，利用 Logistic 映射计算 $K_{best}(t)$ 值，以提高 CSA 的优化性能。

$$z(t+1) = \mu \times z(t) \times (1 - z(t)) \quad (13)$$

$$K_{best}(t) = final\_per \times z(t) + (\frac{T-t}{T}) \times (N - final\_per) \quad (14)$$

式中：$z(t) \in [0,1]$ 为第 t 次迭代的混沌变量；μ 为

控制参数,μ = 4 时系统完全处于混沌状态,有利于 CSA 跳出局部最优。

2.3　投影寻踪模型

PP 技术简要算法如下[7-10,16]:

(1) 数据预处理。对于正向、负向指标,分别采用式(15)、式(16) 进行处理。

$$x(i,j) = (x(i,j) - x_{\min}(j))/(x_{\max}(j) - x_{\min}(j)) \tag{15}$$

$$x(i,j) = (x_{\max}(j) - x(i,j))/(x_{\max}(j) - x_{\min}(j)) \tag{16}$$

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:

$$z(i) = \sum_{j=1}^{m} a(j)x(i,j) \tag{17}$$

式中: a 为单位长度向量。

(3) 模型求解。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:

$$\begin{cases} \max: Q(a) = S_z D_z \\ s.t: \sum_{j=1}^{m} a^2(j) = 1 \quad a \in [-1,1] \end{cases} \tag{18}$$

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[7 - 10]。

2.4　CKGSA - PP 模型评价实现步骤

Step1 依据表 1,在评价指标标准阈值间随机生成 10 组数据样本,共随机生成 50 组数据样本,利用式(15)、式(16)对样本进行一致性处理。

Step2 利用一致性处理后的样本分别构建基于水资源条件、经济社会条件、节水潜力条件的投影指标函数 $Q_W(a)$、$Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$。利用 CKGSA 对 $Q_W(a)$、$Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$ 投影向量进行优化求解。

Step3 设置粒子(物体)数量 N,最大迭代次数 T,万有引力常数 G_0、α 值、$final\_per$ 和混沌控制参数 μ 。

Step4 利用公式(4) ~ (6)计算引力;分别计算 $Q_W(a)$、$Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$ 适应度值,判断算法是否达到最大迭代次数,若满足,则转至 Step8;否则转到 Step5。

Step5 利用公式(2)计算总作用力;利用式(11) ~ (12)更新粒子的加速度、速度和位置;利用式(7) ~ 式(10)进行适应度值更新操作。

Step6 利用公式(13) ~ (14)计算 K_{best} 值。

Step 7 计算 $Q_W(a)$、$W_E(a)$ 和 $Q_P(a)$ 适应度值,判断算法是否达到最大迭代次数,若是,输出质量最大粒子适应度值及所处空间位置,算法结束;否则重复 Step4 ~ Step7。

Step8 分别输出质量最大的粒子适应度值及所处空间位置,即最佳投影向量 a_W、a_E、a_P 。

Step9 利用公式(15)、(16)对云南省各州市指标数据及分级标准阈值进行一致性处理,利用最佳投影向量 a_W、a_E、a_P 分别计算各州市综合投影值 $z_W(i)$、$z_E(i)$、$z_P(i)$ 及各分级标准阈值投影值 $z_W(k)$、$z_E(k)$、$z_P(k)$(k = 5,为各评价分级数),并利用 $z_W(k)$、$z_E(k)$、$z_P(k)$ 对各州市节水型社会建设区域类型进行分类评价。

3　应用实例

3.1　研究区概况与数据来源

云南省地处祖国西南边陲,辖昆明、曲靖、玉溪等 16 个州(市)129 县(区、市),国土面积 39×10^4 km^2,分属长江、珠江、红河、澜沧江、怒江、伊洛瓦底江 6 大水系,多年平均降水量 1 279 mm,水资源总量 $2\ 210 \times 10^8$ m^3,居全国第三位。境内 94% 的国土面积为山区和高原,6% 的坝区集中了近 70% 的人口和 30% 的耕地,全省面临地形地貌复杂、水土资源不匹配、降水时空分布不均以及区域间经济社会发展不平衡、节水水平差异明显等问题和挑战。开展 16 个州市节水型社会建设区域类型综合评价对于云南省"因地制宜、因域施策"地推进节水型社会建设具有重要意义。本文研究数据来源于《2015 年云南省水资源公报》、《2015 年云南省统计年鉴》等。指标数据见表 2。

3.2　模型求解及算法验证

基于表 1,并依据 CKGSA - PP 模型评价实现步骤,利用随机生成并经过一致性处理的样本分别构建节水型社会建设区域类型分类评价投影目标函数 $Q_W(a)$、$Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$,利用CKGSA分别优化求解最佳投影向量 a_W、a_E、a_P。CKGSA 参数设置为:粒子数量 N = 50,最大迭代次数 T = 100,万有引力常数 G_0 = 100,α = 20,$final\_per$ = 2,混沌控制参数 μ = 4。

CKGSA 采用 Matlab 2010a 用 M 语言实现,分别对投影目标函数 $Q_W(a)$、$Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$ 独立运行 20 次,并分别统计最优适应值 $Q_{best}(a)$、最差适应度值 $Q_{worst}(a)$、平均适应度值 $\overline{Q}(a)$ 和标准差(SD),见表 3。其中,$\overline{Q}(a)$ 反映的是算法在运行至最大迭代次数时可以达到的求解精度,SD 反映算法的收敛稳定性。CKGSA 在目标函数 $Q_W(a)$、$Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$ 上前 5 次进化过程曲线见图 1 ~3。

表2 云南省节水型社会建设区域类型评价指标数据表

区域	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
昆明市	36.87	949.6	749	276	30.0	5.62	69.0	307	1.04	53.7	13.4	94.1	91.6	11.28	58.0
曲靖市	10.91	1218.5	2628	229	41.2	2.58	42.9	201	0.85	39.1	15.7	85.2	95.4	12.60	2.5
玉溪市	21.85	962.3	1591	348	50.5	5.05	45.4	154	1.00	31.9	13.0	80.2	81.8	13.71	0.0
保山市	9.57	1172.6	4381	419	82.6	1.96	30.3	131	0.76	38.3	18.2	85.4	39.8	13.37	0.0
昭通市	7.03	1069.9	2354	166	63.5	1.25	27.5	234	0.65	35.0	22.8	70.1	95.4	8.94	2.1
丽江市	10.50	821.8	4433	466	57.5	2.12	33.9	60	0.72	44.2	25.4	85.2	42.3	19.21	1.3
普洱市	4.95	1349.8	9430	466	76.7	1.84	37.2	57	0.71	36.0	19.5	77.6	60.9	5.34	0.0
临沧市	8.61	1181.9	4590	395	45.6	1.87	35.2	102	0.72	36.1	20.0	83.6	60.9	6.96	0.0
楚雄州	21.96	834.7	1518	333	48.5	2.59	38.7	63	0.76	40.1	15.0	82.8	93.5	23.95	0.0
红河州	9.31	1244.6	3392	316	14.8	2.45	41.3	140	0.77	37.2	21.5	78.2	93.2	5.23	0.9
文山州	6.16	1251.6	4127	254	65.4	1.72	35.5	112	0.70	40.8	22.5	80.4	74.6	9.88	0.7
西双版纳	6.28	1287.5	7703	483	65.0	2.65	41.7	59	0.92	46.1	24.5	78.0	64.1	10.69	0.0
大理州	18.74	852.9	1941	364	61.5	2.37	40.5	120	0.79	37.5	23.0	81.8	52.4	12.10	0.0
德宏州	6.41	1714.3	8807	565	80.0	2.19	40.0	110	0.72	48.1	24.5	80.4	58.7	15.66	0.0
怒江州	1.18	1771.6	26883	318	71.5	1.85	26.6	37	0.43	50.9	25.5	36.1	83.6	6.20	0.0
迪庆州	1.53	899.0	23976	367	73.0	3.62	29.5	17	0.59	57.8	24.7	68.7	56.8	15.59	39.6

表3 各目标函数优化结果

目标函数	$Q_{best}(a)$	$Q_{worst}(a)$	$\overline{Q}(a)$	SD	投影向量 a
$Q_W(a)$	6334.0991	6334.0991	6334.0991	2.73×10^{-12}	a_W = (0.4462 0.4376 0.4556 0.4744 0.4206)
$Q_E(a)$	6523.6369	6523.6369	6523.6369	1.82×10^{-12}	a_E = (0.4424 0.4502 0.4748 0.4067 0.4591)
$Q_P(a)$	5937.9283	5937.9283	5937.9283	0	a_P = (0.5222 0.3962 0.4259 0.4488 0.4330)

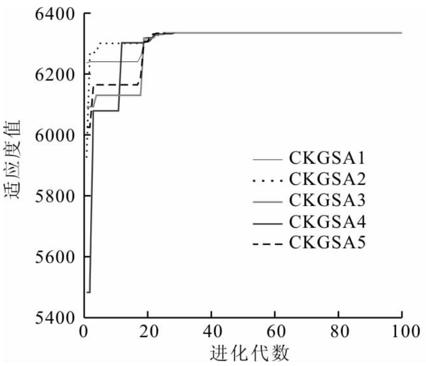

图1 CKGSA 在 $Q_W(a)$ 目标函数上的进化曲线

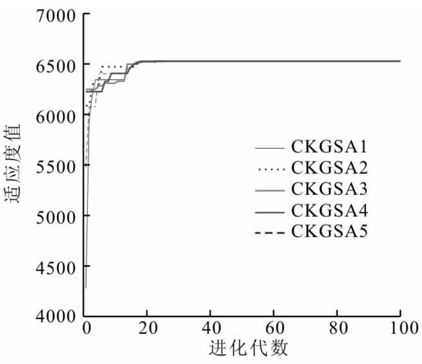

图2 CKGSA 在 $Q_E(a)$ 目标函数上的进化曲线

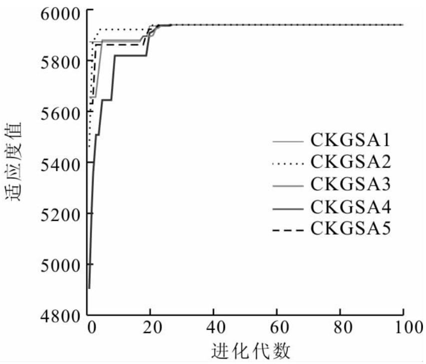

图3 CKGSA 在 $Q_P(a)$ 目标函数上的进化曲线

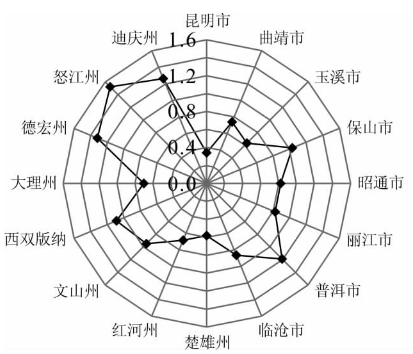

图4 水资源条件区域类型综合投影值 $z_W(i)$

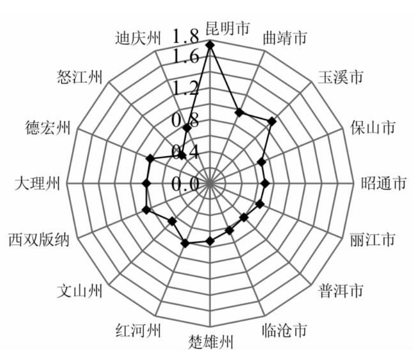

图5 经济社会条件区域类型综合投影值 $z_E(i)$

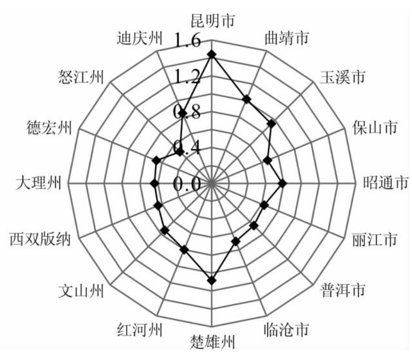

图6 节水潜力条件区域类型综合投影值 $z_P(i)$

从表 3 及图 1～3 可以看出，无论是最优适应值 $Q_{best}(a)$、最差适应度值 $Q_{worst}(a)$、平均适应度值 $\overline{Q}(a)$ 还是投影向量 a，CKGSA 在投影目标函数 $Q_W(a)$、$Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$ 上连续运行 20 次的各种统计值均相同，SD 精度均在 2.73×10^{-12} 以上，表明 CKGSA 具有较好的求解精度、全局极值寻优能力和稳健性能。

3.3　评价结果与分析

依据 CKGSA－PP 模型评价实现步骤，将表 2 指标数据按式(15)、式(16)进行一致性处理，利用 a_W、a_E、a_P 分别计算水资源条件、经济社会条件和节水潜力条件下的节水型社会建设区域类型评价分级标准 $z_W(k)$、$z_E(k)$、$z_P(k)$ 和综合投影值 $z_W(i)$、$z_E(i)$、$z_P(i)$，见表 4、5 和图 4～6。

表 4　各种条件下的节水型社会建设区域类型评价分级标准

水资源条件 $z_W(k)$		经济社会条件 $z_E(k)$		节水潜力条件 $z_P(k)$	
富水	≥1.4205	发达	≥1.5964	潜力很小	≥1.7371
轻度缺水	[1.1000,1.4205)	较发达	[1.0939,1.5964)	潜力较小	[1.4141,1.7371)
中度缺水	[0.7280,1.1000)	中度发达	[0.5473,1.0939)	潜力适中	[1.0095,1.4141)
严重缺水	[0.4398,0.7280)	欠发达	[0.1826,0.5473)	潜力较大	[0.6050,1.0095)
极度缺水	<0.4398	贫困	<0.1826	潜力巨大	<0.6050

表 5　节水型社会建设区域类型评价结果

区域	水资源条件		经济社会条件		节水潜力条件		节水型社会建设区域类型
	投影值 $z_W(i)$	评价结果	投影值 $z_E(i)$	评价结果	投影值 $z_P(i)$	评价结果	
昆明市	0.3402	极度缺水	1.7191	发达	1.4221	潜力较小	极度缺水－发达－潜力较小
曲靖市	0.7439	中度缺水	0.9629	中度发达	1.0075	潜力较大	中度缺水－中度发达－潜力较大
玉溪市	0.6342	严重缺水	1.1018	较发达	0.9514	潜力较大	严重缺水－较发达－潜力较大
保山市	1.0362	中度缺水	0.6904	中度发达	0.6719	潜力较大	中度缺水－中度发达－潜力较大
昭通市	0.8260	中度缺水	0.6763	中度发达	0.7885	潜力较大	中度缺水－中度发达－潜力较大
丽江市	0.8294	中度缺水	0.6636	中度发达	0.6208	潜力较大	中度缺水－中度发达－潜力较大
普洱市	1.1914	轻度缺水	0.5847	中度发达	0.6578	潜力较大	轻度缺水－中度发达－潜力较大
临沧市	0.8649	中度缺水	0.6388	中度发达	0.6909	潜力较大	中度缺水－中度发达－潜力较大
楚雄州	0.5832	严重缺水	0.7164	中度发达	1.0736	潜力适中	严重缺水－中度发达－潜力适中
红河州	0.6813	严重缺水	0.8077	中度发达	0.7994	潜力较大	严重缺水－中度发达－潜力较大
文山州	0.9485	中度缺水	0.6751	中度发达	0.7337	潜力较大	中度缺水－中度发达－潜力较大
西双版纳	1.0858	中度缺水	0.8601	中度发达	0.6381	潜力较大	中度缺水－中度发达－潜力较大
大理州	0.7007	严重缺水	0.7812	中度发达	0.6312	潜力较大	严重缺水－中度发达－潜力较大
德宏州	1.3145	轻度缺水	0.8087	中度发达	0.6613	潜力较大	轻度缺水－中度发达－潜力较大
怒江州	1.5171	富水	0.4925	欠发达	0.4882	潜力巨大	富水－欠发达－潜力巨大
迪庆州	1.2639	轻度缺水	0.7484	中度发达	0.8383	潜力较大	轻度缺水－中度发达－潜力较大

从表 5 和图 4～6 可以得出以下结论：

(1)从水资源条件上看，昆明、玉溪、楚雄、红河、大理评价为严重缺水～极度缺水地区；怒江州由于在 16 个州市中水资源利用率极低(仅 1.18%)，降水量、人均水资源量最大，评价为富水地区；其他 10 个州市评价为中度缺水～轻度缺水地区。从图 4 可以直观看出，怒江、德宏和迪庆州投影值最大，昆明市最小。

(2)从经济社会条件上看，昆明、玉溪分别评价为发达和较发达，怒江州评价为欠发达，其他 13 个州市评价为中度发达。从图 5 可以直观看出，昆明市投影值最大，为 1.7191，怒江州投影值最小，为

0.4925。

(3)从节水潜力条件上看,昆明市、楚雄州、怒江州分别评价为潜力较小、潜力适中和潜力巨大,其他州市评价为潜力较大。从图 6 可以直观看出,昆明市投影值最大,为 1.4221,怒江州投影值最小,为 0.4882。

(4)从节水型社会建设区域类型综合评价来看,昆明市是云南省的经济、政治和文化中心,经济社会发达,但人均水资源量不足 800 m^3,水资源开发率已接近控制红线 40%,水功能区达标率仅 30%,水资源严重紧缺,水环境形势不容乐观。近年来,昆明市大力推进节水型社会建设,已在城市污水处理及再生水利用、供水管网改造、工业节水等方面取得显著成绩,但在农业节水方面尚有提升空间,可见,昆明市节水型社会建设区域类型综合评价为"极度缺水-发达-潜力较小"型符合昆明实际。

玉溪市经济社会相对发达,人均 GDP、城镇化率和人均纯收入仅次于昆明市,属较发达地区,但水资源开发率较高、人均水资源量不足 1 600 m^3,属资源型缺水地区。从指标值来看,玉溪市在城市污水处理、再生水利用、工业节水和农业节水方面还有较大的提升空间,因此,玉溪市节水型社会建设区域类型综合评价为"严重缺水-较发达-潜力较大"型与现状相符。

楚雄州人均 GDP、城镇化率和人均纯收入与云南省平均水平相当,属经济社会中度发达地区,但人均水资源量 1 518 m^3、水资源开发率 22.0%,仅次于昆明市,属资源型严重缺水地区。近年来,楚雄州大力推进节水型社会建设,已在农业高效节水、供水管网改造和工业节水方面取得成绩,但在城市污水处理与再生水利用方面节水潜力较大,其节水型社会建设区域类型综合评价为"严重缺水-中度发达-潜力适中"型。

怒江州经济社会发展水平相对较低,城镇化率、人均纯收入等处于全省最末,但水资源量丰富,人均水资源量高达 26 883 m^3,而水资源利用率仅 1.18%,属富水地区;供水管网漏损率全省最高,城市污水处理率全省最低,农业节水灌溉率仅为 6.2%,节水潜力巨大,其节水型社会建设区域类型综合评价为"富水-欠发达-潜力巨大"型。

其他州市经济社会发展处于全省中间水平,在供水管网改造、再生水利用、城市污水处理和农业节水改造等方面有较大节水空间。其中,普洱市、德宏州、迪庆州人均水资源量在 8 807 m^3 以上,水资源利用率在 6.5% 以下,水功能区达标率在 73% 以上,水资源量相对较富,属轻度缺水地区,其节水型社会建设区域类型综合评价为"轻度缺水-中度发达-潜力较大"型;曲靖市、保山市、昭通市、丽江市、临沧市、文山州、西双版纳节水型社会建设区域类型综合评价为"中度缺水-中度发达-潜力较大"型。

4 结 论

(1)综合考虑云南省区域水资源、经济社会和节水潜力条件,建立具有区域特征的节水型社会建设区域类型评价指标体系和分级标准。在各评价指标标准阈值间随机生成数据样本构造基于水资源、经济社会和节水潜力条件的投影目标函数,利用 CKGSA 搜索各目标函数最佳投影向量。本文提出的指标体系、分级标准、数据样本生成方法及目标函数构建方法对节水型社会建设评价及其他领域研究具有一定的参考价值。

(2)利用 CKGSA 分别对投影目标函数 、和 20 次寻优统计,结果表明 CKGSA 具有较好的求解精度、全局极值寻优能力和稳健性能,利用 CKGSA 搜索 PP 技术可以获得最佳投影向量的唯一解。同时验证了 CKGSA-PP 模型用于节水型社会建设区域类型综合评价是可行和有效的。

(3)从实例评价结果来看,昆明市节水型社会建设区域类型综合评价为"极度缺水-发达-潜力较小"型;玉溪市评价为"严重缺水-较发达-潜力较大"型;楚雄州评价为"严重缺水-中度发达-潜力适中"型;怒江州评价为"富水-欠发达-潜力巨大"型;普洱市、德宏州、迪庆州评价为"轻度缺水-中度发达-潜力较大"型;其他州市评价价为"中度缺水-中度发达-潜力较大"型。针对不同的节水型社会建设区域类型,分析了其在推进节水型社会建设中存在的问题和不足,对云南省"因地制宜、因域施策"地推进节水型社会建设具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 张欣莹,解建仓,刘建林,等.基于熵权法的节水型社会建设区域类型分析[J].自然资源学报,2017,32(2):301-309.

[2] 褚俊英,王建华,秦大庸,等.我国节水型社会建设的模式研究[J].中国水利,2006(23):36-39.

[3] 刘丹,严冬,张乾元,等."节水型社会"建设模式选择研究[J].中国农村水利水电,2004(12):19-21+24.

(下转第 73 页)

气生物滤池试验[J]. 桂林理工大学学报,2014,34(3):568 -572.
[10]王建华,陈永志,彭永臻. 硝化型曝气生物滤池的挂膜与启动[J]. 环境工程学报,2010,4(10):2199 -2203.
[11] Mann A T, Mendoza-Espinosa L, Stephenson T. Performance of floating and sunken media biological aerated filters under unsteady state conditions[J]. Water Research,1999,33(4):1108 -1113.
[12]Fatihah S F,Donnelly T D. Effect of media volume on mixing of biological aerated filters[J]. Journal of Environmental Engineering & Science,2008,7(3):229 -236.
[13]张 淼,彭永臻,王 聪,等. 三段式硝化型生物接触氧化反应器的启动及特性[J]. 中国环境科学,2015,35(1):101 -109.
[14]余 彬,张 杰,程家迪,等. 不同填料对曝气生物滤池除污效果的影响[J]. 中国给水排水,2012,28(9):9 -12 +16.
[15]APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater[M]. Washington DC: American Public Health Association,2007.
[16]孙洪伟,杨 庆,董国日,等. 游离氨抑制协同过程控制实现渗滤液短程硝化[J]. 中国科学:化学,2010,40(8):1156 -1162.
[17]朱兆亮,曹相生,孟雪征,等. 上向流好气滤池冬季挂膜启动及运行参数探讨[J]. 环境工程学报,2009,3(2):215 -218.
[18]张 杰,曹相生,孟雪征,等. 好气滤池 3 种挂膜方法的实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(10):1216 -1219.
[19]王洪禧,路文芳,刘俊良,等. 接触氧化/BAF 工艺处理城市生活污水的挂膜研究[J]. 中国给水排水,2008,24(21):70 -73.
[20] Randall C W, Buth D. Nitrite Build - Up in Activated Sludge Resulting from Temperature Effects[J]. Journal,1984,56(9):1039 -1044.
[21]谢曙光,张晓健,王占生. 曝气生物滤池的低温挂膜研究[J]. 中国给水排水,2003,19(13):58 -59.
[22]俞汉青,顾国维. 生物膜反应器挂膜方法的试验研究[J]. 中国给水排水,1992,8(3):13 -17 +2 -3.
[23]袁 杰,金腊华,蔡小琼. 生物砂滤网工艺挂膜实验研究[J]. 生态科学,2007,26(6):531 -535.

(上接第 68 页)

[4] 乔世珊, 田玉龙. 我国不同区域不同发展阶段节水型社会建设的特点[J]. 中国水利, 2005(13): 87 -89.
[5] 刘建林, 解建仓, 马 斌, 等. 基于 AHP - MF 模型的用户群节水指标体系研究[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(2): 91 -96.
[6] 陈 莹, 赵 勇, 刘昌明. 节水型社会评价研究[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 83 -89.
[7] 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.
[8] 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.
[9] 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.
[10] 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.
[11] 龚 安,吕 倩,胡长军,等. 基于混沌万有引力搜索算法的 SVM 参数优化及应用[J]. 计算机科学,2015,42(4):240 -243.
[12] 王奇琪,孙根云,王振杰,等. 基于斥力的引力搜索算法[J]. 计算机科学,2015,42(9):240 -245.
[13] Mittal H, Pal R, Kulhari A, et al. Chaotic Kbest gravitational search algorithm (CKGSA)[C]// International Conference on Contemporary Computing. IEEE, 2017:1 -6.
[14] 饶均辉. GSA - PP 模型在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(6):95 -100 +107.
[15] 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 -48 +56.
[16] 雷宏军,刘 鑫,潘红卫,等. 基于 ARPPC 模型的灌区水资源可持续利用能力评价 [J]. 水力发电学报,2014,33(4):76 -84.