

基于 OFA-PP 模型的区域最严格水资源 管理类型识别与评价

胡林凯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:为科学识别云南省 16 个州市最严格水资源管理区域类型,提出最优觅食算法(OFA)-投影寻踪(PP)识别模型。从最严格水资源管理用水总量控制红线、用水效率控制红线、纳污控制红线 3 个方面分别构建指标体系和分级标准,利用 2015 年云南省各州市指标数据及分级标准阈值分别构建基于“三条红线”的投影指标函数,采用 OFA 分别搜索最优投影向量,并计算各州市综合投影值和各分级标准阈值投影值,利用分级标准阈值投影值对各区域最严格水资源管理类型进行识别。结果表明,OFA-PP 识别模型具有较好的识别效果,识别结果可为云南省实行最严格水资源管理制度提供参考。

关键词:最严格水资源管理;区域类型;指标体系;最优觅食算法;投影寻踪;云南省

中图分类号:TV213.9

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2018)06-0065-07

最严格水资源管理制度对当前水资源管理格局产生了重大而深远的影响。左其亭^[1-2]、陈明忠^[3]、王慧敏^[4]等学者针对最严格水资源管理制度中的指标体系、政策措施等内容进行了深入剖析和解读,开展了大量卓有成效的研究工作。目前用于最严格水资源管理评价的方法主要有层次分析法^[5]、神经网络法^[6]、物元分析法^[7]、可变模糊法^[8]等,均在一定区域及环境背景条件下取得较好的评价效果。但在最严格水资源管理评价过程中暴露出的问题和不足也不容忽视:(1)缺乏统一的指标体系。由于我国南北方、区域间在水资源禀赋、经济社会发展水平、水环境承载力等方面存在差异,造成最严格水资源管理评价缺乏统一的指标体系和分级标准,仅从用水总量控制率、万元工业增加值用水量等 6 个指标进行评价,很难全面、客观地进行最严格水资源管理水平的的评价。(2)现存评价方法存在一定缺陷。如层次分析法存在指标权重确定的主观随意性;神经网络法存在网络结构确定的随意性和网络训练易出现“过拟合”现象;物元分析法需要构造较多的评价函数,且函数设计无规律可循;可变模糊法存在各评价模型权重确定的困难。(3)评价指标较少。最严格水资源管理评价涉及水资源、经济社会、水环境等领域,其评价

指标仅从狭义的“用水总量控制、用水效率控制、纳污控制”3 个方面选取,很难全面、客观地评价区域最严格水资源管理水平。

针对最严格水资源管理评价中存在的问题,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 个州市最严格水资源管理区域类型进行识别。内容安排如下:(1)从“三条红线”的 3 个方面分别选取 8 个、10 个和 6 个指标构建区域“用水总线控制红线—用水效率控制红线—纳污控制红线”类型识别指标体系和分级标准。(2)针对 PP 技术最佳投影向量科学、合理确定的重要性,利用一种新型群体智能算法——最优觅食算法(optimal foraging algorithm,OFA)优化 PP 技术最佳投影向量,提出 OFA-PP 最严格水资源管理区域类型识别模型。(3)利用 2015 年云南省各州市指标数据分别构建基于“三条红线”的投影指标函数,利用 OFA-PP 模型对云南省 16 个州市最严格水资源管理区域类型进行识别评价,旨在为云南省实行最严格水资源管理制度提供借鉴,同时验证 OFA-PP 模型用于最严格水资源管理区域类型识别的可行性和有效性。

收稿日期:2017-08-10

作者简介:胡林凯(1971-),男,云南文山山人,高级工程师,主要从事水文水资源工程等工作。E-mail:cyx200856@163.com

通讯作者:崔东文(1978-),男,云南玉溪人,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。

E-mail:cdwgr@163.com

1 评价指标体系及分级标准

从当前最严格水资源管理考核的指标选取来看,仅选取用水总量控制率、万元工业增加值用水量、万元GDP用水量、渠系有效水利用系数、水功能区达标率、重要饮用水水源地达标率6个指标进行评价,很难全面、客观地评价区域最严格水资源管理水平。笔者以云南省16个州市最严格水资源管理区域类型识别为例,在充分考虑区域水资源禀赋、经济社会发展水平和水环境条件前提下,参考文献[1],遵行指标可获取、可量化、具有代表性等原则,从“用水总线控制红线”筛选用水总量控制率、水资源开发利用率等8个指标;从“用水效率控制红线”筛选万元GDP用水量、万元工业增加值用水量等10个指标;从“纳污控制红线”筛选水功能区达标率、饮用水水源地达标率等6个指标,分别构

建最严格水资源管理区域类型识别指标体系和分级标准,并将“用水总量控制红线”等级划分为“合理/级”、“较合理/级”、“基本合理/级”、“不合理/级”和“极不合理/级”5个等级;“用水效率控制红线”等级划分为“高水平/级”、“较高水平/级”、“中等水平/级”、“较低水平/级”和“低水平/级”5个等级;“纳污控制红线”等级划分为“完全可承载/级”、“可承载/级”、“基本可承载/级”、“不可承载/级”和“极不可承载/级”5个等级。指标类型及指标分级划分标准见表1。

2 OFA-PP 识别模型

2.1 最优觅食算法

最优觅食算法(OFA)是文献[9]于2017年基于行为生态理论-最佳觅食理论提出的一种新型群体智能

表1 最严格水资源管理区域类型识别指标体系及分级标准

Table1 The most stringent water resources management regional type identification index system and grading standards

用水总量控制红线(T)	类型	合理/级	较合理/级	基本合理/级	不合理/级	极不合理/级
用水总量控制率 T_1	↓	<0.70	[0.70,0.80)	[0.80,0.9)	[0.9,1.00)	1.00
水资源利用率 $T_2 / \%$	↓	<10	[10,20)	[20,30)	[30,40)	≥ 40
降水量 T_3 / mm	↑	≥ 1200	[1000,1200)	[800,1000)	[600,800)	<600
供水量模数 $T_4 / 10^4 \text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$	↑	≥ 8.0	[6.0,8.0)	[4.0,6.0)	[2.0,4.0)	<2.0
河道外生态用水比例 $T_5 / \%$	↑	≥ 4.0	[3.5,4.0)	[3.0,3.5)	[2.0,3.0)	<2.0
居民生活用水比例 $T_6 / \%$	↑	≥ 20	[15,20)	[12,15)	[8,12)	<8
农业用水比例 $T_7 / \%$	↓	<50	[50,60)	[60,70)	[70,80)	≥ 80
工业用水比例 $T_8 / \%$	↑	≥ 25	[20,25)	[15,20)	[10,15)	<10
用水效率控制红线(E)	类型	高水平/级	较高水平/级	中等水平/级	较低水平/级	低水平/级
万元GDP用水量 E_1 / m^3	↓	<70	[70,120)	[120,160)	[160,200)	≥ 200
万元工业增加值用水量 E_2 / m^3	↓	<60	[60,100)	[100,120)	[120,150)	≥ 150
灌溉水利用系数 E_3	↑	≥ 0.60	[0.55,0.60)	[0.50,0.55)	[0.40,0.55)	<0.40
工业用水重复利用率 $E_4 / \%$	↑	≥ 90	[80,90)	[70,80)	[60,70)	<60
万元农业增加值用水量 E_5 / m^3	↓	<400	[400,600)	[600,800)	[800,1200)	≥ 1200
亩均灌溉用水量 E_6 / m^3	↓	<200	[200,350)	[350,450)	[450,550)	≥ 550
节水灌溉率 $E_7 / \%$	↑	≥ 40	[30,40)	[20,30)	[10,20)	<10
城镇人均生活用水量 $E_8 / \text{L} \cdot \text{d}^{-1}$	↑	≥ 200	[150,200)	[120,150)	[100,120)	<100
农村人均生活用水量 $E_9 / \text{L} \cdot \text{d}^{-1}$	↑	≥ 90	[80,90)	[70,80)	[60,70)	<60
管网漏损率 $E_{10} / \%$	↓	<10	[10,15)	[15,20)	[20,25)	≥ 25
纳污控制红线(P)	类型	完成可承载/级	可承载/级	基本可承载/级	不可承载/级	极不可承载/级
水功能区达标率 $P_1 / \%$	↑	≥ 90	[80,90)	[70,80)	[60,70)	<60
饮用水水源地达标率 $P_2 / \%$	↑	≥ 95	[90,95)	[85,90)	[80,85)	<80
人均COD环境容量 $P_3 / \text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$	↑	≥ 15	[10,15)	[7,10)	[5,7)	<5
万元GDP的COD排放量 P_4 / kg	↓	<3	[3,4)	[4,5)	[5,6)	≥ 6
工业废水排放强度 $P_5 / \text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$	↓	<5	[5,7)	[7,10)	[10,15)	≥ 15
城镇污水处理率 $P_6 / \%$	↑	≥ 95	[90,95)	[85,90)	[70,85)	<70

注:用水总量控制率是指年度用水总量与年度下达用水总量控制指标的比值;↑表示越大越优型指标;↓表示越小越优型指标。

算法,该算法通过模拟动物觅食搜索、猎物识别时间、食物地域和觅食中心位置来建立数学模型,并通过达到觅食动物净能量最大来解决待优化问题。OFA 数学描述简述如下:

(1)觅食位置初始化。在自然界中,觅食是生物的生命基础,不同生物具有不同的觅食行为。受最佳觅食理论的启发,OFA 中个体被认为是一种觅食动物,其位置分布代表待优化问题的可行解。文献[9]利用式(1)初始化 d 维变量第 $t+1$ 代觅食空间位置。

$$x_i^{t+1} = x_i^t - k \times r_{1i} \times \Delta x_i^t + k \times r_{2i} \times \Delta x_i^t \quad (t=1, 2, \dots; i=1, 2, \dots, d) \quad (1)$$

式中: x_i^{t+1} 为第 i 个个体第 $t+1$ 代觅食空间位置; x_i^t 为第 i 个个体第 t 代觅食空间位置; k 为比例因子; r_{1i}, r_{2i} 为 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数; Δx_i^t 为第 i 个个体第 t 代觅食的位置增量。

(2)位置更新。文献[9]给出第 i 个动物个体第 t 代觅食的位置增量数学描述:

$$\begin{cases} \Delta x_{ji}^t = x_{bi}^t - x_{ji}^t & (F_b^t < F_j^t; F_j^t \neq \min(F_1^t, \dots, F_N^t)); \\ & b=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, N; i=1, 2, \dots, d) \\ \Delta x_{ji}^t = x_{Ni}^t - x_{ji}^t & (F_j^t = \min(F_1^t, \dots, F_N^t)); \\ & F_N^t = \max(F_1^t, \dots, F_N^t); i=1, 2, \dots, d) \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δx_{ji}^t 为第 t 代搜索中第 j 个个体第 i 个向量增量; $x_{bi}^t, x_{ji}^t, x_{Ni}^t$ 分别为第 t 代觅食中,个体 b 获得的第 i 个向量位置,个体 j 获得的第 i 个向量位置和该组中最差第 i 个向量位置; F_b^t, F_j^t, F_N^t 分别为各位置对应的目标函数值。

式(1)中加入式(2)得到位置更新公式:

$$\begin{cases} x_{ji}^{t+1} = x_{ji}^t - k \times r_{1ji} \times (x_{bi}^t - x_{ji}^t) + k \times r_{2ji} \times (x_{Ni}^t - x_{ji}^t) \\ & (F_b^t < F_j^t; F_j^t \neq \min(F_1^t, \dots, F_N^t); \\ & b=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, N; i=1, 2, \dots, d) \\ x_{ji}^{t+1} = x_{ji}^t - k \times r_{1ji} \times (x_{Ni}^t - x_{ji}^t) + k \times r_{2ji} \times (x_{bi}^t - x_{ji}^t) \\ & (F_j^t = \min(F_1^t, \dots, F_N^t); F_N^t = \max(F_1^t, \dots, F_N^t); \\ & i=1, 2, \dots, d) \end{cases} \quad (3)$$

在 OFA 中,一些个体发现更好的位置后,当前个体将通过向其中一个个体搜索更好的位置;如果当前个体是最好的个体,那么它将通过朝最差个体移动来搜索当前位置附近的更好位置。OFA 中每个个体都可以通过式(3)来逼近个体当前位置,除了最好的个体,

每个个体往往迁移到更好的个体位置。

(3)猎物识别。假设在动物觅食过程中只存在两种类型的猎物,它们是有利可图猎物 1 型和无利可图猎物 2 型。依据最优觅食理论,动物总是选择具有更好能量摄入的猎物。如果满足公式(4),动物将忽略无利可图的猎物类型 2。

$$\frac{\lambda_1 E_1}{1 + \lambda_1 h_1} > \frac{E_2}{h_2} \quad (4)$$

式中: E_1 为有利可图猎物 1 型的净能量收益; E_2 为无利可图猎物 2 型的净能量收益; h_1 为有利可图猎物 1 型的处理时间; h_2 为无利可图猎物 2 型的处理时间; λ_1 为遇到有利可图猎物 1 型的比率,即相遇率。

在 OFA 中,搜索最佳位置的时间成本与搜索猎物的时间相似,可以由群组的觅食次数 t 表示,其在 $t+1$ 次搜索后获得的位置被视为有利可图猎物位置,相应的适应度值被视为有利可图的猎物能量,即 F_j^{t+1} 为 E_1 ;在 t 次搜索后获得的位置被视为无利可图的猎物,相应的适应度值被看作是无利可图的猎物类型能量,即 F_j^t 为 E_2 。对于最小值优化问题,式(4)可以描述为:

$$\frac{\lambda_j^{t+1} F_j^{t+1}}{1 + \lambda_j^{t+1} (t+1)} < \frac{F_j^t}{t} \quad (5)$$

式中: λ_j^{t+1} 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数。

OFA 的改进。OFA 中比例因子 $k=t/T$,可见较大的比例因子有利于全局搜索,较小的比例因子则有利于局部搜索。为能有效平衡 OFA 的全局搜索能力与局部搜索能力,参考粒子群优化算法惯性权重改进方法,本文利用系数法对比例因子 k 进行改进:

$$k(k+1) = \eta * k(t) \quad (6)$$

式中: η 为比例因子衰减系数,本文取 0.99。

2.2 投影寻踪模型

PP 技术简要算法如下^[10-11]:

(1)数据预处理。对于正向、负向指标,分别采用式(7)、式(8)进行处理。

$$x(i, j) = (x(i, j) - x_{\min}(j)) / (x_{\max}(j) - x_{\min}(j)) \quad (7)$$

$$x(i, j) = (x_{\max}(j) - x(i, j)) / (x_{\max}(j) - x_{\min}(j)) \quad (8)$$

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。

$$z(i) = \sum_{j=1}^m a(j) x(i, j) \quad (9)$$

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:

$$\begin{cases} \max: Q(a) = S_z D_z \\ s.t.: \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad a \in [-1, 1] \end{cases} \quad (10)$$

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[10-11]。

2.3 OFA-PP 模型识别实现步骤

Step1 利用式(7)、式(8)对云南省各州市最严格水资源管理识别指标数据及分级标准阈值进行一致性处理,并利用一致性处理后的数据分别构建基于“用水总量控制红线”、“用水效率控制红线”、“纳污控制红线”的投影目标函数 $Q_T(a)$ 、 $Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$ 。

Step2 初始化。设置 OFA 种群规模 N , 问题维度 d , 最大迭代次数 T 、比例因子衰减系数 η , 当前迭代次数 t 。在搜索空间随机生成种群个体的初始觅食位置; 采用 OFA 目标函数 $Q_T(a)$ 、 $Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$ 进行优化求解, 然后计算和排序每个个体的目标函数值。

Step3 利用式(3)更新每个个体新的觅食位置。

Step4 利用式(5)判断下一次迭代搜索方向。若满足式(5), 则在第 $t+1$ 次搜索之后获得的位置将被保存用于下一次迭代搜索; 否则, 在第 $t+1$ 次搜索之后获得的位置将被忽略, 而在第 t 次搜索后获得位置信息将被保存并用于下一次迭代搜索。

Step5 利用式(6)改进比例因子衰减系数 η 。

Step6 判断算法是否达到终止条件, 若是, 输出最佳个体空间位置, 算法结束; 否则重复 Step3~Step6。

Step7 分别输出最佳个体目标函数值及最佳个体空间位置, 即 \max_{Q_T} 、 \max_{Q_E} 、 \max_{Q_P} 和最佳投影向量 a_T 、 a_E 、 a_P 。

Step8 利用最佳投影向量 a_T 、 a_E 、 a_P 分别计算各州市综合投影值 $z_T(i)$ 、 $z_E(i)$ 、 $z_P(i)$ 及各分级标准阈值投影值 $z_T(k)$ 、 $z_E(k)$ 、 $z_P(k)$ ($k=5$, 为各识别等级数), 并利用 $z_T(k)$ 、 $z_E(k)$ 、 $z_P(k)$ 对各州市最严格水资源管理区域类型进行识别与评价。

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), 多年平均降水量 1 279 mm, 水资源总量 $2 210 \times 10^8 \text{ m}^3$, 居全国第三位, 水资源总量相对丰富。2015 年全省用水总量 $150.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 用水总量控制率 0.81。但水资源管理面临降水时空分布不均,

供需矛盾突出; 用水方式粗放, 效率效益较低; 部分区域水环境恶化, 水资源保护形势严峻; 州市间用水水平、经济社会发展水平等差异明显等突出问题, 最严格水资源管理形势不容乐观。因此, 开展 16 个州市最严格水资源管理区域类型识别对于云南省“因地制宜、因域施策”地推进最严格水资源管理制度具有重要意义。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 目标函数优化

基于 OFA-PP 模型识别步骤, 利用表 1、表 2 识别数据分别构建最严格水资源管理“三条红线”区域类型识别投影目标函数 $Q_T(a)$ 、 $Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$, 利用 OFA 分别优化求解最佳投影向量 a_T 、 a_E 、 a_P 。OFA 参数设置为: 种群规模 $N=50$, 初始比例因子 $k_0=0.90$, 比例因子衰减系数 $\eta=0.99$, 最大迭代次数 $T=1000$ 。

OFA 采用 Matlab 2010a 用 M 语言实现, 分别对投影目标函数 $Q_T(a)$ 、 $Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$ 独立运行 30 次, 并分别统计最优适应值 $Q_{\text{best}}(a)$ 、最差适应度值 $Q_{\text{worst}}(a)$ 、平均适应度值 $\bar{Q}(a)$ 和标准差 (SD), 如表 3 所示。其中, $\bar{Q}(a)$ 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。OFA 在目标函数 $Q_T(a)$ 、 $Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$ 上前 5 次进化过程图见图 1。

从表 3 及图 1 可以看出, 目标函数 $Q_T(a)$ 、 $Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$ 最优适应值 $Q_{\text{best}}(a)$ 与最差适应度值 $Q_{\text{worst}}(a)$ 之差分别仅为 0.0102、0.0117、0.0002, 标准差均小于 3.15 E^{-3} , 表明 OFA 具有较好的求解精度和稳健性能, 完全能满足最严格水资源管理区域类型识别精度要求。

3.3 识别结果

利用 a_T 、 a_E 、 a_P 分别计算“用水总量控制红线”、“用水效率控制红线”、“纳污控制红线”区域类型识别分级标准 $z_T(k)$ 、 $z_E(k)$ 、 $z_P(k)$ 和综合投影值 $z_T(i)$ 、 $z_E(i)$ 、 $z_P(i)$, 见表 4、表 5 和图 2。

4 结论

(1)分析当前最严格水资源管理评价中存在的问题和不足, 提出基于“用水总量控制红线-用水效率控制红线-纳污控制红线”的最严格水资源管理区域类型识别指标体系和分级标准。识别方法、指标体系和分级标准对最严格水资源管理评价研究具有一定参考意义。

(2)利用 2015 年各州市识别指标数据分别构建“用水总量控制红线”、“用水效率控制红线”、“纳污控

表2 云南省最严格水资源管理区域类型识别指标数据表

Table2 The most stringent water resources management area type identification index data of Yunnan Province

区域	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	E_1	E_2	E_3	E_4
昆明市	0.726	28.6	949.6	8.694	4.69	21.9	43.24	30.2	45	54	0.52	91.6
曲靖市	0.717	10.7	1218.5	4.937	0.48	15.0	61.72	22.8	85	64	0.52	95.4
玉溪市	0.812	20.4	962.3	5.758	4.67	11.2	61.01	25.2	71	34	0.52	90.8
保山市	0.948	8.5	1172.6	5.546	0.30	9.8	76.36	13.6	197	109	0.48	39.8
昭通市	0.858	14.9	1069.9	4.087	0.54	20.0	62.74	16.7	133	75	0.48	95.4
丽江市	0.824	2.7	821.8	2.820	3.19	7.8	79.90	9.1	200	81	0.48	42.3
普洱市	0.867	6.9	1349.8	2.517	1.19	9.2	83.13	6.4	216	70	0.48	60.9
临沧市	0.910	3.0	1181.9	3.793	0.58	10.1	83.42	5.9	185	66	0.48	60.9
楚雄州	0.663	9.1	834.7	2.093	0.49	10.4	79.98	9.2	122	40	0.50	93.5
红河州	0.869	14.9	1244.6	4.502	1.29	14.5	69.67	14.6	121	50	0.50	93.2
文山州	0.868	6.1	1251.6	3.039	1.39	16.0	70.81	11.8	142	71	0.52	74.6
西双版纳	0.840	4.1	1287.5	2.865	1.21	10.1	83.10	5.6	167	61	0.48	64.1
大理州	0.781	15.4	852.9	4.875	1.45	11.7	72.12	14.8	138	66	0.50	52.4
德宏州	0.955	5.7	1766.9	6.203	0.82	8.8	85.07	5.3	244	77	0.48	58.7
怒江州	0.905	0.8	1523.0	1.170	1.60	10.9	75.43	12.0	151	96	0.45	83.6
迪庆州	0.731	0.8	824.0	0.570	0.74	12.4	75.96	10.9	84	92	0.45	56.8
区域	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
昆明市	419.6	336	11.28	124	87	13.4	18.0	87.5	5.70	0.825	0.997	94.1
曲靖市	254.3	305	12.60	122	62	14.7	58.5	87.5	2.76	4.398	1.485	85.2
玉溪市	413.7	450	13.71	122	76	13.0	37.9	81.3	9.02	2.637	4.642	80.2
保山市	602.7	434	13.37	133	84	18.2	82.6	85.0	6.87	7.396	15.703	85.4
昭通市	403.6	406	8.94	120	69	22.8	84.2	88.2	1.38	4.149	2.240	70.1
丽江市	1063.5	432	19.21	118	49	25.4	83.0	87.5	4.44	2.288	1.112	85.2
普洱市	710.0	480	5.34	138	65	19.5	92.3	86.7	6.05	8.118	5.032	77.6
临沧市	565.3	494	6.96	112	70	20.0	78.6	85.7	6.17	10.894	7.955	83.6
楚雄州	456.4	446	23.95	118	63	15.0	70.0	90.0	5.14	3.760	2.693	82.8
红河州	511.7	348	5.23	131	73	21.5	28.2	80.0	5.75	5.400	2.484	78.2
文山州	454.4	363	9.88	118	66	22.5	61.5	92.3	3.36	5.488	3.410	80.4
西双版纳	529.9	487	10.69	124	80	24.5	100.0	100	13.87	10.321	4.248	78.0
大理州	486.0	344	12.10	118	83	23.0	68.5	87.5	5.34	5.009	1.682	81.8
德宏州	837.4	375	15.66	141	81	24.5	100.0	100	25.44	10.597	6.200	80.4
怒江州	791.3	420	6.20	135	61	25.5	81.5	100	3.54	4.598	1.998	61.1
迪庆州	923.6	408	15.59	106	81	24.7	82.0	100	25.61	3.897	1.359	68.7

表3 各目标函数优化结果

Table3 The various objective function optimization results

目标函数	$Q_{best}(a)$	$Q_{worst}(a)$	$\bar{Q}(a)$	SD	投影向量 \bar{a} (30次均值)
$Q_T(a)$	1425.6706	1425.6604	1425.6663	3.09e-3	$\bar{a}_T = (0.3214 \ 0.0466 \ 0.0739 \ 0.3944 \ 0.4011 \ 0.3989 \ 0.4409 \ 0.4680)$
$Q_E(a)$	1981.8628	1981.8511	1981.8557	3.14e-3	$\bar{a}_E = (0.3313 \ 0.2919 \ 0.3081 \ 0.3898 \ 0.3284 \ 0.3099 \ 0.2636 \ 0.2612 \ 0.3010)$
$Q_P(a)$	780.5549	780.5547	780.5548	6.65e-6	$\bar{a}_P = (0.2783 \ 0.5542 \ 0.3604 \ 0.3083 \ 0.4654 \ 0.4171)$

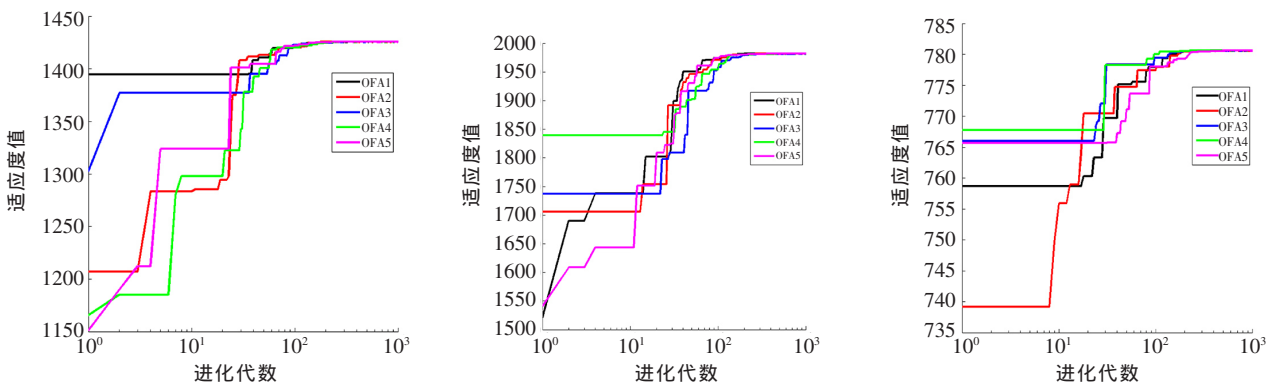


图1 OFA在 $Q_T(a)$ 、 $Q_E(a)$ 以及 $Q_P(a)$ 目标函数上的进化曲线

Fig.1 OFA evolution curve on the objective function $Q_T(a)$, $Q_E(a)$ and $Q_P(a)$

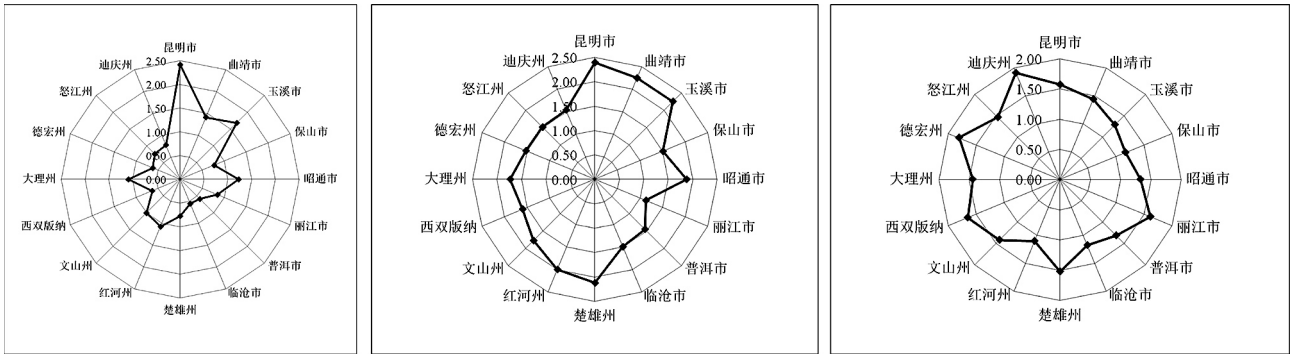


图2 用水总量控制红线 $z_T(i)$ (a)、用水效率控制红线 $z_E(i)$ (b)以及纳污控制红线 $z_P(i)$ (c)区域类型投影值

Fig.2 Area type projection values of (a) total amount of water control red line $z_T(i)$, (b) water efficiency control red line $z_E(i)$, and (c) pollution control red line $z_P(i)$

表4 “三条红线”区域类型识别分级标准 $z(k)$

Table4 The “three red lines” regional type identification grading standards

用水总量控制红线 $z_T(k)$		用水效率控制红线 $z_E(k)$		纳污控制红线 $z_P(k)$	
合理	≥ 2.1694	高水平	≥ 2.9887	完全可承载	≥ 2.0476
较合理	[1.6056, 2.1694)	较高水平	[2.2337, 2.9887)	可承载	[1.7179, 2.0476)
基本合理	[1.0008, 1.6056)	中等水平	[1.6092, 2.2337)	基本可承载	[1.3987, 1.7179)
不合理	[0.5510, 1.0008)	较低水平	[0.8888, 1.6092)	不可承载	[0.9363, 1.3987)
极不合理	< 0.5510	低水平	< 0.8888	极不可承载	< 0.9363

表5 “三条红线”区域类型识别结果

Table5 The “three red lines” area type identification results

区域	用水总量控制红线		用水效率控制红线		纳污控制红线		最严格水资源管理区域类型
	投影值 $z_T(i)$	识别结果	投影值 $z_E(i)$	识别结果	投影值 $z_P(i)$	识别结果	
昆明市	2.4142	合理	2.3903	较高水平	1.5674	基本可承载	合理-较高水平-基本可承载
曲靖市	1.4133	基本合理	2.2438	较高水平	1.4360	基本可承载	基本合理-较高水平-基本可承载
玉溪市	1.6823	较合理	2.2542	较高水平	1.2784	不可承载	较合理-较高水平-不可承载
保山市	0.7731	不合理	1.5033	较低水平	1.1680	不可承载	不合理-较低水平-不可承载
昭通市	1.2272	基本合理	1.8728	中等水平	1.3285	不可承载	基本合理-中等水平-不可承载
丽江市	0.8466	不合理	1.1281	较低水平	1.6156	基本可承载	不合理-较低水平-基本可承载
普洱市	0.5866	不合理	1.4462	较低水平	1.3114	不可承载	不合理-较低水平-不可承载
临沧市	0.5544	不合理	1.4946	较低水平	1.1786	不可承载	不合理-较低水平-不可承载
楚雄州	0.7737	不合理	2.1229	中等水平	1.5245	基本可承载	不合理-较低水平-基本可承载
红河州	1.0785	基本合理	1.9990	中等水平	1.1054	不可承载	基本合理-中等水平-不可承载
文山州	1.0012	基本合理	1.7746	中等水平	1.4162	基本可承载	基本合理-中等水平-基本可承载
西双版纳	0.6352	不合理	1.5984	较低水平	1.6529	基本可承载	不合理-较低水平-基本可承载
大理州	1.0886	基本合理	1.7291	中等水平	1.4456	基本可承载	基本合理-中等水平-基本可承载
德宏州	0.6226	不合理	1.5243	较低水平	1.8070	可承载	不合理-较低水平-可承载
怒江州	0.7540	不合理	1.5092	较低水平	1.4537	基本可承载	不合理-较低水平-基本可承载
迪庆州	0.7832	不合理	1.5344	较低水平	1.9077	可承载	不合理-较低水平-可承载

制红线”投影目标函数，利用一种新型群体智能算法——最优觅食算法(OFA)优化PP技术最佳投影向量，提出OFA-PP最严格水资源管理区域类型识别模型。通过OPA对投影目标函数 $Q_T(a)$ 、 $Q_E(a)$ 和 $Q_P(a)$ 30次寻优统计，验证了OPA具有较好的求解精度和稳健性能。同时验证了OPA-PP模型用于最严格水资源管理区域类型识别是可行和有效的。

(3)从16个州市最严格水资源管理区域类型识别结果来看，昆明市识别为“合理-较高水平-基本可承载”型；曲靖市识别为“基本合理-较高水平-基本可承载”型；玉溪市识别为“较合理-较高水平-不可承载”型；保山、普洱、临沧识别为“不合理-较低水平-不可承载”型；昭通、红河识别为“基本合理-中等水平-不可承载”型；文山、大理识别为“基本合理-中等水平-

基本可承载”型;德宏、迪庆识别为“不合理-较低水平-可承载”型;其他州市识别为“不合理-较低水平-基本可承载”型。针对不同的最严格水资源管理区域类型,分析了其存在的问题和不足,并有针对性地提出对策措施,对云南省严格实行最严格水资源管理“三条红线”、“四项制度”具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 左其亭,胡得胜,窦明,等. 最严格水资源管理制度研究—基于人水和谐视角 [M]. 北京: 科学出版社, 2016. (ZUO Qiting, HU Desheng, DOU Ming, et al. The Strictest Water Resources Management System in China: A Perspective of Human-Water Harmony [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [2] 左其亭,张志强. 人水和谐理论在最严格水资源管理中的应用[J]. 人民黄河, 2014,36(8):47-51. (ZUO Qiting, ZHANG Zhiqiang. Application of human water harmony theory in the strictest water resources management [J]. Yellow River, 2014,36(8):47-51. (in Chinese))
- [3] 陈明忠,张续军. 最严格水资源管理制度相关政策体系研究[J]. 水利水电科技进展, 2015,35(5):130-135. (CHEN Mingzhong, ZHANG Xujun. Research on policies for strictest water resources management system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015,35(5):130-135. (in Chinese))
- [4] 王慧敏. 落实最严格水资源管理的适应性政策选择研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2016,8(3):38-43. (WANG Huimin. Research into choice of adaptive policy of the strictest water resources management [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Science), 2016,8(3):38-43. (in Chinese))
- [5] 胡德义,程大鹏,胡彩虹,等. 基于得分法的河南省最严格水资源管理评价[J]. 人民珠江, 2016,37(7):102-106. (HU Deyi, CHENG Dapeng, HU Caihong, et al. Evaluation of the strictest water resources management in Henan province based on the score method [J]. Pearl River, 2016,37(7):102-106. (in Chinese))
- [6] 代兴兰. 最严格水资源管理评价的神经网络模型及其应用 [J]. 水资源与水工程学报, 2015,26(2):119-125. (DAI Xinglan. The most stringent water management evaluation neural network model and its application [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015,26(2):119-125. (in Chinese))
- [7] 杨阳,方国华,黄显峰,等. 基于改进模糊物元分析法的区域最严格水资源管理评价 [J]. 水资源保护, 2014,(6):19-24. (YANG Yang, FANG Guohua, HUANG Xianfeng, et al. Assessment of strictest regional water resources management system based on improved fuzzy matter-element analysis [J]. Water Resources Protection, 2014,(6):19-24. (in Chinese))
- [8] 王大洋,莫崇勋,钟欢欢,等. 基于综合权重可变模糊集的最严格水资源管理评价[J]. 人民珠江, 2016,37(5):10-14. (WANG Dayang, MO Chongxun, ZHONG Huanhuan, et al. Evaluation of strictest water resources management level based on comprehensive weight variable fuzzy set method [J]. Pearl River, 2016,37(5):10-14. (in Chinese))
- [9] Zhu G Y, Zhang W B. Optimal foraging algorithm for global optimization[J]. Applied Soft Computing, 2016,51:294-313.
- [10] 崔东文. 鸡群优化算法投影跟踪洪旱灾害评估模型[J]. 水利水电科技进展, 2016,36(2):16-23. (CUI Dongwen. Projection pursuit model for evaluation of flood and drought disasters based on chicken swarm optimization algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016,36(2):16-23. (in Chinese))
- [11] 崔东文. 正弦余弦算法-投影跟踪水污染物总量分配模型[J]. 水资源保护, 2016,32(6):75-81. (CUI Dongwen. Sine cosine algorithm-projection pursuit model for water pollutant load allocation [J]. Water Resources Protection, 2016,32(6):75-81. (in Chinese))

Identification and Evaluation of Most Strict Water Resources Management Types Based on OFA-PP Model

HU Linkai¹, CUI Dongwen²

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

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

Abstract: In order to scientifically identify the most stringent water management area types for the 16 cities of Yunnan Province, the optimal foraging algorithm (OFA)-Projection Pursuit (PP) recognition model was proposed. The index system and grading standards were established according to the most stringent water resources management including the total amount of water control red line, water efficiency control red line, and pollution control red line. The index data and grading standard threshold of the various cities of Yunnan Province in 2015 were used to build the projection index function, the OFA was used to search the optimal projection vector, and the comprehensive projection values and the threshold values of the various cities were calculated, and the graded standard threshold projection values were used to identify the most stringent water resource management types in each region. The results show that the OFA-PP identification model has a good recognition effect, and the recognition results can provide a reference for the implementation of the most stringent water resources management system in Yunnan Province.

Key words: most stringent water resources management; area type; index system; optimal foraging algorithm; projection pursuit; Yunnan Province