

基于足球联赛竞争算法-投影寻踪-云模型的水资源短缺风险评价

李 菊¹, 崔东文², 袁树堂³

(1.云南开放大学,云南 昆明 650223; 2.云南省文山州水务局,云南 文山 663000;
3.云南省水文水资源局,云南 昆明 650106)

摘 要:为客观衡量水资源短缺风险评价过程中的随机性与模糊性,将正态云模型引入水资源短缺风险评价,建立足球联赛竞争算法-投影寻踪-正态云评价模型,以云南省各州市水资源短缺风险评价为例进行实例研究。从水资源等系统遴选 20 个指标构建水资源短缺风险评价指标体系和分级标准,采用云模型正向发生器计算水资源短缺风险分级评价指标的隶属度;在分级标准阈值间随机内插样本构造投影寻踪优化目标函数,利用足球联赛竞争算法、粒子群算法、布谷鸟搜索算法和差分进化算法优化投影寻踪目标函数并进行比较,并通过足球联赛竞争算法-投影寻踪法给出各指标权重;根据隶属度矩阵和权重矩阵计算水资源短缺风险评价的分级确定度并进行评价,评价结果与投影寻踪法、模糊综合评价法比较。结果表明:足球联赛竞争算法寻优精度高于粒子群算法等 3 种算法。昆明市、怒江州和迪庆州水资源风险评价为低风险;玉溪市、保山市、文山州和德宏州评价为较低风险;曲靖市、昭通市、普洱市、临沧市和红河州评价为中等风险;其余州市评价为较高风险,评价结果与投影寻踪法、模糊评价法基本一致。足球联赛竞争算法-投影寻踪-正态云评价模型兼具模糊性和随机性,既能反映水资源短缺风险评价分级的定性概念,又可反映隶属程度的不确定性,具有较好的应用价值。

关键词:水资源短缺;风险评价;正态云模型;指标体系;足球联赛竞争算法;投影寻踪

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2018)04-0040-08

水资源短缺风险是指一定时空环境下,由于城市化及经济社会快速发展、水资源不合理开发利用、水生态环境持续恶化以及储水与供水系统不完备所导致的区域水资源系统缺水的现象。近年来,用于水资源短缺风险评价的方法有层次分析法^[1]、灰色关联分析法^[2]、信息扩散理论法^[3]、主成分分析法^[4]、模糊集对法^[5]、模糊隶属度评价法^[6]等,均在水资源短缺风险评价研究中取得了一定的应用效果。然而,水资源短缺风险评价涉及水资源、经济社会、水源开发、生态环境等方面,其评价指标和分级标准同时具有随机性和模糊性。针对自然界中存在的模糊性和随机性评价问题,李德毅院士提出了定性定量相互转换模型,即云模型,其已在灾害风险评价^[7-8]、水质评价^[9-10]、膨胀土胀缩等级分类^[11]、水利现代化评价^[12]、水安全评价^[13-14]、河流健康评价^[15]等领域得到应用。但在云模型评价过程中,如何客观确

定指标权重已成为制约云模型能否广泛应用的关键因素。目前,层次分析法^[11,16]、熵权法^[8-9]、投影寻踪法^[17]等已广泛用于云模型指标权重的确定。其中投影寻踪(PP)是科学、客观确定指标权重的较好方法,其原理是利用数学方法将高维指标数据投影到低维空间进行分析来获取评价指标权重,但如何优化投影寻踪目标函数以获取最大目标函数所对应的投影向量是决定投影寻踪方法应用成败的关键。目前普遍采用遗传算法、粒子群算法等传统智能算法优化投影寻踪目标函数以获取最佳投影向量,但对于多指标、超高维目标函数,传统智能算法由于自身缺陷很难获得真正意义上的最佳投影向量。除此之处,一些对于超高维、复杂问题具有较好优化性能的新型群体智能算法,如鸡群优化算法^[18]、群居蜘蛛优化算法^[19]、新型蝙蝠算法^[20]、蛾群算法^[21]、混沌闪电搜索算法^[22]

收稿日期:2018-01-12

作者简介:李菊(1983-),女,云南红河人,工程师,主要从事水文水资源和工程管理研究。E-mail:179387915@qq.com

等用于 PP 最优空间投影向量的优化,并取得理想的优化效果。

基于此,本文通过建立水资源短缺风险评价指标体系和分级标准,将正态云模型引入水资源短缺风险评价。采用云模型正向发生器计算水资源短缺风险分级评价指标的隶属度;利用足球联赛竞争(SLC)算法^[23-24]优化投影寻踪最佳投影向量,提出足球联赛竞争算法-投影寻踪指标权重确定方法,并将优化目标函数值与传统粒子群算法、布谷鸟搜索算法和差分进化算法的优化结果进行比较;建立足球联赛竞争算法-投影寻踪-正态云水资源短缺风险评价模型,以云南省 16 个州市水资源短缺风险评价为例进行实例研究,旨在验证足球联赛竞争算法-投影寻踪-正态云模型用于水资源短缺风险评价的可行性和有效性。

1 评价指标体系及分级标准

为能客观评价云南省 16 个州市水资源短缺风险程度,遵循代表性、可操作性和可度量性等原则,参考文献[3-6],从水资源、经济社会、水源储备与供水和生态环境 4 个系统选取 20 个指标用于构建区域水资源短缺风险评价指标体系,并利用层次结构的评价体系将水资源短缺风险评价指标体系分为目标层、准则层、指标层 3 个层次;结合各评价区域实际,合理确定水资源短缺风险评价分级标准阈值及各指标上下限值,见表 1。其中,由于云南省区域间部分指标差异较大,其指标上下限值部分采用 2015 年各州市最大、最小值,中间分级阈值采用三种方法确定:采用各指标系列均值、标准差确定;参考文献[21-22,25-26]确定;结合各评价区域实际合理确定。

表1 水资源短缺风险评价指标体系
Table1 The water shortage risk assessment index system

目标层	准则层	指标层	类型	1 级/低风险	2 级/较低风险	3 级/中等风险	4 级/较高风险	5 级/高风险	上下限值
水资源系统		人均水资源量 $W_1/10^4\text{m}^3$	+	≥ 0.60	[0.40,0.60)	[0.20,0.40)	[0.10,0.20)	<0.10	[0.01,1.00]
		产水量模数 $W_2/10^4\text{m}^3\cdot\text{km}^{-2}$	+	≥ 80.0	[60.0,80.0)	[40.0,60.0)	[20.0,40.0)	<20.0	[10.0,100.0]
		产水系数 W_3	+	≥ 0.50	[0.40,0.50)	[0.30,0.40)	[0.20,0.30)	<0.20	[0.10,0.60]
		水资源开发利用率 $W_4/\%$	-	<20.0	[20.0,30.0)	[30.0,40.0)	[40.0,50.0)	≥ 50.0	[1.18,60.0]
		用水总量控制率 $W_5/\%$	-	<80.0	[80.0,90.0)	[90.0,100.0)	[100.0,120.0)	≥ 120.0	[40.0,140.0]
经济社会系统		人口密度 $E_1/\text{人}\cdot\text{km}^{-2}$	-	<100.0	[100.0,200.0)	[200.0,300.0)	[300.0,400.0)	≥ 400.0	[17.1,500.0]
		第三产业比重 $E_2/\%$	+	≥ 50.0	[40.0,50.0)	[30.0,40.0)	[20.0,30.0)	<20.0	[10.0,60.0]
		人均 GDP $E_3/\text{万元}\cdot\text{人}^{-1}$	+	≥ 5.00	[4.00,5.00)	[3.00,4.00)	[2.00,3.00)	<2.00	[1.00,6.00]
		万元 GDP 用水量 $E_4/\text{m}^3\cdot\text{万元}^{-1}$	-	<60.0	[60.0,80.0)	[80.0,120.0)	[120.0,200.0)	≥ 200.0	[30.0,287]
		城镇化率 $E_5/\%$	+	≥ 60.0	[50.0,60.0)	[40.0,50.0)	[30.0,40.0)	<30.0	[20.0,70.0]
水资源短缺风险评价	水源储备与供水系统	蓄水工程模数 $R_1/10^4\text{m}^3\cdot\text{km}^{-2}$	+	≥ 8.00	[6.00,8.00)	[4.00,6.00)	[2.00,4.00)	<2.00	[0.11,12.83]
		供水量模数 $R_2/10^4\text{m}^3\cdot\text{km}^{-2}$	+	≥ 7.00	[5.00,7.00)	[3.00,5.00)	[1.00,3.00)	<1.00	[0.64,8.71]
		水库总库容占供水总量之比 R_3	+	≥ 1.20	[0.80,1.20)	[0.60,0.80)	[0.40,0.60)	<0.40	[0.18,1.62]
		供水率 $R_4/\%$	+	≥ 20.0	[15.0,20.0)	[10.0,15.0)	[5.0,10.0)	<5.0	[1.20,27.55]
		农业节水灌溉率 $R_5/\%$	+	≥ 25.0	[20.0,25.0)	[15.0,20.0)	[10.0,15.0)	<10.0	[5.23,30.0]
生态环境系统		水功能区达标率 $S_1/\%$	+	≥ 80.0	[70.0,80.0)	[60.0,70.0)	[50.0,60.0)	<50.0	[14.8,100.0]
		饮用水水源达标率 $S_2/\%$	+	≥ 90.0	[80.0,90.0)	[70.0,80.0)	[60.0,70.0)	<60.0	[50.0,100.0]
		河道外生态用水比例 $S_3/\%$	+	≥ 4.00	[3.00,4.00)	[2.00,3.00)	[1.00,2.00)	<1.00	[0,5.00]
		城市污水处理率 $S_4/\%$	+	≥ 90.0	[80.0,90.0)	[70.0,80.0)	[60.0,70.0)	<60.0	[36.09,94.10]
		工为污径比 $S_5/\%$	-	<2.00	[2.00,3.00)	[3.00,4.00)	[4.00,5.00)	≥ 5.00	[0.51,7.34]

注:“+/-”分别用于表示正、负向指标,指标值越大/越小,其水资源短缺风险越低。

2 评价模型

2.1 足球联赛竞争算法与投影寻踪技术

足球联赛竞争(SLC)算法^[23-24]是 N. Moosavian 等

人受足球联赛球队和球员间竞争启发而提出的一种新型群体优化算法,该算法利用固定球员和替补球员组成若干球队,球队之间、球员之间相互竞争,并采取积分排名方式将球队排名最前的球员位置作为待优化问

题的最优解^[23-26]。该算法已在水资源承载能力^[25]、利用效率评价^[26]等方面得到应用。足球联赛竞争算法数学描述详见文献[23-26]。

投影寻踪(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,目前已在洪害评估^[18]、水源地安全保障评价^[19]、水量分配^[20]、水资源脆弱性评价^[21]及水安全评价^[22]等方面得到广泛应用。投影寻踪算法描述详见文献[18-22]。

2.2 云模型简介

云模型是基于正态分布与钟形隶属函数,用来实现客观世界中某个现象和事物的定性与定量相互发生不确定性转换的数学模型,能够有效解决水资源短缺风险评价过程中的模糊性、随机性和离散性问题,具有较广的普适性特征^[7-8]。云模型通过期望值 Ex (Ex 代表这个定性概念的中心值)、熵值 En (En 表示对定性概念模糊度的度量)和超熵值 He (He 是对 Ex 的不确定性度量,由熵的随机性和模糊性共同决定,反映云滴的离散程度)将水资源短缺风险评价过程中的模糊性、随机性和离散性有机结合起来,实现不确定性语言和定量数量之间的转换^[7]。云模型计算过程如下:

(1)采用云模型正向发生器生成正态随机数 $En_i = \text{norm}(En, He^2)$, 其中,值 $\text{norm}()$ 表示正态分布函数。

(2)再次生成正态随机数 $x_i = \text{norm}(Ex, En^2)$, 其中, En^2 表示方差。

(3) 计算 $\mu = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2En^2}}$, (x_i, μ_i) 构建数域中任意一个云滴。

(4)重复上述步骤,直至产生设定的 n 个云滴为止。

2.3 水资源短缺风险评价实现步骤

(1)评价指标权重的确定

Step1:基于表1,利用随机内插的方法在水资源短缺风险评价指标各阈值间随机生成10组数据样本,共随机生成50组数据样本,利用式(1)、式(2)分别对正向、负向指标进行处理。

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

$$x(i, j) = (x_{\max}(j) - x(i, j)) / (x_{\max}(j) - x_{\min}(j)) \quad (2)$$

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。

Step2:利用一致性处理后的样本构建投影目标函数 $Q(a)$ 。设置足球联赛竞争算法最大迭代次数 T 、球员

数量(种群数) M 、联赛球队数、固定球员数、替补球员数和变异概率等算法参数,利用足球联赛竞争算法对 $Q(a)$ 投影向量进行优化求解。

Step3:随机生成球员(种群),计算投影目标函数 $Q(a)$ 值,按照积分对球队进行排名,找到并保存当前球技最好的球员空间位置。

Step4:令 $t=t+1$,对足球联赛竞争算法进行竞争、挑衅、变异和替补操作。

Step5:将最差球队从第一级联赛中淘汰,而将新球队引入到第一级联赛。

Step6:重复 Step 3~ Step 5 直至满足终止准则。

Step7:输出球技最好球员的适应度值及所处空间位置,即最优 $Q(a)$ 适应度值和最佳投影向量 $a = [a_1, a_2, \dots, a_{20}]$, 归一化后即为各评价指标权重 $w = [w_1, w_2, \dots, w_{20}]$ 。

Step8:同理,利用传统粒子群算法、布谷鸟搜索算法和差分进化算法优化目标函数 $Q(a)$,优化结果与足球联赛竞争算法的优化结果进行比较,以验证足球联赛竞争算法的优化性能。

(2)隶属度矩阵的确定

Step1:云模型参数的计算。基于表1,通过式(3)~式(6)计算云模型特征参数(Ex, En, He)。

$$Ex = (x_{ij}^1 + x_{ij}^2) / 2 \quad (3)$$

$$\exp[-(x_{ij}^1 + x_{ij}^2) / (8(En)^2)] = 0.5 \quad (4)$$

$$En = (x_{ij}^1 + x_{ij}^2) / 2.355 \quad (5)$$

$$He = k \quad (6)$$

式中: x_{ij}^1 、 x_{ij}^2 分别为某一等级标准区间 $[x_{ij}^1, x_{ij}^2]$; k 为常数,根据经验取值,反映云模型的离散程度。

通过上述方法可以确定水资源短缺风险分级云模型的特征参数(Ex, En, He)。限于篇幅,仅给出水资源系统云模型特征参数(Ex, En, He)和人均水资源量、产水量模数和产水系数的正态云图,见表2和图1。

Step2:隶属度矩阵的确定。利用云模型的特征参数(Ex, En, He)和 $\mu = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2En^2}}$ 可计算出16个州市各指标数据 x_i 隶属于某分级云的隶属度 U 。

(3)水资源短缺风险评价

基于上述计算获得的各评价指标权重 $w = [w_1, w_2, \dots, w_{20}]$ 和各评价区域隶属度 U ,利用 $V = w^T U$ 计算获得 $V = [V_1, V_2, \dots, V_5]$ 。结合最大确定度原则,获得水资源短缺风险评价分级。

表2 水资源系统正态云模型特征参数

Table2 The characteristic parameters of the normal cloud model for water resources system

分级	$W_1/10^4\text{m}^3$	$W_2/10^4\text{m}^3\cdot\text{km}^{-2}$	W_3	$W_4/\%$	$W_5/\%$
1级/低风险	(0.7838,0.1836,0.001)	(0.8841,0.0984,0.001)	(0.8923,0.0915,0.001)	(0.8400,0.1359,0.001)	(0.8000,0.1699,0.001)
2级/较低风险	(0.4595,0.0918,0.001)	(0.6509,0.0997,0.001)	(0.6865,0.0833,0.001)	(0.5951,0.0722,0.001)	(0.55,0.0425,0.001)
3级/中等风险	(0.2433,0.0918,0.001)	(0.4161,0.0997,0.001)	(0.4903,0.0833,0.001)	(0.4250,0.0722,0.001)	(0.45,0.0425,0.001)
4级/较高风险	(0.0812,0.0459,0.001)	(0.1813,0.0997,0.001)	(0.2942,0.0833,0.001)	(0.2550,0.0722,0.001)	(0.30,0.0849,0.001)
5级/高风险	(0.0136,0.0115,0.001)	(0.0319,0.0271,0.001)	(0.0981,0.0833,0.001)	(0.085,0.0722,0.001)	(0.10,0.0849,0.001)

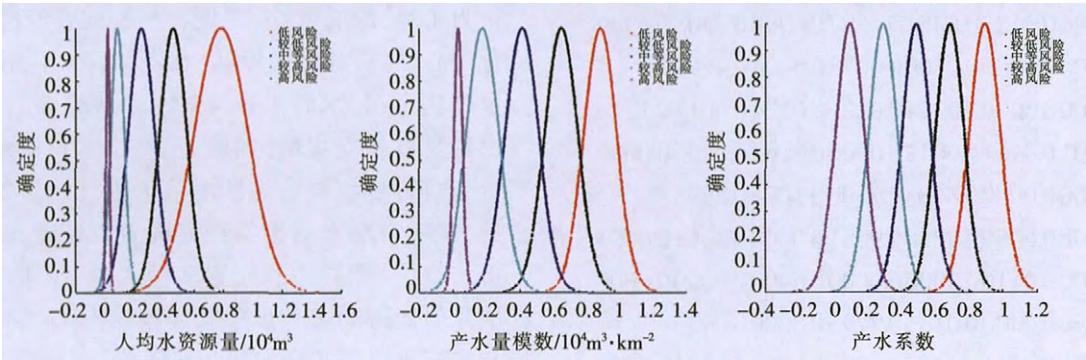


图1 水资源短缺风险评价部分指标等级云图

Fig.1 Water shortage risk assessment part index level cloud map

3 应用实例

3.1 研究区概况与数据来源

云南省地处我国西南边陲,辖昆明、曲靖等 16 个州(市),国土面积 $39\times10^4\text{km}^2$,分属长江、珠江、红河、澜沧江、怒江、伊洛瓦底江 6 大水系,多年平均年降水量 1 280mm,水资源总量 $2\,220\times10^8\text{m}^3$ 。云南省水资源总量虽然丰富,但由于云南省地形地貌复杂、水资源开发利用难度大,加之降水时空分布极不均匀,造成各州市间天然水资源量差异大、经济社会发展不平衡、水源开发和供水能力差距明显、生态环境状况优劣突显。因此,研究云南省各区域水资源短缺风险程度,对于科学提出水资源短缺应对措施,合理降低水资源短缺风险,实现水资源可持续利用支撑区域经济社会发展、保护生态环境具有十分重要的意义。限于篇幅,2015 年基于表 1 的各州市研究数据从略。

3.2 算法验证及对比

基于上述水资源短缺风险评价实现步骤,利用足球联赛竞争算法、粒子群算法、布谷鸟搜索算法和差分进化算法对 $Q(a)$ 进行优化求解。足球联赛竞争算法参数设置如下:最大迭代次数 $T=100$,联赛球队数=5,固定球员和替补球员=11,球员数量(种群数) $M=\text{联赛球队数}\times(\text{固定球员}+\text{替补球员})=110$,变异概率=0.15。其

他 3 种算法的最大迭代次数 T 均设置为 100,种群规模 M 均设置为 110,其他参数设置参见文献^[18-22,25-26]。4 种算法基于 M 语言实现,分别对目标函数 $Q(a)$ 独立运行 30 次,分别统计最优适应度值等 4 个评价指标,见表 3。

表3 4种算法在目标函数上的优化结果

Table3 The optimization results of the four algorithms on the objective function

算法	最优适应值	最差适应值	平均适应度值	标准差
足球联赛竞争算法	39510.355000	39510.355000	39510.355000	1.46E-11
粒子群算法	38838.617000	38374.145000	38665.507636	1.30E+02
布谷鸟搜索算法	39497.874000	39487.151000	39492.13705	3.5005
差分进化算法	39476.038000	39458.396000	39496.25655	4.9801

从 $Q(a)$ 30 次寻优结果来看,足球联赛竞争算法获得的最优、最差和平均适应度值均为 39510.355000,寻优结果均优于其他算法,表明足球联赛竞争算法对于高维优化问题具有较好的求解精度和全局极值寻优能力。

3.3 评价结果与分析

(1)指标权重计算。通过足球联赛竞争算法优化

$Q(a)$, 获得各评价指标最佳投影向量, 经归一化处理后即为各评价指标权重。经计算, 各评价指标权重 $w=[0.0492, 0.0554, 0.0510, 0.0475, 0.0522, 0.0515, 0.0513, 0.0506, 0.0504, 0.0513, 0.0433, 0.0566, 0.0507, 0.0495, 0.0512, 0.0416, 0.0510, 0.0519, 0.0470, 0.0470]$ 。

(2) 隶属度计算。以昆明市为例, 基于上述隶属度矩阵确定方法, 经计算, 昆明市隶属度矩阵 U 确定如下

$$U_{\text{昆明}} = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0045 & 0.7344 & 0.0000 & 0.9542 \\ 0.9586 & 0.9523 & 0.6351 & 0.4997 & 0.4998 & 0.9408 & 0.4999 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.2100 & 0.0078 & 0.5004 & 0.4796 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0224 & 0.0201 & 0.0234 & 0.0011 & 0.1224 \\ 0.0301 & 0.0467 & 0.0042 & 0.0000 & 0.0062 & 0.0206 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.8408 & 0.7500 & 0.1005 & 0.5298 \\ 0.0298 & 0.0080 & 0.9228 & 0.9081 & 0.0000 & 0.4061 & 0.0001 \\ 0.0000 & 0.0110 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0136 & 0.0000 & 0.0131 & 0.2793 & 0.0000 & 0.0023 \\ 0.2091 & 0.7541 & 0.1485 & 0.1597 & 0.0001 & 0.5983 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0048 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.8475 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0004 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.4969 & 0.0229 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0034 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.1947 & 0.9872 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0002 \end{bmatrix}^T$$

同理, 可计算其他州市隶属度矩阵。

(3) 分级评价。利用 $V=w^TU$ 计算获得 $V=[V_1, V_2, \cdots, V_5]$, 并依据最大确定度原则, 确定水资源短缺风险评价分级, 并与投影寻踪方法、模糊综合评价法的评价结果进行对比(限于篇幅, 投影寻踪法、模糊综合评价法的评价过程从略, 2 种评价方法指标权重均采用足球联赛竞争算法确定的权重), 结果见表 4。

从表 4 可以得出以下结论:

(1) 昆明市、怒江州和迪庆州水资源短缺风险评价为 1 级, 即低风险。昆明市是云南省经济、政治和文化中心, 经济社会较发达, 水资源开发利用程度高, 用水结构合理, 水源工程与供水系统完备, 污水处理及回用具有相当规模, 因此, 昆明市水资源短缺风险评价为“低风险”符合昆明实际。但受水资源条件的制约, 昆明市在水资源系统方面表现较差, 通过控制城市人口, 合理利用和配置多种水源, 昆明市水资源短缺风险能得到进一步降低, 但降低空间有限。怒江州和迪庆州经济社会发展相对滞后, 但在水资源系统、生态环境系统中的水功能区和水源地达标率、经济社会系统中的人口密度、第三产业比重等方面表现突出, 水资源短缺风险评价为“低风险”符合实际。可通过大力发展经济, 合理开发利用水资源、提高水资源利用效率和效益, 怒江州和迪庆州水资源短缺风险能得到有效降低。

表4 足球联赛竞争算法-投影寻踪-云模型水资源短缺风险评价结果

Table4 The water shortage risk evaluation results of the soccer league competition algorithm-projection pursuit-cloud model

评价区域	确定度					本文方法 评价结果	投影寻踪	模糊综合 评价法
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级			
昆明市	0.3961	0.1266	0.1295	0.1417	0.0769	1 级	1 级	1 级
曲靖市	0.1841	0.2540	0.2933	0.1722	0.0910	3 级	2 级	2 级
玉溪市	0.1092	0.3418	0.2593	0.2725	0.0634	2 级	2 级	2 级
保山市	0.1286	0.2727	0.1954	0.2443	0.1785	2 级	2 级	2 级
昭通市	0.1651	0.1406	0.3598	0.2029	0.1952	3 级	3 级	3 级
丽江市	0.1558	0.2727	0.2379	0.2805	0.1095	4 级	3 级	4 级
普洱市	0.1894	0.1771	0.2184	0.2177	0.2163	3 级	3 级	3 级
临沧市	0.0871	0.2290	0.2617	0.2477	0.2364	3 级	3 级	3 级
楚雄州	0.2298	0.2629	0.1469	0.2916	0.0927	4 级	4 级	4 级
红河州	0.0922	0.2121	0.4192	0.2145	0.0773	3 级	3 级	3 级
文山州	0.1379	0.2916	0.2705	0.2360	0.1240	2 级	3 级	2 级
西双版纳	0.2002	0.1947	0.2691	0.2915	0.0888	4 级	4 级	4 级
大理州	0.1250	0.2599	0.2571	0.3815	0.0376	4 级	4 级	4 级
德宏州	0.2235	0.2591	0.1262	0.2154	0.1229	2 级	2 级	1 级
怒江州	0.2850	0.0602	0.0904	0.1397	0.2419	1 级	1 级	1 级
迪庆州	0.2161	0.1193	0.2138	0.1237	0.1730	1 级	1 级	1 级

玉溪市、保山市、文山州和德宏州评价为2级,即较低风险。玉溪市经济社会相对发达,用水结构合理,水源工程与供水系统完备,但在水资源系统和生态环境系统表现差强人意,水资源短缺风险评价为较低风险合理。可通过加大水环境综合整治力度,有效核减污染物入河量,水资源短缺风险能得到进一步降低;保山市、文山州和德宏州经济社会发展相对滞后,通过分析各指标所属风险评价分级,结合最大确定度原则,有针对性地对其隶属度低于3级的指标提出改进及治理对策措施,水资源短缺风险能得到进一步降低。

曲靖市、昭通市、普洱市、临沧市和红河州评价为3级,即中等风险。曲靖市经济社会相对发达,用水效率水平相对较高,用水结构基本合理,但在人均GDP、供水率、农业节水灌溉率、水功能区达标率、河道外生态用水比例等方面表现较差,水资源短缺风险评价为中等风险与实际相符。昭通市、普洱市、临沧市和红河州经济社会发展相对滞后,主要在人均GDP、万元GDP用水量等经济社会系统方面,以及蓄水工程模数、供水率等水源储备和供水系统方面表现较差,水资源短缺风险评价为中等风险符合客观实际,可通过发展经济、大力推进节水型社会建设等举措,水资源短缺风险有较大的降低空间。

其余丽江市、楚雄州、西双版纳和大理州评价为4级,即较高风险。其中,丽江市、西双版纳和大理州主要在经济社会系统、水源储备和供水系统两方面表现较差,水资源短缺风险评价为4级合理;楚雄州虽然在节水方面表现突出,但由于受水资源禀赋条件的制约,其在经济社会系统和生态环境系统两方面表现不足,导致水资源短缺风险评价为4级。此4州市可通过发展经济、合理开发利用水资源、改善供水系统、加大水污染防治力度,水资源短缺风险有较大降低的空间。

(2)从表5评价结果来看,本文方法与投影寻踪法仅在曲靖市、丽江市和文山州有1个级别的差异;与模糊综合评价法仅在曲靖市、德宏州有1个级别的差异。3种方法评价结果基本一致,表明足球联赛竞争算法-投影寻踪-云模型用于水资源短缺风险评价中是合理可行的。

(3)投影寻踪评价法虽然能获得科学、客观的指标权重,但忽略了水资源风险短缺综合评价的过程中既有评价指标隶属程度的不确定性,又有评价结果等级评定的不确定性;模糊综合评价法通过模糊数学的隶

属度理论把定性评价转化为定量评价,其隶属函数一经表达为精确数值后,就不能很好地体现水资源风险评价的模糊性,势必影响评价结果;云模型方法兼具模糊性和随机性,能较客观精确地实现定性定量之间的转化,但不足之处在于如何客观获取各指标权重。本文提出的足球联赛竞争算法-投影寻踪-云模型融合了足球联赛竞争算法、投影寻踪和云模型优点,其水资源短缺风险评价结果更科学、合理。

4 结论

(1)鉴于云模型可以识别随机性和模糊性的特点,将正态云模型引入到水资源短缺风险评价中。结合足球联赛竞争算法、投影寻踪和云模型优点,提出足球联赛竞争算法-投影寻踪-云模型水资源短缺风险评价方法,通过实例应用及与投影寻踪法、模糊综合评价法的评价结果进行对比,验证了本文方法的可行性。

(2)构建具有云南区域特征的水资源短缺风险评价指标体系和分级标准,并提出足球联赛竞争算法-投影寻踪指标权重的确定方法。通过在指标等级阈值间随机生成数据样本构建目标函数,利用足球联赛竞争算法、粒子群算法、布谷鸟搜索算法和差分进化算法对目标函数进行寻优及对比,通过应用实例验证了足球联赛竞争算法寻优精度高于传统粒子群算法等3种算法,具有较好的求解精度和稳健性能。同时验证了足球联赛竞争算法-投影寻踪指标权重确定方法的科学性。

(3)利用足球联赛竞争算法-投影寻踪-正态云模型对云南省16个州(市)水资源短缺风险进行评价,评价结果为昆明市、怒江州和迪庆州水资源风险评价为低风险;玉溪市、保山市、文山州和德宏州评价为较低风险;曲靖市、昭通市、普洱市、临沧市和红河州评价为中等风险;其余州市评价为较高风险。

参考文献:

- [1] 崔小红,王锦,祖培福,等. 层次分析法在水资源短缺评价中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2014,(6):270-273. (CUI Xiao, WANG Di, ZU Peifu, et al. Application of AHP in evaluation of water resources shortage [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2014(6):270-273. (in Chinese))
- [2] 秦晋,刘树峰. 吉林省水资源短缺风险等级评价及预测[J]. 人民长江, 2016,47(21):39-43. (QIN Jin, LIU Shufeng. Evaluation and prediction of risk level of water resources shortage of Jinlin province [J]. Yangtze River, 2016,47(21):39-43. (in Chinese))

- [3] 杜向润,冯民权,张建龙. 基于改进信息扩散理论的水资源短缺风险评估研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014,32(6):188-194. (DU Xiangrun, FENG Minquan, ZHANG Jianlong. Evaluation research of water resources shortage risk based on improved information diffusion theory [J]. Agriculture Research in the ARID Areas, 2014,32(6):188-194. (in Chinese))
- [4] 张中旺,周萍. 基于主成分分析的襄阳市水资源短缺风险评估[J]. 中国农学通报, 2016,32(2):92-98. (ZHANG Zhongwang, ZHOU Ping. Assessment of water shortage risk in Xiangyang city based on principal component analysis [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016,32(2):92-98. (in Chinese))
- [5] 陈大春. 基于模糊集对法的乌鲁木齐市水资源短缺风险评估[J]. 水电能源科学, 2013,31(12):25-28. (CHEN Dachun. Risk evaluation of water resources shortage in Urumqi based on SPA VFS [J]. Hydroelectric Energy Science, 2013,31(12):25-28. (in Chinese))
- [6] 张中旺,常国瑞. 中线调水后汉江生态经济带水资源短缺风险评估[J]. 人民长江, 2016,47(6):16-21. (ZHANG Zhongwang, CHANG Guorui. Risk assessment of water resource shortage in Hanjiang River ecological economic zone after implementing middle route project of south to north water diversion [J]. Yangtze River, 2016,47(6):16-21. (in Chinese))
- [7] 万昔超,殷伟量,孙鹏,等. 基于云模型的暴雨洪涝灾害风险分区评价[J]. 自然灾害学报, 2017,26(4):77-83. (WAN Xichao, YIN Weiliang, SUN Peng, et al. Risk division assessment of rainstorm-flood disasters based on cloud model [J]. Journal of Natural Disasters, 2017,(4):77-83. (in Chinese))
- [8] 石晓静,查小春,刘嘉慧,等. 基于云模型的汉江上游安康市洪水灾害风险评估[J]. 水利水电科技进展, 2017,37(3):29-34. (SHI Xiaojing, CHA Xiaochun, LIU Jiahui, et al. Cloud model-based risk assessment of flood disasters in Ankang city on upper reaches of Hanjiang River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017,37(3):29-34. (in Chinese))
- [9] 付文艺. 基于熵权-正态云模型的地下水水质综合评价[J]. 人民黄河, 2016,38(5):68-71+76. (FU Wenyi. Water quality evaluation based on entropy weight-normal cloud model [J]. Yellow River, 2016,38(5):68-71+76. (in Chinese))
- [10] 任飞鹏,侯炳江,余学成. 正态云模型在地下水水质综合评价中的应用[J]. 人民长江, 2016,47(21):15-20. (REN Feipeng, HOU Bingjiang, SHE Xuecheng. Application of normal cloud model in groundwater quality evaluation [J]. Yangtze River, 2016,47(21):15-20. (in Chinese))
- [11] 曾志雄,田海,黄珏皓. 基于云模型的膨胀土胀缩等级分类[J]. 长江科学院院报, 2016,33(2):80-85. (ZENG Zhixiong, TIAN Hai, HUANG Juehao. Classification of swelling-shrinkage grade of expansive soils based on cloud model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research INSTI, 2016,33(2):80-85. (in Chinese))
- [12] 黄显峰,刘展志,方国华. 基于云模型的水利现代化评价方法与应用[J]. 水利水电科技进展, 2017,37(6):54-61. (HUANG Xianfeng, LIU Zhanzhi, FANG Guohua. Evaluation and application of water conservancy modernization index system based on a cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017,37(6):54-61. (in Chinese))
- [13] 乔丹颖,刘凌,闫峰. 基于云模型的中运河水安全评价[J]. 水资源保护, 2015,31(2):26-29. (QIAO Danying, LIU Ling, YAN Feng. Assessment on water security of Zhong canal based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2015,31(2):26-29. (in Chinese))
- [14] 周云哲,粟晓玲. 基于指标规范化的正态云模型的水安全评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017,38(4):18-24,66. (ZHOU Yunzhe, SU Xiaoling. Water security evaluation based on normal cloud model with normalized indexes [J]. Journal of North China University of Water Resources and Hydropower (Natural Science), 2017,38(4):18-24,66. (in Chinese))
- [15] 耿芳,董增川,徐伟. 基于云模型的黑龙江上中游河流健康评价[J]. 水资源保护, 2016,32(6):131-135. (GENG Fang, DONG Zengchuan, XU Wei. River health assessment of upper and middle reaches of Heilongjiang River based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2016,32(6):131-135. (in Chinese))
- [16] 李奎,邢玉玲,谭炳卿,等. 基于云模型的黄河流域火电行业用水定额评估[J]. 人民黄河, 2017,39(5):64-68. (LI Kui, XING Yuling, TAN Bingqing, et al. Evaluation of thermal power industry water quota in the Yellow River basin based on cloud model [J]. Yellow River, 2017,39(5):64-68. (in Chinese))
- [17] 陈杰,孟锦根. 岩爆烈度分级预测的云模型法及其应用[J]. 人民长江, 2016,47(15): 82-86. (CHEN Jie, MENG Jingen. Normal cloud model for rockburst intensity forecast and its application [J]. Yangtze River, 2016,47(15):82-86. (in Chinese))
- [18] 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. (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))
- [19] 崔东文,郭荣. SSO-PP模型在水源地安全保障达标评价中的应用[J]. 水利经济, 2015,33(5):8-13. (CUI Dongwen, GUO Rong. Application of SSO-PP model in security standard evaluation of water sources [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2015,33(5):8-13. (in Chinese))
- [20] 崔东文,金波. 基于新型蝙蝠算法-投影寻踪模型的文山州水量分配方法[J]. 水利水电科技进展, 2017,37(2):55-62. (CUI Dongwen, JIN Bo. A water allocation method based on novel bat algorithm-

- projection pursuit model and its application in Wenshan autonomous prefecture [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017,37(2):55–62. (in Chinese))
- [21] 崔东文. 蚁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. (CUI Dongwen. Application of moth swarm algorithm and projection pursuit coupling model to regional water resources vulnerability assessment [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Science)*, 2017,39(4):10–18. (in Chinese))
- [22] 崔东文, 郭荣. 基于混沌闪电搜索算法-最大熵投影寻踪模型的区域水安全评价[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2017,38(3):17–26. (CUI Dongwen, GUO Rong. Assessment on regional water safety using the model of chaos lightning search algorithm optimized by maximum entropy projection pursuit [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Hydropower (Natural Science)*, 2017,38(3):17–26. (in Chinese))
- [23] N. Moosavian, B.K. Roodsari. Soccer league competition algorithm: a new method for solving systems of nonlinear equations [J]. *International Journal of Intelligence Science*, 2014,(4):7–16.
- [24] N. Moosavian, B.K. Roodsari. Soccer league competition algorithm: a novel meta-heuristic algorithm for optimal design of water distribution networks [J]. *Swarm Evol. Comput.*, 2014,(17):14–24.
- [25] 崔东文, 金波. 足球联赛竞争算法-投影寻踪模型在区域水资源承载力评价中的应用[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2018,40(1):7–13. (CUI Dongwen, JIN Bo. Evaluation of regional water resources carrying capacity based on SLC-PP model [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Science)*, 2018,40(1):7–13. (in Chinese))
- [26] 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. (CUI Dongwen. SLC-PP model and its application to evaluation of water use efficiency in Wenshan prefecture in last ten years [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017,45(2):129–136. (in Chinese))

Evaluation of Water Resources Shortage Risk Based on Soccer League Competition Algorithm-Projection Pursuit-Cloud Model

LI Ju¹, CUI Dongwen², YUAN Shutang³

(1. *Yunnan Open University, Kunming 650223, China;*

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

3. *Yunnan Bureau of Hydrology and Water Resources, Kunming 650106, China)*

Abstract: To objectively measure the randomness and ambiguity in the process of water scarcity risk assessment, the normal cloud model was introduced to the assessment of water scarcity risk, and a competition algorithm for football leagues-projection pursuit-normal cloud evaluation model was established to use for the various cities in Yunnan Province. Water shortage risk assessment was used as an example to study. Twenty indicators were selected from the water resources system to establish the water scarcity risk assessment index system and grading standards, and the cloud generator was used to calculate the degree of membership of the water shortage risk grading evaluation index; the sample structure was randomly interpolated between the grading standard thresholds. Projection pursuit optimizes the objective function, uses the football league competition algorithm, particle swarm algorithm, cuckoo search algorithm and differential evolution algorithm to optimize the projection pursuit objective function and compare them, and gives each index through the soccer league competition algorithm-projection pursuit method. According to the degree of membership matrix and weight matrix to calculate the degree of water shortage risk assessment of the degree of certainty and make evaluation, the results were compared with the projection pursuit method and fuzzy comprehensive evaluation method. The results show that the accuracy of the soccer league competition algorithm is higher than that of the particle swarm algorithm. Risk assessments for water resources in Kunming, Nuijiang, and Diqing indicate a low risk; Yuxi, Baoshan, Wenshan, and Dehong were assessed as lower risk; Qujing, Zhaotong, Puer, Linyi, and Honghe were assessed as moderate risk; the other cities were rated as higher risk, and the evaluation results were basically consistent with the projection pursuit method and fuzzy evaluation method. The football league competition algorithm-projection pursuit-normal cloud assessment model is both fuzzy and random, it can not only reflect the qualitative concept of water shortage risk assessment rating, but also reflect the uncertainty of the degree of membership.

Key words: water resources shortage; risk assessment; normal cloud model; index system; soccer league competition algorithm; projection pursuit