

基于正态云相似度度量的城市生态环境质量综合评价

刘星星^{1*}, 张延飞^{2#}, 官加俊¹, 陈萍¹

¹东华理工大学理学院, 江西 南昌

²东华理工大学抚州师范学院, 江西 抚州

收稿日期: 2024年6月11日; 录用日期: 2024年7月4日; 发布日期: 2024年7月12日

摘要

近年来云模型相关理论发展, 其与综合评价模型之间的组合应用也愈发广泛。本文提出构建基于正态云相似度度量的城市生态环境质量综合评价模型, 通过改进正态云组合赋权方法, 进行权重信息的有效解读与融合, 提出一种兼顾距离与形状的云相似度度量方法, 计算得到云模型间相似度大小确定最终评价结果。将该模型实际应用于长三角中心区城市群的生态环境质量综合评价, 结果表明: 该城市群在2021年经济发展及社会保障整体发展水平属等级“一般”, 资源利用及生态健康整体发展水平属等级“良”, 近半数城市综合评价等级属“良”且城市群整体发展趋势向“良”。

关键词

正态云相似度度量, 生态环境质量评价, 改进正态云组合赋权, 博弈论组合赋权, 模糊贴近度

Comprehensive Evaluation of Urban Ecological Environment Quality Based on the Normal Cloud Similarity Measurement

Xingxing Liu^{1*}, Yanfei Zhang^{2#}, Jiajun Guan¹, Ping Chen¹

¹School of Science, East China University of Technology, Nanchang Jiangxi

²Fuzhou Normal College, East China University of Technology, Fuzhou Jiangxi

Received: Jun. 11th, 2024; accepted: Jul. 4th, 2024; published: Jul. 12th, 2024

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

The development of cloud modeling-related theories has led to an increasingly widespread combination of cloud modeling and comprehensive evaluation models in recent years. This article proposes the construction of a comprehensive evaluation model for urban ecological environment quality based on normal cloud similarity measurement. By improving the normal cloud combination weighting method for effective interpretation and fusion of weight information, a cloud similarity measurement method that takes into account distance and shape is proposed. The similarity size between cloud models is calculated to determine the final evaluation result. The model was actually applied to the comprehensive evaluation of ecological environment quality in the central urban agglomeration of the Yangtze River Delta. The results showed that in 2021, the overall development level of economic development and social security in the urban agglomeration was rated as "average", the overall development level of resource utilization and ecological health was rated as "good", and nearly half of the cities were rated as "good" in the comprehensive evaluation, and the overall development trend of the urban agglomeration was towards "good".

Keywords

Normal Cloud Similarity Measurement, Ecological Environment Quality Evaluation, Improve the Weighting of Normal Cloud Combinations, Game Theory Combination Weighting, Fuzzy Closeness

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

李德毅[1] [2]院士最早提出并系统定义了云模型的概念，定义指出云模型是用语言值描述的定性概念与其相对应定量表示之间的不确定性转换模型，经过刘常昱[3]、邸凯昌[4]、冯朝一[5] [6]等人完善发展，云模型相关基础理论已发展成为较为完善的理论体系。

目前云模型与综合评价模型的组合应用已发展成较为成熟的方法体系，被广泛应用于生态环境、经济及社会等诸多领域。例如：任飞鹏等[7]提出构建基于组合赋权 - 正态云的综合评价模型以解决地下水水质综合评价问题，应用实例表明算法的有效性。宋亚宇[8]提出构建基于云模型的高速公路服务质量综合评价模型，为高速公路服务质量评价研究提供理论参考。徐吉辉等[9]提出构建基于云模型的航空产品危害性评估模型并结合实例验证了模型准确性。Zhang 等[10]提出构建基于组合赋权与云模型的评价模型以解决设备管理绩效评估。Zheng 等[11]提出构建基于云模型时间序列分析的服务选择模型，实验结果表明该模型推荐准确性相较于传统推荐算法在准确性上有所提高。Song 等[12]提出构建基于云模型与非线性模糊层次分析法相结合的生产安全性评价模型，通过仿真实验验证模型的有效性。

实际应用中云模型间相似度度量算法的有效性直接决定最终评价结果准确性。随着研究发展，现已形成较为成熟的云模型相似度度量体系。主要有：张勇等[13]提出基于云滴的相似度度量，蔡绍滨等[14]提出基于区间的云相似度比较算法，李海林等[15]分别提出基于期望曲线、以及最大边界曲线的正态云相似度度量算法，龚艳冰等[16]提出基于组合模糊贴近度的正态云相似度度量，汪军等[17]提出兼顾形状与距离的正态云模型相似度度量，黄琼桃等[18] [19]提出基于三角云模型的距离与形状相似度等。

综合目前存在的不同赋权方法下，权重信息的有效融合以及现有云相似度度量算法区分度较低且时间复杂度过高等问题，借鉴龚艳冰[16]提出的正态云组合赋权，在数据标准化处理以及权重样本均值计算两方面做出改进，并结合提出的基于模糊贴近度的正态云模型与云滴方差的正态云相似度度量算法完成综合评价模型构建，并实际应用于长三角中心区城市群生态环境质量综合评价，以验证模型构建的有效性与合理性。

2. 基于正态云相似度度量的城市生态环境质量综合评价模型构建

2.1. 数据收集及处理

选取长三角中心区 27 个城市作为研究对象并参考已有研究文献[20]从经济发展、社会保障、资源利用以及生态健康 4 个准则层选取共计 17 个指标构建城市生态环境质量综合评价指标体系(见表 1)。

Table 1. Urban ecological environment quality evaluation index system

表 1. 城市生态环境质量评价指标体系

准则层	指标层	属性	准则层	指标层	属性
经济发展 A1	万元 GDP 能耗 B11(吨/万元)	—	能源利用 A3	一般工业固体废物综合利用率 B31/%	+
	人均 GDP B12(元/人)	+		工业 SO ₂ 排放量/B32 万吨	—
	R & D 经费内部支出 B13/亿元	+		工业废水排放量 B33/亿吨	—
	第三产业占 GDP 比重 B14/%	+		农作物总播种面积 B34/khm ²	+
社会保障 A2	交通环境平均噪声值 B21/dB	—	生态环境 A4	人均公园绿地面积 B41/m ²	+
	人均道路面积 B22/m ²	+		建成区绿化覆盖率 B42/%	+
	人口密度 B23(人/km ²)	—		环境空气质量优良天数比率 B43/%	+
	城市污水日处理能力 B24 (万立方米)	+		森林覆盖率 B44/%	+
	生活垃圾无害化处理能力 B25 (吨/日)	+		—	—

根据上述建立的城市生态环境质量综合评价指标体系，收集整理了长三角地区 27 个城市如上指标数据，所用数据来源于各省市统计年鉴、环境公报等统计资料，部分缺失数据拟采用插值法进行填补，同时对收集数据进行基于面板数据的标准化处理。

鉴于收集数据同时具备评价方案以及时间属性，因此提出基于评价方案与指标之间，及时间与指标之间的数据标准化。设待评方案 $N(N=1,2,\dots,n)$ ，评价属性指标 $K(K=1,2,\dots,k)$ ，时间跨度 $T(T=1,2,\dots,t)$ ，记 Z_{nk} 为待评方案与指标间的标准化矩阵， Z_{ik} 为时间与指标间的标准化矩阵，对矩阵对应元素乘积开方得到最终标准化矩阵：

$$Z_{njk} = \sqrt{Z_{nk} * Z_{ik}}$$

2.2. 改进正态云组合赋权模型

为了减少权重在评价过程中的不确定性和模糊性，提出改进的正态云组合赋权。利用博弈论组合赋权结果代替权重样本均值，通过云逆向发生器算法得到组合云权重以实现博弈论组合赋权与正态云组合

赋权方法的有效结合以及不同赋权方法下指标权重信息的有效融合，并通过灰色关联分析加权集成完成综合评价云构建。

2.2.1. 正态云组合权重计算

改进正态云组合赋权的主要思想是对属性指标采用多种主客观权重得到权重样本集，将权重样本视为围绕真实权重的一组云滴群[21]，博弈论组合赋权权重结果代替权重样本均值全程参与计算，通过云逆向发生器算法得到组合云权重，具体实现为：

假设给定 n 个评价对象以及 m 个指标属性，则评价对象 A_i 在不同属性指标 U_j 下的标准决策矩阵为 $V = (v_{ij})_{n \times m}$ 。采用 k_1 种主观赋权方法及 k_2 种客观赋权方法，得到权重样本矩阵 $W = \{W_1, W_2, \dots, W_k\}$ ， $(k = k_1 + k_2)$ ，其中 $W_i = \{w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}\}$ ， $(i = 1, 2, \dots, k)$ ，表示第 i 种赋权方法下的权重结果，通过有限权重样本矩阵 W 构成权重矩阵：

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1m} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{i1} & w_{i2} & \cdots & w_{im} \end{bmatrix},$$

利用权重样本矩阵 $W = \{W_1, W_2, \dots, W_k\}$ ，结合博弈论组合赋权得到属性指标权重 W^* ：

$$W^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_m^*),$$

以及权重样本一阶绝对中心距 M 和样本方差 S^2 ：

$$M = (M_1, M_2, \dots, M_m) = \left(\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |w_{i1} - w_1^*|, \dots, \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |w_{im} - w_m^*| \right),$$

$$S^2 = (S_1^2, S_2^2, \dots, S_m^2) = \left(\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (w_{i1} - w_1^*)^2, \dots, \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (w_{im} - w_m^*)^2 \right),$$

得到正态云组合权重 $N_w(Ex, En, He)$ 的期望 Ex ，熵 En 以及超熵 He 分别为：

$$N_{wi} = (Ex_{wi}, En_{wi}, He_{wi}) = \left(w_i^*, \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times M_i, \sqrt{|S_i^2 - En_i^2|} \right),$$

利用逆向云发生器算法生成评价对象中各个指标的不确定组合云权重 $N_w(Ex_w, En_w, He_w)$ ：

$$N_w = \begin{bmatrix} N_{w1} \\ N_{w2} \\ \vdots \\ N_{wm} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} (Ex_{w1}, En_{w1}, He_{w1}) \\ (Ex_{w2}, En_{w2}, He_{w2}) \\ \vdots \\ (Ex_{wm}, En_{wm}, He_{wm}) \end{bmatrix}^T.$$

其中 N_{wm} 为第 m 个指标的权重云， $Ex_{wm}, En_{wm}, He_{wm}$ 分别为第 m 个指标权重云对应的期望、熵以及超熵。

2.2.2. 综合云构建

灰色关联分析是多因素统计分析的一种，基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度判断联系紧密程度。本文通过灰色关联分析得到各评价对象与不同属性指标与之间的灰色关联系数，利用关联系数对权重云进行加权以完成综合云的构建。

根据所需评价的标准数据集得到相应的灰色关联系数矩阵 $G = (g_{ij})_{n \times m}$ ，结合权重云计算得到加权关联系数矩阵 H ：

$$H = \begin{bmatrix} g_{11}N_{w1} & g_{12}N_{w2} & \cdots & g_{1m}N_{wm} \\ g_{21}N_{w1} & g_{22}N_{w2} & \cdots & g_{2m}N_{wm} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n1}N_{w1} & g_{n2}N_{w2} & \cdots & g_{nm}N_{wm} \end{bmatrix},$$

其中 $g_{ij}N_{wj} = (g_{ij}Ex_j, \sqrt{g_{ij}}En_j, \sqrt{g_{ij}}He_j)$, 则对应第 i 个方案下综合评价云模型 $C_i = (Ex_i, En_i, He_i)$ 的数字特征值由下述公式得到:

$$Ex_i = \sum_{j=1}^m g_{ij}Ex_{wj}, En_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m g_{ij}En_{wj}^2}, He_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m g_{ij}He_{wj}^2},$$

得到各方案的综合云为:

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Ex_1, En_1, He_1) \\ (Ex_2, En_2, He_2) \\ \vdots \\ (Ex_n, En_n, He_n) \end{bmatrix},$$

其中 $C_i = (Ex_i, En_i, He_i)$ 表示第 i 个方案的评价云。

2.2.3. 等级标准评价云构建

由于生态环境质量等级属于定性概念, 缺乏定量划分标准, 因此根据生态环境质量指标体系以及属性指标标准, 采用黄金分割率评价云计算规则[22] (见表 2)对等级进行具体划分, 得到等级标准云模型数字特征值, 以便确定评价综合云所属等级。

Table 2. System resulting data of standard experiment

表 2. 标准试验系统结果数据

等级	Ex	En	He
差	$Ex_1 = X_{\min}$	$En_1 = 0.618(X_{\max} - X_{\min})/6$	$He_1 = He_2/0.618$
较差	$Ex_2 = Ex_3 - 0.382(X_{\min} + X_{\max})/2$	$En_2 = 0.382(X_{\max} - X_{\min})/6$	$He_2 = He_3/0.618$
一般	$Ex_3 = (X_{\min} + X_{\max})/2$	$En_3 = 0.618En_2$	$He_3 = 0.005$
良	$Ex_4 = Ex_3 + 0.382(X_{\min} + X_{\max})/2$	$En_4 = 0.382(X_{\max} - X_{\min})/6$	$He_4 = He_3/0.618$
优	$Ex_5 = X_{\max}$	$En_5 = 0.618(X_{\max} - X_{\min})/6$	$He_5 = He_2/0.618$

对指标数据进行标准化处理后, 得到各属性指标标准化数值的取值范围落在区间[0, 1]上, 根据黄金分割率标准评价云计算规则得到差、较差、一般、良以及优 5 个评价等级及对应等级标准云模型数字特征值分别为: 差(0, 0.103, 0.0131), 较差(0.309, 0.0635, 0.0081), 一般(0.5, 0.039, 0.005), 良(0.691, 0.0635, 0.0081), 优(1, 0.103, 0.013), 通过正向云发生器得到城市生态环境质量评价等级标准评价云(见图 1), 其中从左到右的五朵云依次为: “差”、“较差”、“一般”、“良”、“优”五个等级的等级标准评价云图, 通过计算各评价综合云与等级标准评价云间的相似度, 实现城市生态环境质量等级划分, 并获得最终综合评价结果。

2.3. 正态云相似度度量

为了获取最终综合评价结果, 根据提出的基于模糊贴近度的兼顾距离 - 形状的云模型相似度度量方法, 计算综合云与等级标准评价云之间的相似度。算法假定正态云修正期望曲线是一个正态模糊数, 将

正态云模型相似度计算理解为两个正态模糊数的贴近度问题的计算，提出了改进基于模糊贴近度的正态云距离相似度度量方法。具体为：

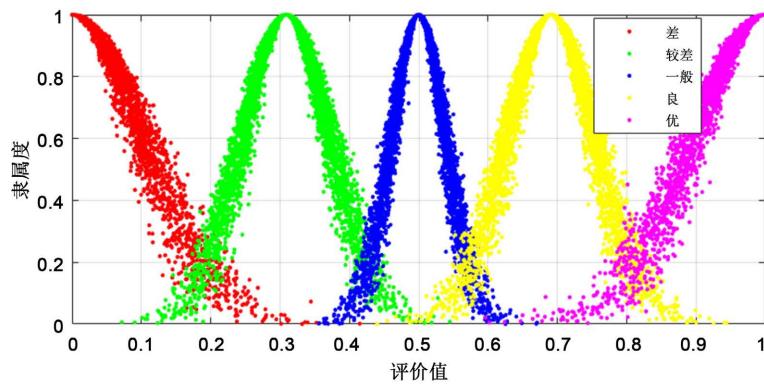


Figure 1. Cloud of urban ecological environment quality grade standard evaluation
图 1. 城市生态环境质量等级标准评价云

在有效区间 $[A, B]$ 上，首先对任意两朵云 $C_1(Ex_1, En_1, He_1)$ 和 $C_2(Ex_2, En_2, He_2)$ 的修正期望曲线没有交点和存在一个交点的情况展开讨论：

若两交点均落在区间 $[A, B]$ 外，两朵云可视为无交点，即 $S_d(C_1, C_2) = 0$ ；若有一个交点 x^* 落在区间 $[A, B]$ 之内，重叠面积由 S_1 和 S_2 两部分组成，如图 2 所示。

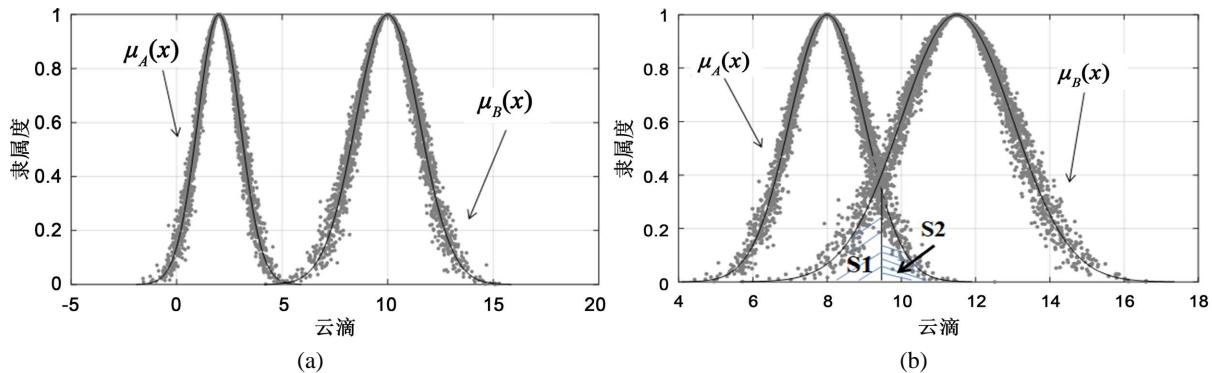


Figure 2. Intersection of two cloud modified expected curves with one or less intersections
图 2. 两朵云修正期望曲线具有一个及以下交点情况的相交

则根据模糊数贴近度的定义以及内积外积性质，定义如下模糊贴近度：

$$C(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} [\tilde{A}(x) \wedge \tilde{B}(x)] dx \right)^2}{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{A}(x) dx \right) * \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{B}(x) dx \right)}}$$

其中 $C(\tilde{A}, \tilde{B})$ 表示两个模糊数重叠面积 \tilde{S} 分别与正态云修正期望曲线与 x 轴所围面积之比的乘积开方并据此得到任意两朵云 C_1 和 C_2 在一个交点下距离相似度。

在有效区间 $[A, B]$ 上，对于任意两朵云 $C_1(Ex_1, En_1, He_1)$ 和 $C_2(Ex_2, En_2, He_2)$ ，若两者间的正态云修正期望曲线存在两个交点，如图 3 所示。

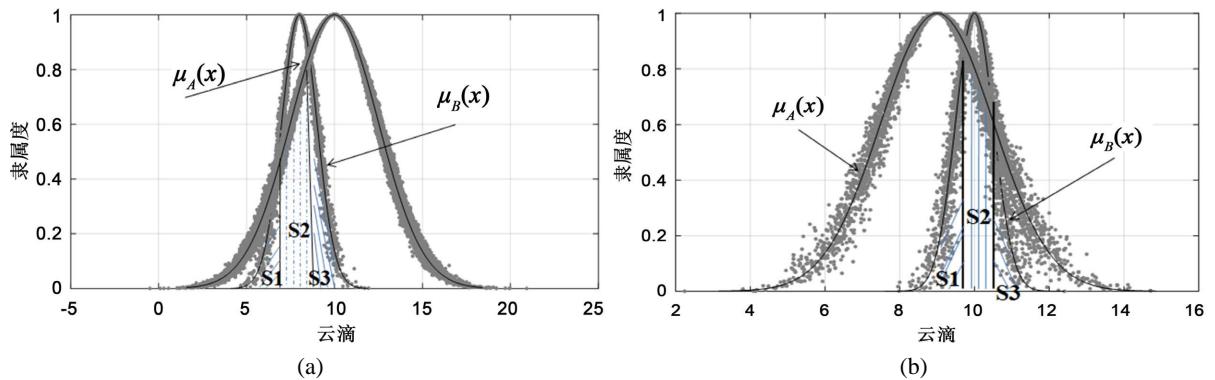


Figure 3. Intersection of two cloud modified expected curves with two intersections
图 3. 两朵云修正期望曲线具有两个交点情况的相交

相应的模糊数贴近度可表示为:

$$C(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{\left(\int_{Ex_2-3En_2}^{x_0^{(1)}} \exp\left(-\left(\frac{x-a_2}{\delta_2}\right)^2\right) dx + \int_{x_0^{(1)}}^{Ex_2+3En_2} \exp\left(-\left(\frac{x-a_2}{\delta_2}\right)^2\right) dx \right)^2}{\left(\int_{Ex_2-3En_2}^{Ex_2+3En_2} \exp\left(-\left(\frac{x-a_2}{\delta_2}\right)^2\right) dx \right) * \left(\int_{Ex_1-3En_1}^{Ex_1+3En_1} \exp\left(-\left(\frac{x-a_1}{\delta_1}\right)^2\right) dx \right)}}$$

考虑另一种情况，若两个交点 $x_0^{(1)}$ 和 $x_0^{(2)}$ 均落在区间 $[A, B]$ ，两朵云的重叠面积如图所示由 S_1 、 S_2 和 S_3 三部分组成，得到模糊贴近度计算公式和上式相同。结合汪军提出的基于云滴方差的形状相似度，并对距离、形状相似度进行集成开方得到最终的云模型综合相似度。

3. 长三角城市群生态环境质量综合评价

根据提出构建的综合评价模型，完成指标数据的收集及标准化处理后，采取层次分析法、序关系法、熵权 TOPSIS 法以及变异系数法等 4 种赋权方法构建权重样本集，根据改进正态云组合赋权评价模型步骤以及正态云相似度度量算法进行 2021 年长三角中心区城市群城市生态环境质量的综合评价。

根据 2.2 节计算公式得到准则层评价云模型数字特征值，结合提出的基于模糊贴近度的正态云相似度度量算法得到 2021 年城市生态环境质量准则层的评价等级结果(见表 3)。

Table 3. Results of criterion evaluation in 2021

表 3. 2021 年准则层评价结果

等级	Ex	En	He
差	$Ex_1 = X_{\min}$	$En_1 = 0.618 * (X_{\max} - X_{\min}) / 6$	$He_1 = He_2 / 0.618$
较差	$Ex_2 = Ex_3 - 0.382 * (X_{\min} + X_{\max}) / 2$	$En_2 = 0.382 * (X_{\max} - X_{\min}) / 6$	$He_2 = He_3 / 0.618$
一般	$Ex_3 = (X_{\min} + X_{\max}) / 2$	$En_3 = 0.618 En_2$	$He_3 = 0.005$
良	$Ex_4 = Ex_3 + 0.382 * (X_{\min} + X_{\max}) / 2$	$En_4 = 0.382 * (X_{\max} - X_{\min}) / 6$	$He_4 = He_3 / 0.618$
优	$Ex_5 = X_{\max}$	$En_5 = 0.618 * (X_{\max} - X_{\min}) / 6$	$He_5 = He_2 / 0.618$

表中给出基于模糊贴近度的正态云模型相似度度量方法下的 2021 年准则层评价等级，得到结论：2021 年长三角中心区城市群经济发展整体水平属等级“一般”，社会保障整体水平属等级“一般”，资

源利用以及生态健康整体水平均属等级“良”。结合表格数据绘制长三角中心区城市 2021 年的生态环境质量准则层评价云图(见图 4)。

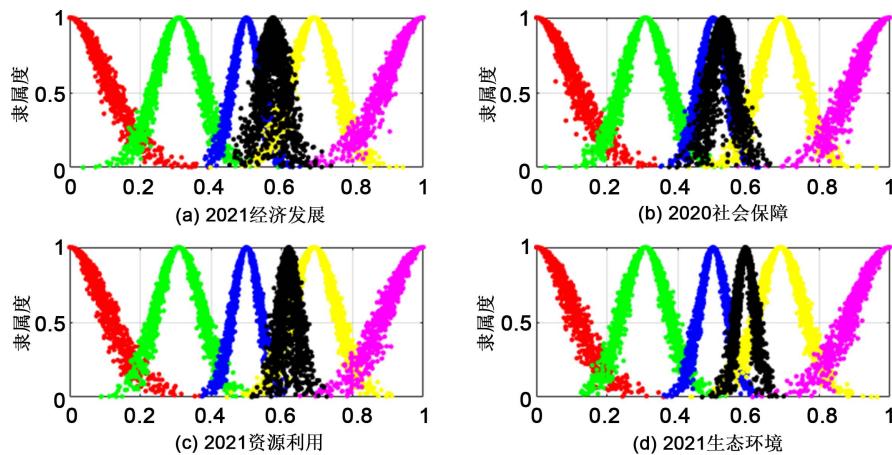


Figure 4. Evaluation cloud map of the criterion layer in 2021

图 4. 2021 年准则层评价云图

图中(a)~(d)分别表示长三角中心区城市群 2021 年经济发展、社会保障、资源利用以及生态环境四个准则层的评价云图, 彩色云层为生态环境质量等级标准评价云图, 从左至右对应等级依次为: “差”、“较差”、“一般”、“良”、“优”, 黑色云层表示根据表 4 中数据绘制的准则层综合评价云。结合图表可知: 图中(a)经济发展等级处于“一般”且略向等级“良”靠近, 但经济发展评价云图中的云滴凝聚度较低, 云滴较为离散但整体呈正态分布状; 图中(b)社会保障等级为“一般”且评价云图云滴围绕等级“一般”呈正态分布状但云滴较为分散, 基本和等级“一般”重合覆盖; 图中(c)资源利用等级处于“一般”和“良”的中间, 整体等级偏向于“良”, 云滴凝聚度略高于经济发展以及社会保障评价云图下的云滴凝聚度; 图中(d)生态环境等级处于“一般”和“良”的中间, 无明显偏向, 云滴凝聚度较高且呈正态分布状。四个准则层相对于等级“良”, 资源利用和生态环境距离偏近, 其次是经济发展, 社会保障相距最远[23]。

据此给出长三角中心区城市在 2021 年的城市生态环境质量综合评价等级以及最终排名结果(见表 4)。

Table 4. Comprehensive evaluation results of urban ecological environment quality in the central area of the Yangtze River Delta in 2021

表 4. 2021 年长三角中心区城市生态环境质量综合评价结果

城市	评价综合云模型	云模型相似度	综合评价结果	排名
上海	(0.6495, 0.0315, 0.0111)	(3.55%, 4.10%, 17.56%, 60.66%, 5.25%)	“良”, “一般”与“良”之间偏向于“良”	2
南京	(0.5800, 0.0331, 0.0104)	(3.53%, 3.90%, 49.50%, 38.30%, 1.77%)	“一般”与“良”之间且略偏于“一般”	13
无锡	(0.5459, 0.0301, 0.0091)	(3.56%, 7.14%, 64.33%, 25.60%, 2.94%)	“一般”与“良”之间且偏向于“一般”	21
常州	(0.5658, 0.0337, 0.0095)	(3.48%, 5.96%, 57.67%, 34.08%, 2.34%)	“一般”与“良”之间且偏向于“一般”	16

续表

苏州	(0.5918, 0.0304, 0.0094)	(3.40%, 0.97%, 39.68%, 39.64%, 1.47%)	“良”，“一般”与“良”之间且偏向于“良”	12
南通	(0.4959, 0.0320, 0.0092)	(3.28%, 16.81%, 88.23%, 15.11%, 3.31%)	“一般”与“良”之间且偏向于“一般”	26
扬州	(0.5780, 0.0334, 0.0091)	(3.47%, 4.24%, 50.53%, 37.61%, 1.80%)	“一般”与“良”之间且略偏于“一般”	14
镇江	(0.5273, 0.0328, 0.0093)	(3.40%, 11.30%, 78.48%, 22.71%, 3.12%)	“一般”与“良”之间且偏向于“一般”	24
盐城	(0.6430, 0.0374, 0.0097)	(3.62%, 3.60%, 24.99%, 63.09%, 6.18%)	“良”，“一般”与“良”之间偏向于“良”	1
泰州	(0.5695, 0.0351, 0.0094)	(3.52%, 6.05%, 57.36%, 36.31%, 2.01%)	“一般”与“良”之间且略偏于“一般”	15
杭州	(0.6359, 0.0318, 0.0104)	(3.51%, 3.80%, 22.42%, 56.08%, 4.23%)	“良”，“一般”与“良”之间偏向于“良”	4
宁波	(0.6426, 0.0320, 0.0095)	(3.46%, 3.85%, 19.91%, 58.29%, 4.75%)	“良”，“一般”与“良”之间偏向于“良”	3
温州	(0.6031, 0.0305, 0.0088)	(3.38%, 2.45%, 34.18%, 43.36%, 0.97%)	“良”，“一般”与“良”之间略偏于“良”	10
湖州	(0.5390, 0.0323, 0.0093)	(3.41%, 9.19%, 71.24%, 25.39%, 3.00%)	“一般”与“良”之间且偏向于“一般”	22
嘉兴	(0.5285, 0.0322, 0.0092)	(3.39%, 10.80%, 77.02%, 22.57%, 3.11%)	“一般”与“良”之间且偏向于“一般”	25
绍兴	(0.5915, 0.0316, 0.0093)	(3.43%, 1.27%, 41.31%, 40.54%, 1.15%)	“良”，“一般”与“良”之间略偏于“良”	11
金华	(0.6166, 0.0325, 0.0093)	(3.46%, 2.98%, 30.50%, 49.74%, 2.88%)	“良”，“一般”与“良”之间且偏于“良”	8
舟山	(0.6302, 0.0320, 0.0089)	(3.43%, 3.54%, 24.30%, 53.89%, 3.79%)	“良”，“一般”与“良”之间且偏于“良”	6
台州	(0.6287, 0.0335, 0.0094)	(3.50%, 3.41%, 26.56%, 54.80%, 4.07%)	“良”，“一般”与“良”之间且偏于“良”	5
合肥	(0.6185, 0.0312, 0.0098)	(3.45%, 3.28%, 28.35%, 49.36%, 2.70%)	“良”，“一般”与“良”之间且偏于“良”	9
芜湖	(0.6191, 0.0330, 0.0091)	(3.47%, 3.04%, 29.87%, 50.93%, 3.18%)	“良”，“一般”与“良”之间且偏于“良”	7
马鞍山	(0.5272, 0.0339, 0.0090)	(3.41%, 11.85%, 79.85%, 23.38%, 3.10%)	“一般”与“良”之间且偏向于“一般”	23
铜陵	(0.4777, 0.0325, 0.0088)	(3.15%, 21.23%, 80.79%, 11.98%, 3.36%)	“一般”与“良”之间且偏向于“一般”	27
安庆	(0.5641, 0.0338, 0.0092)	(3.47%, 6.25%, 58.78%, 33.64%, 2.37%)	“一般”与“良”之间且偏向于“一般”	17
滁州	(0.5556, 0.0338, 0.0096)	(3.48%, 7.45%, 63.73%, 31.18%, 2.64%)	“一般”与“良”之间且偏向于“一般”	19
池州	(0.5529, 0.0312, 0.0087)	(3.37%, 6.62%, 61.61%, 28.28%, 2.79%)	“一般”与“良”之间且偏向于“一般”	20
宣城	(0.5662, 0.0327, 0.0091)	(3.44%, 5.50%, 56.15%, 33.42%, 2.39%)	“一般”与“良”之间且略偏于“一般”	18

综合分析评价结果可知：长三角中心区城市群有近半数城市生态环境质量综合评价等级属“良”，其中以盐城、上海以及宁波等城市为代表综合排名居于前3位，虽仍有近半数城市综合评价等级属“一般”，但整体趋势向好，等级逐渐向“良”逼近。

4. 结论

本文提出解决了权重的不确定和模糊性及主客观权重有效融合问题，通过理论推算提出更为稳定且区分度较高的度量方法，系统提出基于正态云模型相似度度量的综合评价模型并实际应用于城市生态环境质量综合评价，得到主要研究结论有：

- 1) 在已有研究基础上改进正态云组合赋权，提出基于面板数据的数据标准化处理，并利用基于博弈论组合赋权权重结果代替权重样本均值，以实现不同赋权方法权重信息的有效融合；
- 2) 从模糊数贴近度的角度并参照修正期望曲线定义，提出基于正态云模型修正期望曲线的距离相似度度量，分别讨论两云模型：① 不存在交点的情况；② 具有一个交点的情况；③ 具有两个交点的情况下距离相似度，并综合提出兼顾距离-形状的正态云模型相似度度量算法，从不同角度进行度量以保证相似度度量结果的准确性；
- 3) 根据本文提出的正态云综合评价模型，将其实际应用于城市生态环境质量综合评价，通过评价指标体系的构建及相关综合云模型数字特征值的计算，利用提出的正态云模型相似度度量算法得到相似度大小，进行等级划分并得到各城市综合排名，可为决策者对城市生态环境质量发展水平判别及相关政策制定提供数据参考。

基金项目

东华理工大学校级项目(DHYC-202339)。

参考文献

- [1] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.
- [2] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.
- [3] 刘常昱, 李德毅, 杜鹃. 正态云模型的统计分析[J]. 信息与控制, 2005, 34(2): 236-239, 248.
- [4] 邱凯昌, 李德毅, 李德仁. 云理论及其在空间数据发掘和知识发现中的应用[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(11): 930-935.
- [5] 冯朝一, 梁家荣, 程菊明, 等. 云关系模式及其应用[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(9): 170-172.
- [6] 冯朝一. 云理论在数据挖掘中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2007.
- [7] 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): 15-19, 24.
- [8] 宋亚宇. 基于云模型的高速公路服务质量综合评价研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- [9] 徐吉辉, 张婧, 王晓琳. 基于二维云模型的航空产品危害性评估方法[J]. 电光与控制, 2021, 28(12): 102-106.
- [10] Zhang, J.B. and Shen, Y.A. (2019) Performance Assessment of Equipment Management Based on Cloud Model. *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Communications and Control Engineering (ICECC 2019)*, Phuket, 13-16 April 2019, 101-106.
- [11] Zheng, Z., Yao, J. and Zhang, H. (2020) Research on Service Recommendation Method Based on Cloud Model Time Series Analysis. *Science 6th International Conference of Pioneering Computer Scientists, Engineers and Educators, ICPCSEE 2020*, Taiyuan, 18-21 September 2020, 156-157.
- [12] Song, Q., Jiang, P. and Zheng, S. (2021) The Application of Cloud Model Combined with Nonlinear Fuzzy Analytic Hierarchy Process for the Safety Assessment of Chemical Plant Production Process. *Process Safety and Environmental Protection*, 145, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.048>
- [13] 张勇, 赵东宁, 李德毅. 相似云及其度量分析方法[J]. 信息与控制, 2004, 33(2): 129-132.

-
- [14] 蔡绍滨, 方伟, 赵靖, 等. 基于区间的云相似度比较算法的研究[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(12): 2456-2460.
 - [15] 李海林, 郭崇慧, 邱望仁. 正态云模型相似度计算方法[J]. 电子学报, 2011, 39(11): 2561-2567.
 - [16] 龚艳冰, 蒋亚东, 梁雪春. 基于模糊贴近度的正态云模型相似度度量[J]. 系统工程, 2015, 33(9): 133-137.
 - [17] 汪军, 朱建军, 刘小弟. 兼顾形状-距离的正态云模型综合相似度测算[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(3): 742-751.
 - [18] 黄琼桃, 刘瑞敏. 一种云模型相似性度量方法[J]. 控制工程, 2022, 29(9): 1600-1604.
 - [19] 黄琼桃, 刘瑞敏. 基于 EW-型贴近度的云模型相似性度量方法[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2021, 38(2): 44-49.
 - [20] 刘翔宇, 张延飞, 丁木华, 等. 长三角中心区生态环境质量评价与空间格局分析[J]. 人民长江, 2021, 52(5): 30-36.
 - [21] 龚艳冰, 巢妍. 基于不确定正态云组合权重的综合评价方法研究[J]. 统计与信息论坛, 2020, 35(5): 3-8.
 - [22] 刘军. 基于云模型的电力企业信息化水平综合评价研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2015.
 - [23] 陈萍, 张延飞, 刘星星, 等. 基于正态云组合赋权的城市生态环境质量综合评价[J]. 科技管理研究, 2023, 43(4): 68-74.