

文章编号:1005-0523(2021)02-0051-10

## 城市绿色交通发展综合评价研究

李亮,赵星,杜希旺

(河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098)

**摘要:**为客观评估城市绿色交通发展水平,综合考虑绿色交通概念及特征,从交通基础设施、公共交通服务质量和环境影响三个方面选择指标并建立绿色交通评价指标体系,采用主成分分析法与熵权法组合赋权的方式获得指标综合权重,并分别应用灰色关联度模型与云物元模型对南京市绿色交通发展水平进行综合评价,结合灰色关联聚类进行评价结果对比研究。实例分析表明,两模型的评价结果具有较高的合理性与一致性,且两模型的组合能够兼顾定量与定性分析,较为全面地反映城市绿色交通发展水平。

**关键词:**绿色交通;综合评价;组合赋权法;灰色关联度模型;云物元分析

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

本文引用格式:李亮,赵星,杜希旺.城市绿色交通发展综合评价研究[J].华东交通大学学报,2021,38(2):51-60.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20210416.010

## Study on Comprehensive Evaluation of Urban Green Transportation Development

Li Liang,Zhao Xing,Du Xiawang

(School of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:**In order to evaluate the urban green transportation development objectively, according to the comprehensive consideration of green transportation concept and connotation, this paper selects some indicators and establishes a green transportation evaluation index system from the three aspects of transportation infrastructure, public transportation service quality and environmental impact, and uses a combination of PCA and entropy weight method to obtain the comprehensive weights of the index. Grey relational degree model and cloud matter-element model are adopted to study the development level of green transportation in Nanjing as an example. In addition, gray relational degree clustering is combined for making a comparison about evaluation results. The case analysis indicates that the results of combination of two models have high rationality and consistency. The combination of models could also take both quantitative and qualitative analysis into consideration, which may reflect the development level of urban green transportation more comprehensively.

**Key words:** green transportation; comprehensive evaluation; combination weighting method; grey relational degree model; cloud matter-element analysis

**Citation format:**LI L,ZHAO X,DU X W. Study on comprehensive evaluation of urban green transportation development[J]. Journal of East China Jiaotong University,2021,38(2):51-60.

收稿日期:2020-11-10

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017B12714)

作者简介:李亮(1996—),男,硕士研究生,研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:2362720730@qq.com。

通信作者:赵星(1986—),女,副教授,博士,研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:zhaoxing@hhu.edu.cn。

绿色交通综合评价是绿色交通理论与实践途径的联系纽带,已经成为量化城市绿色交通发展水平的有效工具。

学者们针对绿色交通评价指标及评价方法进行了大量研究。Fahimnia 等<sup>[1]</sup>通过分析车辆性能对环境的影响,认为车辆性能指标对提高城市交通绿色化水平具有重要作用;Cheaitou 等<sup>[2]</sup>认为 CO<sub>2</sub> 和 SO<sub>x</sub> 指标对海上绿色运输具有重要影响,并建立优化模型对其影响作用进行分析;Panday 等<sup>[3]</sup>基于印度绿色交通发展现状,从环境、能源以及车辆技术性能等方面构建评价指标体系;杨少辉等<sup>[4]</sup>通过对绿色交通概念及内涵进行解析,提出基础设施水平、绿色出行等 4 类评价指标;梁对对等<sup>[5]</sup>基于绿色交通的内涵和实现途径,对绿色交通评价指标体系以及模型评价方法进行深入研究,并结合深圳市绿色交通发展情况进行模型应用。王双等<sup>[6]</sup>从节能减碳、生态保护等方面出发,设计了一套全行业绿色交通评价指标体系。在综合评价方面,Hsu 等<sup>[7]</sup>构建一种绿色指数评估绿色交通网络的可达性,并使用蒙特卡洛模拟进行仿真实验。董晓<sup>[8]</sup>深入剖析了绿色交通系统的影响因素及作用机理,基于 DPSIR 模型构建绿色交通评价指标体系并进行实例验证。温惠英等<sup>[9]</sup>以中等城市为着眼点选取评价指标,并应用云物元模型对河源市的绿色交通发展水平进行评价分析。王琦等<sup>[10]</sup>从河谷型城市交通现状特征出发选取评价指标,并应用熵权法-灰色关联度模型对兰州市绿色交通发展水平进行实例研究。

总体来看,评价方法及模型大致可分为定性与定量两种,且均能得到较为准确的评价结果,但单一评价方法通常会受限于各自的适用性,不能兼顾对评估对象的量化分析与定性等级的直观阐述。为克服现有评价方法的不足,本文综合考虑绿色交通相关特征并构建评价指标体系,分别应用主成分分析和熵权法获得指标权重并进行组合赋权,建立模型对南京市绿色交通发展水

平进行实例分析,以验证所用模型的可操作性与合理性。

## 1 评价指标的选取

城市绿色交通评价指标应能兼顾一般指标的共性与绿色交通系统自身特性,并且所选指标可进行量化处理。本文从交通基础设施、公共交通服务质量以及环境影响三个角度构建备选指标集,并根据科学性、客观性与可操作性原则对指标进行筛选,形成绿色交通评价指标体系。

### 1.1 交通基础设施评价指标

交通基础设施是绿色交通系统的重要组成部分,对城市绿色交通发展起着支撑性的作用。结合学者研究<sup>[11]</sup>与绿色交通自身特点,本文主要选取道路网密度、人均道路面积等 5 项指标。

#### 1.1.1 道路网密度

道路网密度是衡量城市交通基础设施建设水平的重要指标,并能整体上反映包含绿色出行在内的交通便利程度。

$$D = \frac{\sum L}{\sum M} \quad (1)$$

式中: $D$  为建成区内道路网密度,km/km<sup>2</sup>;  $\sum L$  为城市建成区内道路总长度,km;  $\sum M$  为城市建成区面积,km<sup>2</sup>。

#### 1.1.2 人均道路面积

人均道路面积能够反映出出行者与道路的关系,更加鲜明地反映通行需求<sup>[12]</sup>。

$$a = \frac{\sum S}{\sum P} \quad (2)$$

式中: $a$  为人均道路面积,m<sup>2</sup>/人;  $\sum S$  为建成区内道路总面积,km<sup>2</sup>;  $\sum P$  为城市总人口数。

### 1.1.3 百辆汽车停车泊位数

百辆汽车停车泊位数能够反映静态交通的供需水平。停车泊位的综合规划能够引导人们合理使用私家车,对缓解交通拥堵有积极作用。

### 1.1.4 万人公交车标台数

万人公交车标台数反映了人均公交资源拥有量,是衡量城市公共交通建设水平以及交通绿色化程度的重要指标。

### 1.1.5 公共交通站点 500 m 覆盖率

公交站点 500 m 覆盖率是反映城市公共交通服务可达性与公共交通建设水平的重要指标,本文中公共交通站点包括公交车站点和轨道交通站点。

$$\varphi = \frac{A_{sc}}{A} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\varphi$  为公交站点 500 m 覆盖率; $A_{sc}$  为公交站点 500 m 半径覆盖面积; $A$  为城市建成区面积。

## 1.2 公共交通服务质量评价指标

绿色交通倡导优先发展公共交通,鼓励人们绿色出行,以实现城市交通结构以及资源配置的优化,具体包含公交换乘系数、公共交通分担率等 4 项指标。

### 1.2.1 公交换乘系数

公交换乘系数能够衡量乘客直达程度,是反映公共交通服务水平的重要指标。

$$\varepsilon = \frac{n+n'}{n} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon$  为公交换乘系数; $n$  为出行人次; $n'$  为换乘人次。

### 1.2.2 清洁能源公交车占比

清洁能源公交车描述的是公共交通工具的绿色化程度,其数值越大,表明城市公交系统的节能减排效果越好。

### 1.2.3 公共交通分担率

公共交通分担率直接反映城市交通绿色化程度和公共交通服务水平,对提高居民公交出行满意度和改善城市交通结构有重要参考意义。

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V_{pt}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $\alpha$  为公共交通分担率; $V_{pt}$  为公共交通工具出行量; $\sum_{i=1}^n V_i$  为总交通出行量。

### 1.2.4 人均乘坐轨道交通次数

人均乘坐轨道交通次数能够反映轨道交通对居民出行的吸引力,是衡量公共交通服务水平的重要指标。

## 1.3 环境影响评价指标

环境友好是绿色交通的重要内涵之一。绿色交通注重交通系统与城市环境的和谐共融,致力于打造低能耗、低污染、低排放的城市交通体系<sup>[13]</sup>。城市交通对环境的影响主要体现在空气污染和噪音污染两方面,本文选取交通噪声等效声级、二氧化氮年日均值等 4 项指标对环境的影响进行描述。

### 1.3.1 城市绿化覆盖率

城市绿化覆盖率是城市环境建设与保护力度的直接体现,是反映交通绿色化程度的重要指标。

### 1.3.2 交通噪声等效声级

城市区域内交通流运行所产生的噪声污染可用交通噪声等效声级描述

$$L_{eq} = 10 \lg \left( \sum \frac{t_i}{T} \right) 10 \times \frac{L_i}{10} \quad (6)$$

若连续测量,则有

$$L_{eq} = 10 \lg \left( \frac{1}{x} \int_{t=1}^T 10 \times \frac{L_i}{10} dt \right) \quad (7)$$

式中: $L_{eq}$  为被测时间段  $T$  内的噪声等效 A 声级, dB; $L_i$  为时间  $t_i$  所测声级, dB; $x$  为被测时间区段  $T$  的个数。

### 1.3.3 二氧化氮年日均值

二氧化氮是机动车尾气排放的主要污染物之一,其年日均值是根据一年中统计测得的二氧化氮量而计算的日均浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

### 1.3.4 可吸入颗粒物年日均值

可吸入颗粒物是存在于机动车尾气中的直径  $10 \mu\text{m}$  以下的固体颗粒,其年日均值是根据一年中统计测得的颗粒物含量而计算的日均浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

在上述指标归纳整理的基础上,本文采用“目标层—准则层—指标层”结构建立评价指标体系,如表 1 所示。

表 1 城市绿色交通评价指标体系  
Tab.1 Urban evaluation system of green transportation

目标层	准则层 $B$	指标层 $C$
城市绿色交通 发展水平	交通基础设施 $B_1$	道路网密度 $C_{11}$
		人均道路面积 $C_{12}$
		百辆车停车泊位数 $C_{13}$
		万人公交车标台数 $C_{14}$
		公共交通站点 500 m 覆盖率 $C_{15}$
	公共交通服务质量 $B_2$	公交换乘系数 $C_{21}$
		清洁能源公交车占比 $C_{22}$
		公共交通分担率 $C_{23}$
		人均乘坐轨道交通次数 $C_{24}$
	环境影响 $B_3$	城市绿化覆盖率 $C_{31}$
		交通噪声等效声级 $C_{32}$
		二氧化氮年均值 $C_{33}$
		可吸入颗粒物年均值 $C_{34}$

## 2 综合评价方法建模

绿色交通发展水平评价属于多指标复杂评价。本文采用主成分分析法与熵权法组合赋权的方式

确定指标综合权重,并分别应用灰色关联度模型与云物元模型进行综合评价建模。整体建模思路如图 1 所示。

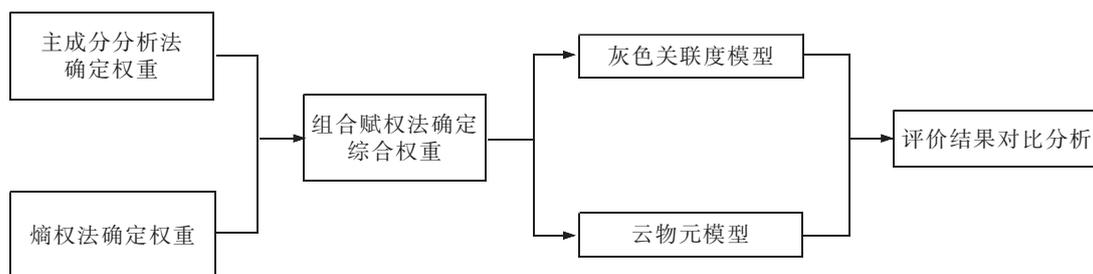


图 1 综合评价建模

Fig.1 Comprehensive evaluation modeling

### 2.1 确定指标权重

关于权重的计算方法众多,且均具有一定的适用性。主成分分析法能够消除各指标之间不同量纲与信息重叠的影响,从而保证指标权重的客观性与合理性。熵权法根据各指标的变异程度(即熵值)来确定其权重大小,能够降低主观因素对权重的偏差影响。本文分别应用主成分分析法与熵权法计算指标权重,并通过组合赋权获得综合权重。

#### 2.1.1 主成分分析法

主成分分析法是一种降维算法,其基本思想是基于相关分析,寻找一组新变量代替原有变量并使之尽可能多地保留原有变量信息。

对原始矩阵  $R$  根据公式  $r_{ij}^* = \frac{r_{ij} - \bar{r}_j}{S_j}$  进行标准化处理得新矩阵  $R^*$ ,  $\bar{r}_j$  为第  $j$  项指标的均值,  $S_j$  为第  $j$  项指标的标准差。之后计算相关系数矩阵

$Z=(z_{ij})_{p \times p}=\frac{(R^*)^T R^*}{n-1}$ , 并根据  $|Z-\lambda I_p|=0$  解得  $p$  个特征值  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \cdots \geq \lambda_p \geq 0$ 。设主成分的数量为  $m$  并使其

保留 80% 以上的原有信息, 即  $\frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \geq 0.8$ 。对每个  $\lambda_j$

求解方程组  $Zb=\lambda_j b$ , 得单位向量  $b_j^0=\frac{b_j}{\|b_j\|}$ 。基于  $R_i^*=(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ip})^T$  的  $m$  个主成分分量, 通过  $l_{ij}=R_i^{*T} \cdot b_j^0$  获得  $m$  个主成分的决策系数矩阵  $L=(l_{ij})_{p \times m}$ , 之后计算各主成分的贡献率  $\varphi_j=\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j}$ , 对主成分决策系数

加权平均并归一化, 可得各指标权重  $w_i=\frac{\sum_{j=1}^m \varphi_j l_{ij}}{\sum_{j=1}^m \varphi_j}$ 。

### 2.1.2 熵权法

根据信息论的基本原理可知, 信息是度量系统有序程度的尺度, 熵则是度量系统无序程度的尺度。信息的增加意味着熵的减少, 即信息与熵成反比关系, 熵值能够反映指标的变异程度, 并计算客观权重。

首先对含  $n$  个研究对象  $m$  项评价指标的原始数据矩阵  $R$  进行标准化处理, 正向指标  $r_{ij}=\frac{r_{ij}-\min r_{ij}}{\max r_{ij}-\min r_{ij}}$ , 负向指标  $r_{ij}=\frac{\max r_{ij}-r_{ij}}{\max r_{ij}-\min r_{ij}}$ , 之后计算各评价指标的熵  $E_j=-k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij})$ , 其中  $P_{ij}=\frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}}$ ,

$k=\frac{1}{\ln m}$ 。令  $D_j=1-E_j$ , 则评价指标权重为  $w_j=\frac{D_j}{\sum_{j=1}^n D_j}$ 。

### 2.1.3 组合赋权法

主成分分析法与熵权法同属客观赋权, 但因计算原理不同而使得权重表达出现一定的差异性。为克服单一赋权的片面性并得到更为准确的指标权重, 本文采用加法合成的方式对上述 2 种方法所得权重进行组合赋权<sup>[4]</sup>。表达式如下

$$w_j=\alpha w_{1j}+(1-\alpha)w_{2j}, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为偏向系数;  $w_{1j}, w_{2j}$  分别为主成分分析法与熵权法所得第  $j$  项指标权重。通过参阅相关文献, 本

文采用一种差异系数法<sup>[15]</sup>来计算  $\alpha$ , 公式如下

$$\alpha=\frac{n}{n-1}\left[\frac{2}{n}(1P_1+2P_2+\dots+nP_n)-\frac{n+1}{n}\right] \quad (9)$$

式中:  $n$  为指标数量;  $P_1, P_2, \dots, P_n$  分别为主成分分析法所得权重按升序排序的向量。

## 2.2 综合评价模型

绿色交通评价系统是由多个相互影响的子系统组成的复杂系统。为全面、客观地评估城市绿色交通发展水平, 本文分别应用灰色关联度模型和云物元模型进行综合评价分析。

### 2.2.1 灰色关联度模型

灰色关联度模型是以灰色关联度作为衡量对象之间优劣程度的一种评价模型。在系统发展过程中, 若两个因素变化的趋势具有一致性, 则认为二者关联程度较高; 反之, 则较低。灰色关联度模型提供了系统发展变化态势的定量度量, 非常适合动态过程分析, 其工作流程如图 2 所示。

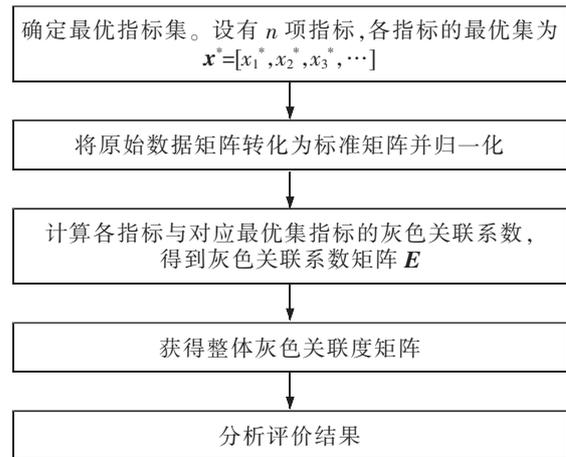


图 2 灰色关联度模型

Fig.2 Grey relational degree model

根据  $R$  中灰色加权关联度大小, 可对每个评价对象的优劣程度进行排序。

### 2.2.2 云物元模型

云模型能模拟人类思维灵活划分属性空间, 进而在较高的概念层上泛化属性值, 实现定量数值到定性概念的转换。云的数字特征可用 3 个指标来描述: 期望值, 熵和超熵。物元分析<sup>[16]</sup>是将研究对象的名称、特征以及特征量值有机结合为三元有序数组, 进而构建基本物元的分析方法。云物元模型将物元分析与传统云模型相结合, 即用云来表示定性概念的量化值, 能够有效解决定性特征的模糊性和随机性问题。云物元评价模型的工作流程如图 3。

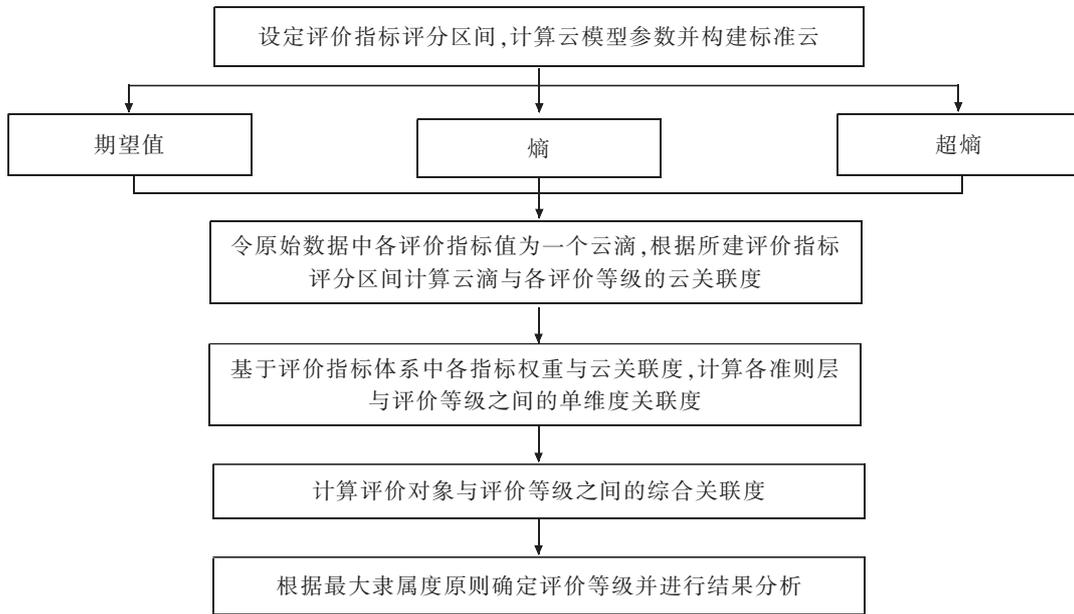


图3 云物元模型流程

Fig.3 Cloud matter-element model process

### 3 案例分析

作为东部地区重要的中心城市和国家综合交通枢纽,南京市交通设施现代化水平较高,地面公交、轨道交通网络发达,综合运输服务体系完善,具备发展绿色交通的现实物质基础。本文以南京市为

研究对象,构建综合评价模型对绿色交通发展水平进行实例分析。

通过查阅统计年鉴和相关调查报告,本文收集了南京市2010—2017年的各评价指标数据,具体数值见表2。

表2 评价指标数据  
Tab.2 Evaluation indicators data

指标层	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
道路网密度/(km/km <sup>2</sup> )	9.05	9.25	9.62	10.02	10.11	10.29	10.35	10.58
人均道路面积/(m <sup>2</sup> /人)	19.35	19.63	20.14	21.28	22.17	23.06	23.36	23.75
百辆车停车位/百辆	26.9	28.2	26.2	25.6	25.4	23	23.4	27.2
万人公交车标台数/(辆/万人)	17.57	14.31	14.72	10.8	12.54	12.85	13.8	12.9
公共交通站点500m覆盖率/%	82	84	85	87	90	92	95	97
公交换乘系数	1.24	1.19	1.25	1.3	1.2	1.17	1.19	1.15
清洁能源公交车占比/%	0.44	0.46	0.5	0.53	0.57	0.62	0.64	0.66
公共交通分担率/%	33	36	38	40	44	50	52	53
人均乘坐轨道交通次数/次	27	42	49	55	61	87	101	117
城市绿化覆盖率/%	44.5	44.6	44.3	44.1	44.2	44.5	44.8	44.9
交通噪声等效声级/dB	68.5	67.9	68.4	68	67.2	67.8	68.3	68.2
二氧化氮年均值/(mg/m <sup>3</sup> )	0.046	0.049	0.051	0.055	0.054	0.05	0.044	0.047
可吸入颗粒物年均值/(mg/m <sup>3</sup> )	0.114	0.097	0.102	0.137	0.123	0.096	0.085	0.076

### 3.1 权重的计算

根据表 2 中各指标数据,分别采用主成分分析法和熵权法计算权重,并应用式(8)和式(9)得到各

指标的综合权重(表 3)。其中,相对权重是指各指标综合权重所占对应准则层权重的比例值。

表 3 各指标综合权重  
Tab.3 Synthesis weight of each indicator

准则层	准则层权重	指标层	相对权重	指标综合权重
交通基础设施 $B_1$	0.4	道路网密度 $C_{11}$	0.186	0.074
		人均道路面积 $C_{12}$	0.231	0.092
		百辆车停车泊位数 $C_{13}$	0.203	0.081
		每万人公交车标台数 $C_{14}$	0.176	0.070
		公共交通站台 500 m 覆盖率 $C_{15}$	0.204	0.082
公共交通服务质量 $B_2$	0.298	公交换乘系数 $C_{21}$	0.179	0.053
		清洁能源公交车占比 $C_{22}$	0.341	0.101
		公共交通分担率 $C_{23}$	0.283	0.084
		人均乘坐轨道交通次数 $C_{24}$	0.197	0.059
环境影响 $B_3$	0.302	城市绿化覆盖率 $C_{31}$	0.315	0.095
		交通噪声等效声级 $C_{32}$	0.226	0.068
		二氧化氮年日均值 $C_{33}$	0.311	0.094
		可吸入颗粒物年日均值 $C_{34}$	0.146	0.044

### 3.2 模型应用

#### 3.2.1 灰色关联度模型评价分析

以前文所获得的综合指标权重为基础,根据灰

色关联度模型基本原理可计算各指标对应的灰色关联系数(表 4)。

表 4 灰色关联系数矩阵  
Tab.4 Matrix of gray relational coefficients

指标层	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
$C_{11}$	0.333	0.365	0.444	0.577	0.62	0.725	0.769	1
$C_{12}$	0.333	0.348	0.379	0.471	0.582	0.761	0.849	1
$C_{13}$	0.667	1	0.565	0.5	0.482	0.333	0.351	0.723
$C_{14}$	1	0.509	0.543	0.333	0.402	0.418	0.473	0.42
$C_{15}$	0.333	0.366	0.385	0.428	0.517	0.6	0.79	1
$C_{21}$	0.455	0.652	0.428	0.333	0.6	0.79	0.652	1
$C_{22}$	0.333	0.355	0.407	0.458	0.55	0.733	0.846	1
$C_{23}$	0.333	0.37	0.4	0.435	0.526	0.769	0.909	1
$C_{24}$	0.333	0.375	0.398	0.421	0.446	0.6	0.734	1
$C_{31}$	0.5	0.571	0.4	0.333	0.364	0.5	0.8	1
$C_{32}$	0.333	0.482	0.351	0.448	1	0.52	0.371	0.394
$C_{33}$	0.733	0.524	0.44	0.333	0.355	0.478	1	0.647
$C_{34}$	0.445	0.592	0.54	0.333	0.394	0.604	0.772	1

基于灰色关联系数矩阵,可得到各年份对应的灰色关联度值并对其进行可视化展示(图4),它能够反映绿色交通发展水平的整体变化趋势。

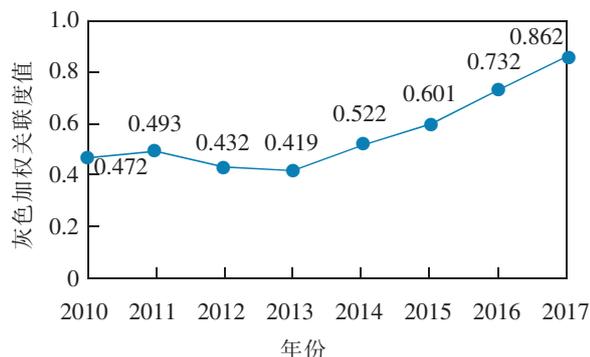


图4 各年份绿色交通灰色关联度

Fig.4 Gray correlation degree of green transportation each year

由图4可知,历年灰色关联度呈现出某种“聚类”特性。对灰色关联度进行聚类分析能够准确捕捉评估对象的差异性,并更好地描述评价结果<sup>[17]</sup>。本文引入灰色关联聚类法对历年灰色关联度进行分析,聚类结果见图5,其中 $\lambda$ 代表聚类阈值。

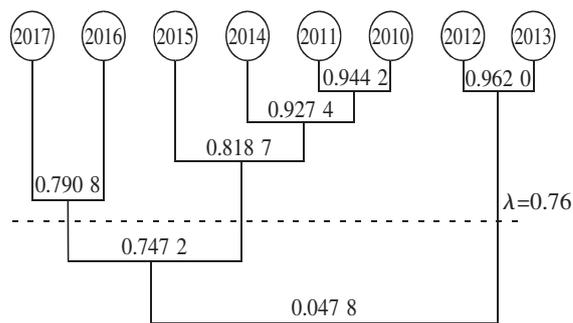


图5 聚类谱系图

Fig.5 Pedigree chart of gray clustering

图5中数值表示各年的灰色相似关系值。从图5可知,当聚类阈值为0.76时,评价年份可分为3类: {2012年,2013年}, {2010年,2011年,2014年,2015年}, {2016年,2017年}。该聚类结果与图4中灰色关联度变化趋势具有较高吻合度。

### 3.2.2 云物元模型评价分析

首先进行评价等级的划分并构建标准云。本文将城市绿色交通发展水平分为五级,分别对应:好,较好,一般,较差,差。各等级的划分区间如表5所示。

表5 城市绿色交通发展水平等级划分

Tab.5 Gradation of development level of urban green transportation

评价等级	好	较好	一般	较差	差
评分区间	[90,100]	[70,90)	[50,70)	[30,50)	[0,30)

根据云模型基本原理分别计算各等级对应的和,参数由云模型的模糊性和随机性共同决定。经过多次试验,当为0.02时,云模型具有适度的模糊

性并能得到较为准确的隶属度。根据前文所构建的评价指标体系,建立各评价指标的等级评分区间(表6)。

表6 评价指标等级区间

Tab.6 Grade range of evaluation indicators

评价指标	评价等级				
	好	较好	一般	较差	差
$C_{11}$	[8,15)	[7,8)	[6,7)	[5,6)	[1,5)
$C_{12}$	[15,25)	[10,15)	[7,10)	[4,7)	[0,4)
$C_{13}$	[25,35]	[20,25)	[15,20)	[10,15)	[0,10)
$C_{14}$	[15,100]	[10,15)	[8,10)	[6,8)	[0,6)
$C_{15}$	[90,100]	[80,90)	[50,80)	[35,50)	[0,35)
$C_{21}$	[1,1.5)	[1.5,1.6)	[1.6,1.7)	[1.7,1.8)	[1.8,2)
$C_{22}$	[80,100]	[60,80)	[40,60)	[20,40)	[0,20)
$C_{23}$	[60,100]	[50,60)	[30,50)	[20,30)	[0,20)
$C_{24}$	[100,120]	[80,100)	[50,80)	[30,50)	[0,30)
$C_{31}$	[40,100]	[36,40)	[30,36)	[20,30)	[0,20)
$C_{32}$	[60,65)	[65,68)	[68,70)	[70,72)	[72,80)
$C_{33}$	[0,0.04)	[0.04,0.08)	[0.08,0.18)	[0.18,0.28)	[0.28,0.56]
$C_{34}$	[0,0.05)	[0.05,0.15)	[0.15,0.25)	[0.25,0.35)	[0.35,0.42]

分别计算各评价指标的标准云模型参数。进一步计算可得到历年各评价等级的综合关联度。基于最大隶属度原则,可确定历年南京市绿色交通发展水平的所属评价等级(表7)。

表7 南京市绿色交通评价等级

Tab.7 Evaluation grade of Nanjing green transportation

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
评价等级	好	好	一般	一般	较好	较好	好	好

### 3.3 结果对比分析

通过对比两种模型评价结果可知,灰色关联度模型能够动态地对南京市绿色交通发展水平进行量化描述,即2010—2011年呈上升态势,2012—2013年有所下降,2014—2017年逐步提升。从表7可以得知,云物元模型以定性等级的形式对南京市绿色交通发展水平进行划分,并能够直观地展示绿色交通所属等级的动态变化。结合灰色关联聚类谱系图可知,各年份绿色交通水平可分为3类,即{2012年,2013年},{2010年,2011年,2014年,2015年},{2016年,2017年}3种类别。同时根据云物元模型评价结果,各年份绿色交通发展水平也展现出分级特性,即2010—2011年与2014—2015年同处于上升期;2012—2013年绿色交通等级有所下降;2016—2017年处于高等级阶段。通过综合分析可间接得知灰色关联度模型与云物元模型的评价结果具有较高的一致性,但同时也要注意,由于云物元建模过程中一些参数的选择具有主观性,2010—2011年绿色交通灰色关联度与所属评价等级并不完全一致。

结合原始数据对评价结果进一步分析可知,南京市交通现代化建设起步较早,准则层多项指标处于较高等级,因而交通绿色化程度在评价阶段早期处于较高水平;在评价阶段中期,准则层指标增长放缓,若干指标趋于严重,现实情境下体现在机动车保有量的快速增长以及环保措施力度不够而导致的雾霾事件频发,使得绿色交通发展水平有所下降;从2014年开始,各项准则层的指标均呈现出积极向好的态势。结合社会经济状况可知,南京以举办青奥会为契机,以建设公交都市为导向,积极挖掘轨道交通潜能并实施绿色循环低碳交通示范工程,从而有力推动了城市绿色交通发展水平的提高。

## 4 结论

1) 本文从绿色交通的特征出发构建评价指标体系,采用主成分分析法与熵权法所得权重线性组合的方式确定综合权重,并分别应用灰色关联度模型和云物元模型对南京市绿色交通发展水平进行评价分析。

2) 实例分析表明,两方法的评价结果具有较好的吻合度与一致性。灰色关联度模型能够动态地对南京市绿色交通发展趋势进行定量分析,结合灰色关联聚类能够进一步找出灰色关联度的差异性并对其进行分类。同时云物元模型能够以定性概念的方式对南京市绿色交通评价等级进行直观阐述。将两种模型组合应用,能够使得评价结果更加全面细致。

3) 本文所用评价方法原理简单,计算简便,能够较好地反映南京市绿色交通发展与建设水平,为南京市进一步开展绿色交通规划提供参考。

### 参考文献:

- [1] FAHIMNIA B, BELL M G H, HENSHER D A, et al. The future of green logistics and transportation[EB/OL]. (2015-05-12)[2020-10-19]. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17181-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17181-4_12).
- [2] CHEAITOU A, CARIU P. Greening of maritime transportation: a multi-objective optimization approach[J]. *Annals of Operations Research*, 2019, 273(1/2): 501-525.
- [3] PANDAY A, BANSAL H O. Green transportation in India: need analysis and solution[EB/OL]. (2014-02-10)[2020-10-19]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6733755>.
- [4] 杨少辉, 马林. 城市绿色交通发展评价指标体系和方法[C]//上海: 2017年中国城市交通规划年会论文集, 2017.
- [5] 梁对对, 崔晓天, 谢明隆. 绿色交通评价指标体系研究——以深圳为例[C]//北京: 新型城镇化与交通发展——2013年中国城市交通规划年会暨第27次学术研讨会论文集, 2014.
- [6] 王双, 张海颖, 凤振华. 绿色交通发展评价指标体系研究[J]. *中国资源综合利用*, 2018, 36(9): 183-186.
- [7] HSU C I, WANG H M. Strategies for green transportation while preserving mobility and accessibility: a case study of taipei city[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2016, 142(1): 04015008.
- [8] 董晓. 城市绿色交通发展水平评价及对策研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.

- [9] 温惠英,杨锐烁,张子佳,等. 中等城市绿色交通发展水平评价[J].城市交通,2017,15(3):20-26.
- [10] 王琦,钱勇生,曾俊伟,等. 新型城镇化背景下河谷型城市绿色交通发展评价研究——以兰州市为例[J]. 生态经济,2020,36(4):95-99.
- [11] 王天童,郑长江,马庚华,等. 城市道路路段人行横道通行能力分析[J]. 华东交通大学学报,2019,36(2):47-53.
- [12] 王伟,陈学武. 交通规划[M]. 2版. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [13] 陈佳. 绿色交通概念内涵、目标内容及规划策略研究[C]// 东莞:持续发展 理性规划——2017中国城市规划年会论文集(06城市交通规划),2017.
- [14] 黄俊伟,张晓月. 基于客观组合赋权模型的企业专利质量评价研究——以苏州市吴中区知识密集型企业为例[J]. 科技管理研究,2020,40(9):133-141.
- [15] 刘宏. 综合评价中指标权重确定方法的研究[J]. 河北工业大学学报,1996(4):75-80.
- [16] 许兆丰,田杰芳,张靖. 基于云物元的装配式建筑施工安全评价[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2019,41(3):102-110.
- [17] 杨元,黎放,胡剑. 灰色关联分析法在聚类评估中的应用[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2007(4):94-98.