

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211030001

文章编号: 1674-599X(2023)02-0095-10

引用格式: 郑长江, 孙凯, 沈金星, 等. 基于贝叶斯BWM的中小城市综合交通网络评价[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(2): 95-104.

Citation: ZHENG Changjiang, SUN Kai, SHEN Jinxing, et al. Comprehensive evaluation of integrated transportation network in small and medium-sized cities based on Bayesian BWM[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(2): 95-104.

文章编号: 1674-599X(2023)02-0095-00

基于贝叶斯BWM的中小城市综合交通网络评价

郑长江, 孙凯, 沈金星, 杜牧青, 谷雨航

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 研究中小城市综合交通网络的评价体系, 为中小城市综合交通网络的合理规划提供理论依据。该研究从规模、结构、服务水平和布局4个层面进行评价, 采用相关系数法筛选出符合中小城市交通发展特征的指标, 建立综合评价指标体系。基于模糊综合评价法和直线型无量纲法, 对定性和定量指标进行量化处理。为了提高赋权的准确性, 考虑多位决策者的评价意见, 采取贝叶斯BWM进行组合赋权, 最后结合价值分析法和灰色关联分析法计算综合评价价值。研究表明: 本研究提出的综合评价体系能够全面评价中小城市的综合交通网络, 对当前各交通模式中存在的问题进行讨论, 并基于此提出未来交通规划的相关建议。

关键词: 综合评价; 贝叶斯BWM; 综合交通网络; 中小城市; 灰色关联分析法

中图分类号: U113

文献标志码: A

Comprehensive evaluation of integrated transportation network in small and medium-sized cities based on Bayesian BWM

ZHENG Changjiang, SUN Kai, SHEN Jinxing, DU Muqing, GU Yuhang

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

Abstract: Study the comprehensive evaluation (CE) system of integrated transportation network (ITN) in small and medium-sized cities to provide theoretical basis for rational planning of comprehensive transportation network in small and medium-sized cities. Based on four aspects of scale, structure, service level, and layout, this study used the correlation coefficient method to select indicators that meet the characteristics of transportation development in small and medium-sized cities, and established a CE indicator system. Built upon that, fuzzy comprehensive evaluation method and linear dimensionless were applied to quantify and nondimensionalize the qualitative and quantitative indexes. In order to improve the accuracy of weighting, Bayesian BWM is adopted to get the index weight considering the references of different decision makers. Finally, the combination of value analysis (VA) and grey relational analysis (GRA) was used to calculate the CE value. The results show that the introduced CE framework can offer a thorough evaluation of the ITN in small and medium-sized cities. Then, the problems existing in different transportation modes is discussed and relevant suggestions are provided for future traffic planning.

Key words: comprehensive evaluation; Bayesian BWM; integrated transportation network; small and medium-sized cities; grey relational analysis

城市交通网络是城市发展的骨架, 促进了城市交通的正常运转和社会经济的进步^[1]。近些年, 随

着交通需求的多样化及复杂化, 城市交通网络的整体架构需不断更新及优化。通过制定合理有效的

收稿日期: 2021-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(51808187); 江苏自然科学基金(BK20170879); 中央高校基本科研业务费专项资金(2019B13514); 江苏省博士后科研资助计划项目(1701086B)

作者简介: 郑长江(1966—), 男, 河海大学教授, 博士生导师。

的城市交通规划方案,促进各类交通方式和谐发展。虽然随着城镇化进程的加快,城市之间更互通,中小城市都积极地建立交通线,但是其综合交通网络建设仍滞后于经济的快速增长。《2021年新型城镇化和城乡融合发展重点任务》^[2]提出:在推进城镇化建设时,要以交通运输网络为支撑,构建具有前瞻性的综合运输网络。

目前,大多研究以大城市综合交通网络的评价为研究背景展开。BANDEIRA等^[3]在指标选取的基础上提出了综合指标的概念,以网络可持续发展能力为衡量准则,从运营商的角度对地面货运网络进行综合评价。方松等^[4]结合交通景观、交通网络等5个方面,基于BP神经网络构建了城市生态交通网络评价体系。张培林等^[5]对大城市综合交通适应性进行量化研究,建立了评价指标体系。综上所述,现有研究对大城市的交通网络的评价大多集中在其可持续性发展及环境效益方面,以及在基于满足城市出行需求的基础上进行外部性评价,而对网络内部的规模、布局、结构等较少涉及。中小城市与大城市相比,交通网络较为滞后,不同于传统大城市的交通评价,其交通模式发展仍须先满足城市内部的居民出行及运输需求。对于中小城市的交通网络评价,须明确系统内部的规模、结构及布局等,考虑其内部构成,设置交通基础设施,强调其交通体系建设的落地性及合理性,着重于公路、铁路、水路、航路等多种交通方式在空间上的立体及区域一体化。虽有学者对交通网络的通达性进行了相关研究^[6-7],并以此作为评价依据,但大多以地面运输网络(即公路和铁路)为研究对象,忽视了综合交通网络多层次立体性的特征^[8]。此外,仅以可达性为目标,尚不能全面地评价综合交通网络,需对研究对象进行多层次、多尺度的综合测定和评价。以往的研究大多忽视了综合交通网络多层次多模式的特性,且未全面地评价中小城市的交通网络。综合评价不同于单指标评价,它既能对研究对象进行系统描述和综合测定,也能在定性和定量分析相结合的基础上对研究对象的复杂表现进行层次分析^[9]。因此,本研究基于贝叶斯最优最劣方法(best-worst method, BWM)理论,考虑各评价因素之间的关联性,对江苏省海门市交通网络进行综合评价,并提出了发展意见。

1 综合评价指标体系的建立

本研究建立的综合评价体系是对中小城市综合交通网络复杂的内部构成进行全面评价,需要从多个层面进行指标选取。规模与结构是交通网络发展水平的重要体现,将其作为衡量准则,能直观地反映其内部架构的合理性^[10],但是中小城市综合交通网络的合理性不仅体现在规模是否足够、结构是否合理,而且其服务水平也是影响巨大的。通常一个城市的交通网络服务水平关系着整个城市的交通状况,能客观反映社会对其的满意程度^[11]。交通网络的布局被定义为交通容量与需求的耦合协调度^[12],一个城市的综合交通网布局是否合理、是否具有前瞻性,对城市交通、经济发展起重要作用。因此,本研究将中小城市综合交通网络评价体系的准则层划分为规模、结构、服务水平和布局4个方面,均从公路、铁路、水路和航路4种交通模式以及交通枢纽初步中选取评价指标。因为综合交通网络体系内部存在多层次运输模式,所以评价指标相对较多。指标间存在关联性,部分指标可以通过其他指标推导而出,且指标反映的内容也存在重叠。因此,本研究采用相关系数法对初步选取的评价指标进行筛选,具体步骤为:

1) 对规模、结构、服务水平和布局等指标进行聚类分析。在每一个准则层中,分别从各交通模式中选择一个评价指标作为该方式的典型指标。

① 假设指标集为 $X_i = \{\text{规模, 结构, 服务水平, 布局}\}$, X_{yzk} 为第 y 类第 z 项第 k 个指标。

② 记 $X^{(yzk)} = \{x_{yzk}^1, x_{yzk}^2, \dots, x_{yzk}^p, \dots, x_{yzk}^r\}$, 表示第 y 类第 z 项第 k 个指标的样本集, N 为样本数, 计算相关系数 r_{yz}^{km} :

$$r_{yz}^{km} = \frac{N \cdot \sum_p (x_{yzk}^p \cdot x_{yzm}^p) - \sum_p x_{yzk}^p \cdot \sum_p x_{yzm}^p}{\sqrt{\left[N \cdot \sum_p (x_{yzk}^p)^2 - \left(\sum_p x_{yzk}^p \right)^2 \right] \left[N \cdot \sum_p (x_{yzm}^p)^2 - \left(\sum_p x_{yzm}^p \right)^2 \right]}} \quad (1)$$

③ 计算决定系数 $\overline{r_{yzk}^2}$:

$$\overline{r_{yzk}^2} = \frac{1}{N_{yz} - 1} \cdot \sum_{k=1}^{N_{yz}} \sum_{k \neq m} (r_{yz}^{km})^2 \quad (2)$$

④ 选取 $\overline{r_{yzk}^2} = \max \{ \overline{r_{yzk}^2} \}$ 作为典型指标。

2) 计算其余指标与典型指标的相关系数 r_{yz}^k 。本研究确定临界值 M 为0.6^[13]。若 $r_{yz}^k \leq M$,则考虑将该指标保留;反之,则删除。经筛选,本研究以指标的可操作性、定性和定量相结合为准则,建立中小城市的综合立体交通网评价体系,见表1。

表1 筛选后的中小城市交通网络的综合评价指标体系
Table 1 Screened comprehensive evaluation indexes of transportation networks in small and medium-sized cities system

准则层	指标层	准则层	指标层
规模 A	公路网密度 A1	服务水平 C	干线路网饱和度 C1
	铁路网密度 A2		高级、次高级路面铺装率 C2
	港口规模 A3		铁路通过能力 C3
	机场等级 A4		航道网拥挤度 C4
	枢纽等级 A5		枢纽衔接交通方式数 C5
			高峰小时客流集散量 C6
结构 B	高速公路比重 B1	布局 D	公路通行政村率 D1
	高等级公路比重 B2		公路网连通度 D2
	复线比重 B3		铁路站点覆盖率 D3
	电气化比重 B4		等级航道网连通度 D4
	高等级航道比重 B5		航空服务覆盖率 D5
			枢纽建筑面积 D6

2 综合评价模型的建立

综合评价最终目的是用多个评价指标信息综合得到的综合数值进行整体性评价^[13]。在综合评价方法中,例如层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)之类的全矩阵方法,会使决策者涉及诸多问题,两两比较评价并不一致,但BWM能够提高数据处理效率。BWM是一个基于贝叶斯理论的进阶模型,决策者作为一个群体,从概率角度确定总体权重^[14]。因此,在指标筛选的基础上,采用贝叶斯BWM赋权的方式确定评价指标的权重。灰色关联分析法(grey relational analysis, GRA)能够确定多种因素的共同作用,影响系统的发展趋势,常用于确定各因素对其所在系统的影响程度,得出的定量结果往往与定性分析结果相一致^[15]。在确定权重的基础上,本研究采用价值分析法(value analysis, VA)结合GRA计算综合评价值。最终通过整体评价和局部分析,对当前交通体系的不足之处进行讨论,并提出相关规划建议。本研究构建的中小城市综合交通网络评价体系如图1所示。其中,在建立综合评价指标体系的基础上,对各定性和定量指标进行无量纲化处理,计算各指标的权重和综合评价值。

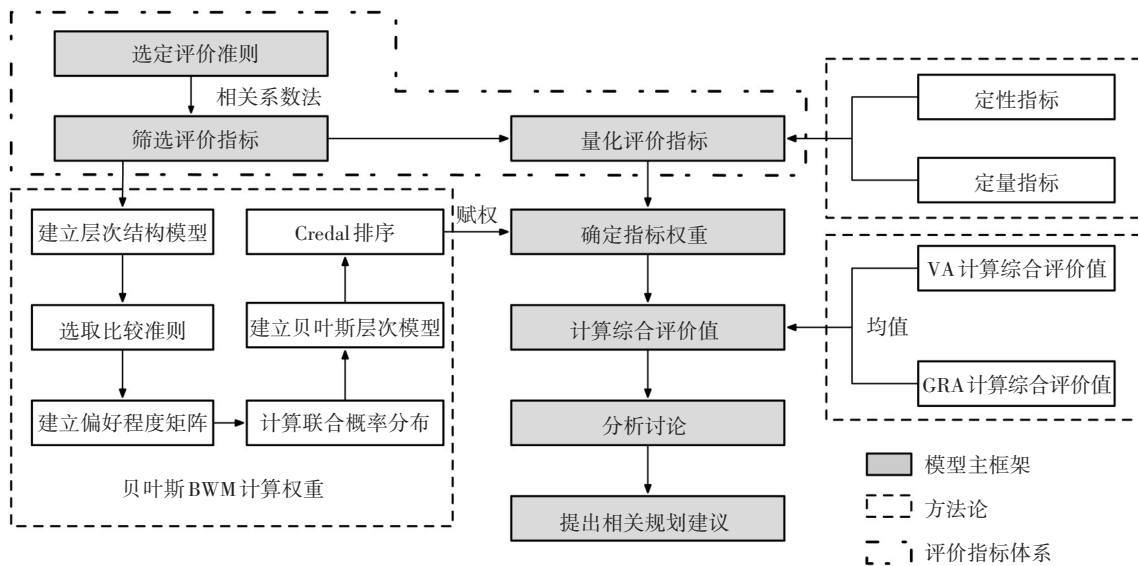


图1 综合评价体系

Fig. 1 Framework of CE model

2.1 评价指标的量化方法

在综合评价时,对多个指标的综合应以各评价指标的同质性为前提,因为非同质的指标不具有可

比性,所以不能在同一维度比较。因此,本研究将不同类型指标进行同质化转化(无量纲化处理),将评价指标计算值统一到[0,1]范围内(即把指标的

绝对值转化为相对值)。

2.1.1 定性指标无量纲化处理

本研究使用模糊综合评价法对定性指标进行无量纲化处理,评价结果根据专家调查获得,见表2。

表2 专家调查评级表

Table 2 Expert survey rating results	
评价等级	取值范围
非常好	(0.8, 1.0]
很好	(0.6, 0.8]
良好	(0.4, 0.6]
一般	(0.2, 0.4]
较差	[0.0, 0.2]

2.1.2 定量指标无量纲化处理

本研究使用直线型无量纲方法对定量指标进行无量纲化处理。假设评价指标*i*的评价值为 p_i ,其标准值为 $[p_{i_{\min}}, p_{i_{\max}}]$, $U_{d_i}(p_i)$ 是在论域 d_i 上的不同指标值 p_i 的无量纲化标准函数。不同评价指标*i*的无量纲化值 f_i 计算表达式为:

1) 效益型(值越大越好)。

$$f_i = U_{d_i}(p_i) = \begin{cases} 0, & p_i \leq p_{i_{\min}} \\ \frac{p_i - p_{i_{\min}}}{p_{i_{\max}} - p_{i_{\min}}}, & p_{i_{\min}} < p_i < p_{i_{\max}} \\ 1, & p_i \geq p_{i_{\max}} \end{cases} \quad (3)$$

2) 成本型(值越小越好)。

$$f_i = U_{d_i}(p_i) = \begin{cases} 0, & p_i \geq p_{i_{\max}} \\ \frac{p_{i_{\max}} - p_i}{p_{i_{\max}} - p_{i_{\min}}}, & p_{i_{\min}} < p_i < p_{i_{\max}} \\ 1, & p_i \leq p_{i_{\min}} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 指标权重计算方法

2.2.1 BWM计算指标权重

BWM是基于成对比较的多指标决策方法,与AHP相比,决策过程中比较的复杂度从 $n(n-1)/2$ 降低到 $2n-3$ ^[16]。BWM的主要步骤为:

1) 建立一组表示问题的影响因素的评价标准集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 。

2) 在 C 中选取最优准则 c_B 和最劣准则 c_W 。

3) 确定最优准则相较于其他准则的偏好程度,记为向量 A_B ;其他准则相较于最劣准则的偏好程度,记为向量 A_W ,见式(5)~(6)(采用数字1~9

标度各指标的相对重要性,1表示两者具有相同重要性,9表示该准则比另一个准则极端重要)。

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bj})^T \quad (5)$$

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T \quad (6)$$

式中: a_{Bj} 为最优准则 c_B 相比其他准则 c_j 的偏好程度,并且 $a_{BB} = 1$; a_{jW} 为其他准则 c_j 相较于最劣准则 c_W 的偏好程度,并且 $a_{WW} = 1$ 。

4) 求解最优权重 $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)^T$ 。

最小化 $\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|$ 和 $\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right|$ 中的最大值,

需同时满足各权重的非负性条件以及权重和为1的约束。

$$\min_w \cdot \max_j \left\{ \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \right\} \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0, \forall j = 1, 2, \dots, n$$

为方便求解,将其转化为:

$$\begin{aligned} & \min_{\xi, w} \xi \\ & \text{s.t.} \quad \begin{cases} \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \forall j = 1, 2, \dots, n \\ \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi, \forall j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0, \forall j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

求解式(8)得到最优权重 $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)^T$ 与最优目标值 ξ^* 。

2.2.2 贝叶斯BWM计算指标权重

贝叶斯BWM基于传统BWM,从概率的角度综合多个决策者的偏好进行分析^[17],其前三个步骤与传统BWM的相同,后续步骤为:

1) 群体决策:一种联合概率分布。

假设第 k^h ($k = 1, \dots, K$)位决策者认为的最优和最劣指标分别为 A_B^k 和 A_W^k ,所有 K 位决策者的向量集合表示为 $A_B^{1:K}$ 和 $A_W^{1:K}$ 。上标 $1:K$ 表示所有向量的总和。利用多个辅助变量估计最优权重 w^{agg} 。得到联合概率分布表达式为:

$$P(x, y) = P(w^{agg}, w^{1:K} | A_B^{1:K}, A_W^{1:K}) \quad (9)$$

根据式(9)中计算的概率,可以通过式(10)求和规则计算每个变量的概率:

$$P(x) = \sum_y P \quad (10)$$

式中: x 和 y 表示任意随机变量。

2) 贝叶斯层次模型。

变量之间的关系如图2所示,以节点为变量, A_W^k 、 A_B^k 为由原始BWM确定的变量。同时,箭头方向表明变量间的条件独立。 w^k 取决于 A_B^k 和 A_W^k , w^{agg} 也取决于 w^k ,而 A_B^k 和 A_W^k 独立于 w^{agg} 。独立特征为:

$$P(A_W^k | w^{\text{agg}}, w^k) = P(A_W^k | w^k) \quad (11)$$

$$P(A_B^k | w^{\text{agg}}, w^k) = P(A_B^k | w^k) \quad (12)$$

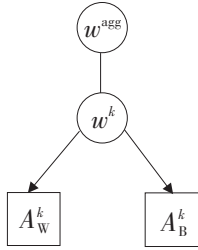


图2 贝叶斯BWM的概率模型

Fig. 2 The probabilistic model of the Bayesian BWM

考虑到各种变量之间的独立性,将贝叶斯规则应用于联合概率,得:

$$\begin{aligned} & P(w^{\text{agg}}, w^{1:K} | A_B^{1:K}, A_W^{1:K}) \\ & \propto P(A_B^{1:K}, A_W^{1:K} | w^{\text{agg}}, w^{1:K}) P(w^{\text{agg}}, w^{1:K}) \\ & = P(w^{\text{agg}}) \prod_{k=1}^K P(A_W^k | w^k) P(A_B^k | w^k) P(w^k | w^{\text{agg}}) \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)中每个元素的分布都是明确的。 A_B^k 和 A_W^k 用多项式分布表示,保留原始的BWM基本思想。

$$\begin{cases} A_B^k | w^k \sim \text{Multinomial}(1/w^k), & \forall k = 1, \dots, K \\ A_W^k | w^k \sim \text{Multinomial}(w^k), & \forall k = 1, \dots, K \end{cases} \quad (14)$$

给定 w^{agg} ,每一个 w^k 都在其附近。因此,运用Dirichlet分布,根据其平均值和集中参数来重新参数化。

$$w^k | w^{\text{agg}} \sim \text{Dir}(\gamma \times w^{\text{agg}}), \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (15)$$

式中: w^{agg} 为分布的平均值;非负参数 γ 为 w^k 和 w^{agg} 之间接近程度的参数,其服从伽马分布。

$$\gamma \sim \Gamma(a, b) \quad (16)$$

a 和 b 为伽马分布的参数,均设为0.1。通过 $\alpha = 1$ 的Dirichlet分布来表示 w^{agg} 的先验分布。

$$w^{\text{agg}} \sim \text{Dir}(\alpha) \quad (17)$$

特定模型中不存在闭式解,因此,运用马尔可夫链-蒙特卡罗法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)计算后验分布,运用JAGS软件包生成MCMC样本。模型的结果包括单个决策者和整体权重的后验分布。

3) Credal排序。

Credal排序用来校正一个属性优于另一个属性的程度,对于一对标准 c_i 和 c_j ,credal组合定义为:

$$O = (c_i, c_j, R, d) \quad (18)$$

式中: R 表示 c_i 和 c_j 间的关系,比如 $<$ 、 $>$ 或 $=$, $d \in [0, 1]$,表示关系间的置信度。

对于决策标准 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$,credal排序涉及到一组包含所有 $(c_i, c_j) \in C$ 的credal组合。采用基于 w^{agg} 的后验分布的新贝叶斯检验方法,获得每个credal排序的置信度。 c_i 优于 c_j 的置信度计算式为:

$$P(c_i > c_j) = \int I_{(w_i^{\text{agg}} > w_j^{\text{agg}})} P(w^{\text{agg}}) \quad (19)$$

其中, $P(w^{\text{agg}})$ 表示 w^{agg} 的后验分布,当下标条件成立时, I 为1,否则为0。

对于后验分布中的 Q 个样本,置信度计算式为:

$$P(c_i > c_j) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q I(w_i^{\text{agg}_q} > w_j^{\text{agg}_q}) \quad (20)$$

$$P(c_j > c_i) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q I(w_j^{\text{agg}_q} > w_i^{\text{agg}_q}) \quad (21)$$

式中: w^{agg_q} 为MCMC样本中 w^{agg} 的第 q 个样本; $P(c_i > c_j) + P(c_j > c_i) = 1$,若 $P(c_i > c_j) > 0.5$, c_i 比 c_j 更优越。因此,将credal排序的阈值设为0.5,可以获得标准的排序。

2.3 指标权重计算结果

贝叶斯BWM输出的权重是 w^{agg} 的Dirichlet分布平均值,准则层和指标层的平均权重以及总权重如图3所示。准则层的credal排序如图4所示,图4中的节点表示属性,边 $A \xrightarrow{d} B$ 都表示准则 A 比 B 更重要,其置信度为 d 。从图4可以看出,规模被认为是最重要的因素,能较好地体现交通网络的覆盖广度和通达深度;表达式 $A \xrightarrow{0.99} C$ 的置信度为0.99,表明 A 相对于 C 绝对重要。虽然布局被认为是次要的影响因素,其与服务水平因素的置信度为0.60,这表明一些决策者认为服务水平和布局的重要性相当。一般情况下,置信度 d 值均大于0.80,表明此指标的排序具备很高的置信度。

2.4 综合评价价值计算方法

2.4.1 价值分析法计算综合评价价值

通过价值分析法VA计算综合评价价值,其数学

模型可表示为:

$$V = \sum Z_i \quad (22)$$

$$Z_i = f_i \cdot w_i \quad (23)$$

式中: V 为综合评价价值; Z_i 为指标 i 的综合评价价值; f_i 为指标 i 的无量纲化值。

2.4.2 灰色关联度分析计算综合评价

通过灰色关联度分析 (grey relation analysis, GRA) 评价模型, 其数学模型可表示为:

$$R = E \cdot W \quad (24)$$

构建关联系数矩阵:

$$E = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \cdots & \xi_{1n} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \cdots & \xi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \xi_{m1} & \xi_{m2} & \cdots & \xi_{mn} \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中: ξ_{ij} 为第 i 个准则层中第 j 个指标的关联系数;

$W = [w_1, w_2, w_3, \cdots, w_n]^T$ 为 n 个评价指标权重向量,

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1.$$

综合评价具体步骤为:

1) 确定最优指标集。其表达式为:

$$X^* = [X_1^*, X_2^*, \cdots, X_n^*] \quad (26)$$

结合原始数据构建矩阵 D , 并对指标进行标准化处理 (该文所述的无量纲化方法), 矩阵经标准化可得矩阵 C :

$$D = \begin{bmatrix} x_1^* & x_2^* & \cdots & x_n^* \\ x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \rightarrow C = \begin{bmatrix} c_1^* & c_2^* & c_3^* & \cdots & c_n^* \\ c_{11} & c_{12} & c_{13} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & c_{m3} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} \quad (27)$$

2) 计算灰色关联系数。拆分矩阵 C , 设参考数列: $C^* = [c_{10} \ c_{20} \ c_{30} \ \cdots \ c_{n0}]$, 比较数列: $C = [c_{i1} \ c_{i2} \ c_{i3} \ \cdots \ c_{in}]$, $i = 1, 2, \cdots, n$ 。求关联系数 ξ_{ik} , 其表达式为:

$$\xi_{ik} = \xi_{ik} = \frac{\Delta \min + \rho \cdot \Delta \max}{|c_k^* - c_{ik}| + \rho \cdot \Delta \max} \quad (28)$$

其中, $\Delta \min = \min_i \min_k |c_k^* - c_{ik}|$; $\Delta \max = \max_i \max_k |c_k^* - c_{ik}|$; ρ 是分辨系数, $\rho \in [0, 1]$ (本研究 ρ 取 0.5)。

3) 计算综合评价。

$$R = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ \cdots \ r_m] \quad (29)$$

由式 (24) ~ (25), 可得 $r_i = \sum_{k=1}^n \xi_{ik} \cdot w_k$, $i =$

1, 2, \cdots , m 。

2.4.3 确定最终综合评价

将 VA 和 GRA 计算出的综合评价价值取平均值得到最后的综合评价价值 ψ 为:

$$\psi = \frac{V + R}{2} \quad (30)$$

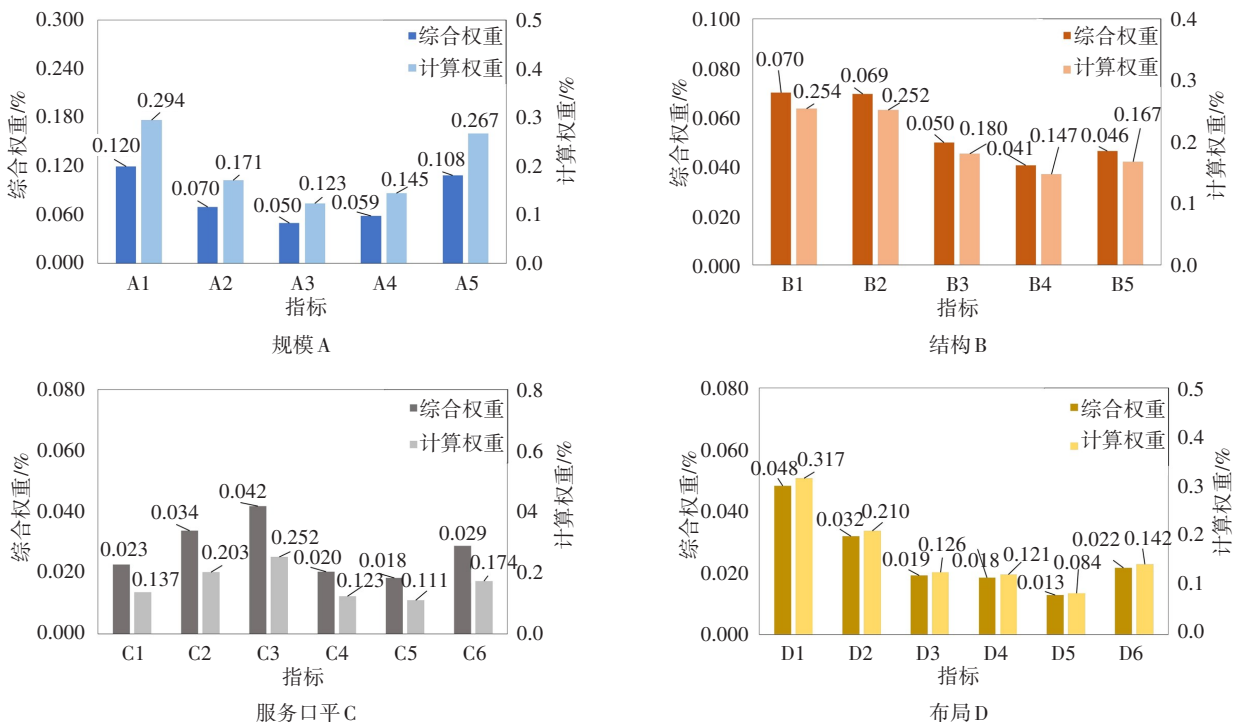


图3 评价指标权重

Fig. 3 The diagram of the CE index weight

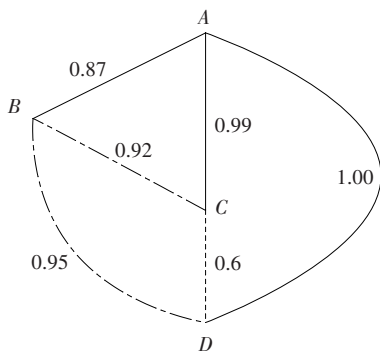


图4 准则层 credal 排序可视化

Fig. 4 The visualization of the credal ranking for main criteria

3 案例分析

3.1 研究对象描述

本研究以江苏省海门市为例,对其综合交通网络进行综合评价。海门市位于长江入海口,毗邻上海,相比于其他中小城市,海门市的交通构成较为丰富。

3.2 结果及评价

由VA和GRA得到的综合评价价值汇总见表3。由式(23)可以得到海门市综合交通网络综合评价价值为0.689。

海门市综合交通网络快速发展,有力地支持当地社会经济的快速增长。从综合评价结果来看,当前运输体系仍然存在诸多不足。公路运输是海门市当前的主要运输方式,但仍需深度挖掘,以满足日益增长的交通需求。相较于公路,其铁路、水路和航路的运输网络发展仍处于较低水平。由表3可知,“规模”和“结构”的各项指标得分较高,这两者在海门市综合交通网络评价中占据主导地位,对支撑海门市综合交通体系建设起关键作用。从指标赋权结果(图3)来看,提升中小城市综合交通网络的规模及优化其结构,对提升整体交通网络发展水平至关重要。针对海门市当前各交通模式的现状做简要分析,并提出相应的规划建议为:

1) 公路方面。

海门市公路网规模仍偏小,高速公路、二级公路与三级公路比例偏低,低等级公路(四级公路等)比例偏高,路网结构不协调。当前海门市干线路网饱和度较高,存在各通道严重重叠的现象,造成道

路服务水平低。以布局为例,高等级公路集中在主城及沿江地区,较少覆盖城市北部,路网布局不够合理。公路运输具有机动灵活的特点,适用于居民出行及货物的中短距离运输。尤其是对中小城市而言,其城市规模较小,因此,公路运输应该保证高可达性和高服务水平。针对这些不足,建议将现有的4条国省道改线,并建议新增S335等4条省道,如图5所示。



图5 公路网改进建议示意图

Fig. 5 Suggestions for highway network diagram

2) 铁路方面。

海门市铁路建设尚处于起步阶段,短板较明显,目前仅拥有一条过境的宁启铁路,总里程仅为38 km,铁路通车总里程数偏低,规模较小。当前,高铁出行已普及,成为越来越多人的出行选择,而海门市高速铁路出行尚未实现,其运输结构有待优化。当前海门市仅依靠宁启铁路与北部沿江城镇节点初步实现铁路联通,通道较为单一,通道运输能力有待加强。以铁路站点为例,海门站等级较低,功能不完全,铁路枢纽的功能尚未完全发挥,对海门市综合交通运输体系的发展支撑不足。规划建议新铺设北沿江高铁,自南通向东接入海门市境内,继而经通沪过江通道至上海,在海门市境内设海门站(客货运站),如图6所示。



图6 铁路网改进建议示意图

Fig. 6 Suggestions for railway network diagram

3) 水路方面。

海门市港口规模虽处于较高水平,但港口定位不清晰,功能发挥不充分。在等级航道中,高等级航道占比仍然较低,造成其与高等级港口的互通受限。此外,航道拥挤程度较高,造成其运输效率较

低,不能发挥其天然航道的运输优势。建议确定以长江干线为核心,三级航道为骨架的航道体系,促进江海联运,并以低等级航道作为补充,加强与通州湾疏港干线航道的畅通,形成“三纵三横二联”的内河航道网络,如图7所示。

表3 综合评价价值计算结果(价值分析法 & 灰色关联分析法)

Table 3 Comprehensive evaluation value obtained by VA and GRA

指标	评价值	标准值	无量纲化值	权重	VA	GRA		
						Δ	ζ_{ik}	综合评价价值
A1	2.23 km/km ²	6.20 km/km ²	0.359	0.120	0.043	0.641	0.270	0.040
A2	3.31 km/100 km ²	4.50 km/100 km ²	0.736	0.070	0.051	0.264	0.663	0.047
A3	0.9	0.9	1.000	0.050	0.050	0.000	1.000	0.050
A4	0.7	0.9	0.778	0.059	0.046	0.222	0.679	0.043
A5	0.7	0.8	0.875	0.108	0.095	0.125	0.805	0.088
B1	1.58%	4.5%	0.351	0.070	0.025	0.649	0.288	0.023
B2	19.5%	25.0%	0.780	0.069	0.054	0.220	0.743	0.052
B3	100.0%	70.0%	1.000	0.050	0.050	0.000	1.000	0.050
B4	100.0%	80.0%	1.000	0.041	0.041	0.000	1.000	0.041
B5	9.07%	25.00%	0.363	0.046	0.017	0.637	0.319	0.016
C1	0.74	0.70	0.946	0.023	0.022	0.054	0.933	0.021
C2	97.80%	95.00%	1.000	0.034	0.034	0.000	1.000	0.034
C3	14	24	0.583	0.042	0.024	0.417	0.545	0.023
C4	0.764	0.650	0.851	0.020	0.017	0.149	0.833	0.017
C5	4	5	0.800	0.018	0.015	0.200	0.787	0.014
C6	1.5	3.0	0.500	0.029	0.014	0.500	0.492	0.013
D1	100%	100%	1.000	0.047	0.048	0.000	1.000	0.048
D2	2.62	3.00	0.873	0.032	0.028	0.127	0.786	0.026
D3	65%	95%	0.684	0.019	0.013	0.316	0.587	0.012
D4	1.56	3.10	0.503	0.018	0.009	0.497	0.414	0.008
D5	75%	85%	0.882	0.013	0.011	0.118	0.785	0.010
D6	2.8	5.0	0.560	0.022	0.012	0.440	0.465	0.011
Σ			—	1.000	0.719	—	—	0.687

4) 航路方面。

在海门市内尚无机场,航空的发展相对滞后,海门市的居民主要是借南通市兴东国际机场完成出行的,但兴东机场距海门市较远,服务范围较小,且航线较少,总体等级偏低。由于长三角北部区域潜在的航空客运需求极大,现有机场布局无法满足

日益增长的需求。从长期来看,结合《海门市城市总体规划(2013—2030)》,建议建设海门机场,加快城市转型,打造面向全球的空港城市。此外,海门机场落地将引起综合交通网络的调整,有利于完善交通基础设施建设,优化各交通方式与沪通枢纽的衔接。

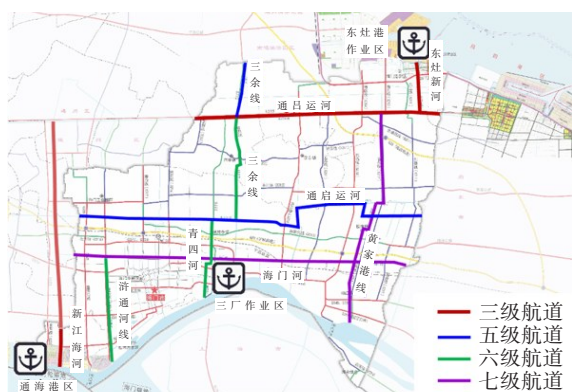


图7 水路网改进建议示意图

Fig. 7 Suggestions for waterway network diagram

4 结论

本研究以综合评价方法为理论基础,从规模、结构、服务水平和布局4个层面对中小城市综合交通网络评价指标进行聚类分析和筛选,并对筛选后的指标进行无量纲化处理和赋权,进而计算综合评价价值。通过案例分析,得出结论为:

1) 提出的综合评价体系可以同时评价中小城市综合交通网络中多个指标,体现一定的综合性和系统性。

2) 计算所得的综合评价价值能评估研究对象的综合水平,针对中小城市综合交通网络复杂的多层次特点,通过多角度评价分析,发现扩大其规模并优化其结构,对提升整体交通网络综合水平至关重要,为日后的布局优化奠定了理论基础。

3) 在确定指标权重的过程中,采取BWM进行赋权,结合多名决策者意见,提高了赋权结果的准确性。在计算综合评价价值时,采用VA与GRA相结合的方法,避免了单方法计算评价价值所带来的主观性。

参考文献(References):

- [1] MOURATIDIS K, PETERS S, WEE B V. Transportation technologies, sharing economy, and teleactivities: Implications for built environment and travel [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, 92: 102716.
- [2] 本刊讯. 国家发展改革委印发《2021年新型城镇化和城乡融合发展重点任务》[J]. 招标采购管理, 2021(4): 7-8.
BEN Kanxun. The national development and reform commission issued the key tasks of new urbanization and

urban-rural integration development in 2021 [J]. Tendering & Purchasing Management, 2021(4): 7-8.

- [3] BANDEIRA R A M, D'AGOSTO M A, RIBEIRO S K, et al. A fuzzy multi-criteria model for evaluating sustainable urban freight transportation operations [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 184: 727-739.
- [4] 方松, 余跃武. 城市生态交通系统评价[J]. 物流技术, 2021, 40(2): 14-17.
FANG Song, YU Yuewu. Evaluation of urban eco-traffic system[J]. Logistics Technology, 2021, 40(2): 14-17.
- [5] 张培林, 吴宏宇, 莫杨辉, 等. 大城市综合交通适应性评价[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(4): 77-82.
ZHANG Peilin, WU Hongyu, MO Yanghui, et al. Adaptability evaluation of the comprehensive traffic in large cities [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(4): 77-82.
- [6] NASSEREDDINE M, ESKANDARI H. An integrated MCDM approach to evaluate public transportation systems in Tehran [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, 106: 427-439.
- [7] DI Z, YANG L X, QI J G, et al. Transportation network design for maximizing flow-based accessibility [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 110: 209-238.
- [8] ALETA A, MELONI S, MORENO Y. A Multilayer perspective for the analysis of urban transportation systems[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 44359.
- [9] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, 2004(11): 119-121.
YU Xiaofen, FU Dai. Summary of multi-index comprehensive evaluation methods [J]. Statistics and Decision, 2004(11): 119-121.
- [10] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通工程学术研究综述·2016[J]. 中国公路学报, 2016, 29(6): 1-161.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's traffic engineering research progress: 2016 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(6): 1-161.
- [11] KOPYLOVA T, MIKHAILOV A, SHESTEROV E. A Level-of-Service concept regarding intermodal hubs of urban public passenger transport [J]. Transportation Research Procedia, 2018, 36: 303-307.
- [12] ZHU X J, FENG X S, ZHANG L K, et al. Optimizations of network layout and transport service frequencies in view of interests of transit line operators and utilizers [J]. Archives of Transport, 2019, 50(2): 47-55.

- [13] LI X, WANG M. Study on fuzzy comprehensive evaluation of integrated development of transportation and postal service in Hunan Province[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 831(1): 12055.
- [14] LI L X, WANG X, REZAEI J. A Bayesian best-worst method-based multicriteria competence analysis of crowd sourcing delivery personnel[J]. Complexity, 2020, 2020: 4250417.
- [15] 户佐安, 蒲政, 包天雯, 等. 基于TOPSIS法和灰色理论的交通信息网络布局优选[J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16(3): 38-45.
- HU Zuo'an, PU Zheng, BAO Tianwen, et al. Optimization of multi-attribute traffic information network layout model based on TOPSIS method and grey theory [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2018, 16(3): 38-45.
- [16] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model[J]. Omega, 2016, 64: 126-130.
- [17] MOHAMMADI M, REZAEI J. Bayesian best-worst method: A probabilistic group decision making model[J]. Omega, 2020, 96: 102075.
- (责任编辑: 罗容; 校对: 李脉; 英文编辑: 刘至真)

(上接第86页)

- (7): 11-15.
- [15] 张哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 50-58.
- ZHANG Zhe, SHAO Xudong, LI Wenguang, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 50-58.
- [16] 叶华文, 唐诗晴, 段智超, 等. 钢纤维混凝土-正交异性组合桥面板疲劳性能试验研究[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 115-121.
- YE Huawen, TANG Shiqing, DUAN Zhichao, et al. Experimental study on fatigue performance of steel fiber reinforced concrete-orthotropic composite bridge deck [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 115-121.
- [17] 项贻强, 郭树海. 复杂应力条件下快速施工钢-混组合梁群钉推出试件参数分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 246-254.
- XIANG Yiqiang, GUO Shuhai. Parameter analysis of push-out specimens with different group studs in accelerated bridge construction steel-concrete composite beams under complicated stress condition [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 246-254.
- (责任编辑: 李脉; 校对: 罗容; 英文编辑: 栗森)