

基于可变模糊集的区域内河航道健康发展评价研究

吴凤平, 吴 征, 周进梅

(河海大学商学院, 江苏 南京 211100)

摘要:以航道运行效果、安全性、支持保障性和环境友好性为评价要素,建立 14 个评价指标的区域内河航道健康发展评价指标体系。以宿迁市内河航道 2014 年统计数据为基础,采用可变模糊评价法对宿迁市内河航道健康发展水平进行测算。研究结果显示,不同参数组合下的宿迁市内河航道健康发展水平等级一致,14 个指标评价结果等级可分为三类,评价结果基本符合当前宿迁市内河航道发展的客观情况,可将建立的评价指标体系和可变模糊评价法引入内河航道健康发展水平的评价中。

关键词:区域内河航道;健康发展评价;可变模糊评价;宿迁市

中图分类号:TV213.9

文献标识码:A

文章编号:1003-9511(2017)02-0005-06

作为综合交通运输体系的一个重要组成部分,内河航道不仅发挥其基础作用,而且在促进现代工业、农业发展,改善人民生活,促进区域经济转型和推动文化交流中也扮演着重要角色。近年来,内河水运发挥的重要作用引起了中央和各级政府的高度重视。2011 年《关于加快长江等内河水运发展的意见》的出台,凸显了我国对内河水运发展的关注,明确了内河水运在我国综合发展中的战略地位。交通部随后出台了关于贯彻《国务院关于加快长江等内河水运发展的意见》的实施意见。2013 年《关于印发加快推进长江等内河水运发展行动方案(2013—2020 年)的通知》则更加细致地提出了今后我国内河水运发展的目标、任务和措施,力争到 2020 年建成现代化的内河水运体系——畅通、高效、平安、绿色。2014 年通过的《中华人民共和国航道法》对航道的规划、建设、养护、保护等做出了明确的规定,《中华人民共和国航道法》的实施将会促使内河航运在一个有法可依的环境下更好、更健康地发展,对开发、节约、利用和保护好有限的航道资源,充分发挥内河航运的天然优势,推进建成更高标准、更高效率的综合交通体系有重要的作用。内河航道发展规模的加大和速度的加快,要求内河航道的发展必须走健康发展之路,在减少能源消耗的同时尽可能地充分利用土地资源,避免对生态环境造成过多的负面影响,形成与社会、经济、环境协调发展的局面。

近年来,国外学者对内河航道的研究主要集中于内河水运的环境效益及其可持续发展上。如 Pires 等^[1]从分配效率、区域发展和环境影响入手,采用多准则法定量分析了内河航道基础设施的投资项目对内河航道发展的影响。Van Lier 等^[2]用生命周期理论(life-cycle assessment)全面评估了内河航道运输对环境的影响,认为内河航道运输给环境带来的影响主要与船舶运行、船队构建、船舶维护以及航道基础设施有关。Keuken 等^[3]采用线源模型将内河船舶排放对空气质量产生的影响量化,指出需要采取措施来减少内河运输的排放。Rohacs 等^[4]认为可持续发展交通运输体系是未来一个重要的发展方向,内河航道运输作为一种可与其他运输方式相互替代的运输方式,其在综合交通货运中占了很大的份额,且内河航道运输将会促进可持续交通运输体系的发展。Mihic 等^[5]认为多瑙河目前的运输方式不利于实现长久的水运可持续发展,指出只有实行有效的信息系统等管理措施才能实现多瑙河水运稳定、长久的可持续发展。在国内,孙建设^[6]采用模糊综合评价法构建数学模型,对内河航道外部性的主要影响因子进行分析、量化,确认了内河航道外部性的数量区间和内部化政策的边界,明确了政府在航道整治过程中应扮演的角色。王晨等^[7]以长江江苏段 4 段航道为实例,运用熵权 TOPSIS 模型,求得各评价对象的风险贴进度并进行排序,以此

基金项目:国家社会科学基金重大项目(12&ZD214)

作者简介:吴凤平(1964—),男,教授,主要从事规划与决策、水利经济研究。E-mail:wu_feng_pin@163.com

为依据评判各段航道引航的环境风险。侯瑛等^[8]提出航道建设期和运营期绿色水平评价指标体系,并将熵权法和灰色关联分析法相结合运用到航道建设水平的评价中。阮思阳等^[9]针对流域航运发展在航道治理、港口建设、港口管理以及社会安全方面存在的问题,提出航道沿岸各国应进一步加大整治,维护运河航道的力度,加强自身港口设施以及制度建设。刘均卫^[10]分析了长江航道建设的生态效益与影响,定义了生态航道的概念,并提出包括水生生态调查与监测、航道工程生态化、船舶工程生态化及船舶通航生态化等长江生态航道四方面的建设内容。周业付等^[11]从长江航道建设和流域经济两个子系统出发,采用主成分分析法研究了长江黄金水道建设与流域经济发展的协调关系。于黎等^[12]在可持续发展的基础上,界定了内河航运在社会、经济、生态三方面的主要特征,并进行了定量分析。

从以上综述可以看出,虽然目前对内河航道的评价较多,但大多数研究集中在内河航道建设项目评价,航道网规划方案评价,航道整治、维护评价以及航道可持续发展评价等方面,对于区域内河航道健康发展评价的研究较为少见。内河航道运输作为最具有资源节约、环境友好、生态良好比较优势的绿色运输方式,选择健康发展势在必行^[13],因此确定航道健康发展的定量化评价指标体系,客观评价航道发展的健康程度,具有重要的现实意义。

1 区域内河航道健康发展评价指标体系构建

健康发展的度量最初萌芽于生态系统领域。目前,对生态系统健康发展的评估指标主要以生态指标为主,对生态系统健康的评价已被广泛应用于湿地、草原、湖泊、森林、河流等生态系统^[14]。若内河航道没有得到很好的治理,缺乏有效的管理手段也会出现各种健康问题。鉴于此,本文在前人研究的基础上界定区域内河航道健康发展的内涵:区域内河航道运行状况良好,各项功能和效益可以正常发挥,与其他运输方式协调发展;内河航运过程中能够有效应对各种外来干扰确保运输安全性;内河航道具有完善的支持保障体系来支撑其运行;内河航道与区域生态环境保持友好,与内河航运相关的环境目标不断提高或改进。

为使构建的区域内河航道健康发展指标体系既能体现区域内河航道发展的健康状况,又不失指标的可测性、可代表性和可比性,且易于获得和量化,选取以下4个维度共同组成区域内河航道健康发展评价体系。

a. 运行效果性准则:着重从内河航道对区域社

会经济贡献的视角来评判区域内河航道健康发展状况。内河航道的良好运行,是保证内河航运各系统功能得到正常发挥的前提。内河航道的运行效果可以从航道投资、航道结构以及内河航运在综合交通运输体系中的地位等方面来体现。

b. 运输安全性准则:着重从行业安全的视角来评判区域内河航道健康发展状况。安全性是航道发展的生命线,健康的内河航道需要有相应的风险防范能力来减少事故的发生次数、相应的应急能力来降低事故的损失金额,以打造安全文明航道。

c. 支持保障性准则:着重从持续发展的视角来评判区域内河航道健康发展状况。支持保障性准则指内河航运过程中需要有相应的运营管理手段、信息化水平和政策制度来保障内河航道的健康发展。

d. 环境友好性准则:着重从生态视角来评判区域内河航道健康发展状况。环境友好性准则指内河航道建设、航道运输对区域生态环境和资源综合利用的影响。综合以上因素,构建区域内河航道健康发展评价指标体系,见表1。

2 区域内河航道健康发展评价方法

2.1 相对差异函数与相对隶属度

设论域 U , u 为 U 中的任意元素,在参考连续统^[15] 区间 $[1,0]$ 与 $[0,1]$ 的任意一点, u 的吸引性质 \underline{A} 对论域上模糊概念的相对隶属度为 $\mu_{\underline{A}}(u)$, 排斥性质的相对隶属度为 $\mu_{\underline{A}^c}(u)$, 且

$$\mu_{\underline{A}}(u) + \mu_{\underline{A}^c}(u) = 1 \quad (1)$$

设
$$D_{\underline{A}}(u) = \mu_{\underline{A}}(u) - \mu_{\underline{A}^c}(u) \quad (2)$$

称 $D_{\underline{A}}(u)$ 为 u 对 \underline{A} 的相对差异度^[16]。令

$$V = \left\{ (u, D) \mid u \in U, D_{\underline{A}}(u) = \mu_{\underline{A}}(u) - \mu_{\underline{A}^c}(u), D \in [-1, 1], u \in [0, 1] \right\} \quad (3)$$

$$A_+ = \{u \mid u \in U, 0 < D_{\underline{A}}(u) \leq 1\} \quad (4)$$

$$A_- = \{u \mid u \in U, -1 \leq D_{\underline{A}}(u) < 0\} \quad (5)$$

$$A_0 = \{u \mid u \in U, D_{\underline{A}}(u) = 0\} \quad (6)$$

式中: V 称为 U 的模糊可变集合; A_+ 为 V 的吸引域, A_- 为 V 的排斥域; A_0 为渐变式质变界。

假设 $X_0 = [a, b]$ 为模糊可变集合 V 实轴上的吸引区间, 满足 $0 < D_{\underline{A}}(u) \leq 1$, 存在包含 X_0 的区间 $X = [c, d]$, 且 $X_0 \subset X$, 如图1所示。

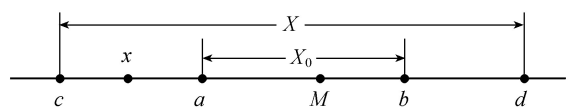


图1 点 x 、 M 与区间 X_0 、 X 位置关系

表 1 区域内河航道健康发展评价指标体系

目标层	准则层	指标层
区域内河航道健康发展评价	运行效果性准则	航道投资占综合交通总投资比
		高等级航道覆盖率
		对综合交通运输的贡献率
	运输安全性准则	事故直接经济损失
		应急能力
		信息化水平
	支持保障性准则	航标正常率
		船闸技术状况
		全员劳动生产率
		政策支持度
	环境友好性准则	能源节约
		内河航道水域总面积占比
		对水质的影响
		对水资源综合利用的影响

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \cdots & \theta_{1m} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \cdots & \theta_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \theta_{m1} & \theta_{m2} & \cdots & \theta_{mm} \end{bmatrix}$$

即目标集 P 关于重要性的有序二元比较矩阵。

矩阵中元素满足:① $0 \leq \theta_{ij} \leq 1, i \neq j$; ② $\theta_{ij} + \theta_{ji} = 1$; ③ $\theta_{ij} = 0.5, i = j$ 。

b. 二元比较矩阵 θ 明确了目标集 p_i 与 p_j 的模糊标度,在此基础上构建目标集的相及矩阵 Φ :

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & \theta_{12}/\theta_{21} & \cdots & \theta_{1m}/\theta_{m1} \\ \theta_{21}/\theta_{12} & 1 & \cdots & \theta_{2m}/\theta_{m2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \theta_{m1}/\theta_{1m} & \theta_{m2}/\theta_{2m} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

取矩阵中第一列元素表示目标集 P 中各目标对重要性的相对隶属度,以向量 φ 表示:

$$\varphi = (\varphi_{11}, \varphi_{21}, \dots, \varphi_{m1})^T = (1, \theta_{21}/\theta_{12}, \dots, \theta_{m1}/\theta_{1m})^T = \left(1, \frac{1 - \theta_{12}}{\theta_{12}}, \dots, \frac{1 - \theta_{1m}}{\theta_{1m}}\right)^T \quad (11)$$

$$\varphi_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当 } \theta_{ji} < \theta_{ij} \\ \theta_{ij}/\theta_{ji} & \text{当 } \theta_{ij} \geq \theta_{ji} \end{cases} \quad (12)$$

c. 根据向量 φ ,对目标集重要性的相对隶属度进行归一化处理,以归一化处理的结果值作为目标集的权重,以向量 β 表示:

$$\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m) = \left(1 / \sum_{i=1}^m \frac{1 - \theta_{1i}}{\theta_{1i}}, \frac{1 - \theta_{12}}{\theta_{12}} / \sum_{i=1}^m \frac{1 - \theta_{1i}}{\theta_{1i}}, \dots, \frac{1 - \theta_{1m}}{\theta_{1m}} / \sum_{i=1}^m \frac{1 - \theta_{1i}}{\theta_{1i}}\right) \quad (13)$$

2.3 航道健康发展评价模型

设区域内河航道健康发展评价构成的评价对象集为 U ,评价对象下的指标属性值构成指标特征值向量 $x = [x_1, x_2, \dots, x_m] = x_i, x_i$ 为第 i 个评价指标。对指标集中的定性指标采取三角模糊数两级比例量化法进行定量化处理。建立基于可变模糊集理论的区域内河航道健康发展的评价模型,具体步骤如下。

步骤 1:规范化处理评价指标值,利用二元对比法确定准则层和指标层权重,再融合确定评价指标的综合权重 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$ 。

步骤 2:对定性指标和定量指标分别依据三角模糊数两级比例量化法和有关规划、规范、标准的形式建立 c 级评价标准,建立区域内河航道健康发展等级区间矩阵 $Z = (z_{jh})_{m \times c}$ 。

步骤 3:在 c 个评价等级区间的标准值基础上,构建区域内河航道健康发展评价指标体系的吸引区间 $[a, b]$ 矩阵 I_{ab} 和指标体系排斥区间 $[c, d]$ 矩阵 I_{cd} :

M 表示区间 $[a, b]$ 中 $D_A(u) = 1$ 的点 (M 不必为 $[a, b]$ 的中点), x 为 X 区间内的任意点。当 x 在区间 $[c, M]$ 内时,相对差异函数模型为

$$\begin{cases} D_A(u) = \left(\frac{x-a}{M-a}\right)^\lambda & x \in [a, M] \\ D_A(u) = -\left(\frac{x-a}{c-a}\right)^\lambda & x \in [c, a] \end{cases} \quad (7)$$

当 x 在区间 $[M, d]$ 内时,其相对差异函数模型为

$$\begin{cases} D_A(u) = \left(\frac{x-b}{M-b}\right)^\lambda & x \in [M, b] \\ D_A(u) = -\left(\frac{x-b}{d-b}\right)^\lambda & x \in [b, d] \end{cases} \quad (8)$$

当 x 处于 X 区域外时,其相对差异函数模型为

$$D_A(u) = -1 \quad (9)$$

式中: λ 为非负指数,一般情况下取 $\lambda = 1$ 。根据式(1)和式(2),求得相对隶属度 $\mu_A(u)$ 为

$$\mu_A(u) = \frac{1 + D_A(u)}{2} \quad (10)$$

2.2 权重的确定

二元对比法是由陈守煜教授提出的一种权重确定法^[17]。该方法改进了层级分析法在语义上的不完全合理状况,可用于指标间的重要性和优越性比较。在实际的案例研究过程中,同时将论域 U 中所有元素进行比较难度较大,更无法在此基础上确定各个元素的相对隶属度。而二元对比法则是依次选取论域中的两个元素相比较,且将两两比较结果用数量的形式表示出来,并以此为基础确定权重,直到论域中所有的元素完成两两对比^[17-19]。

a. 假定区域内河航道健康发展共有 m 个评价目标,构成目标集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$,将目标集中元素 p_i 与 p_j 进行重要性排序后做二元比较,构成矩阵

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [a,b]_{11} & [a,b]_{12} & \cdots & [a,b]_{1c} \\ [a,b]_{21} & [a,b]_{22} & \cdots & [a,b]_{2c} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ [a,b]_{m1} & [a,b]_{m2} & \cdots & [a,b]_{mc} \end{bmatrix} = ([a,b]_{jh})$$

$$I_{cd} = \begin{bmatrix} [c,d]_{11} & [c,d]_{12} & \cdots & [c,d]_{1c} \\ [c,d]_{21} & [c,d]_{22} & \cdots & [c,d]_{2c} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ [c,d]_{m1} & [c,d]_{m2} & \cdots & [c,d]_{mc} \end{bmatrix} = ([c,d]_{jh})$$

式中: $j=1,2,\dots,m; h=1,2,\dots,c; [a,b]_{jh}, [c,d]_{jh}$ 分别为指标 j 在级别 h 下的关于吸引区间 $[a,b]$ 和排斥区间 $[c,d]$ 的标准区间值, 根据级别定义的物理概念确定指标 i 级别 h 的点值矩阵 I_M :

$$I_M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1c} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2c} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{m1} & m_{m2} & \cdots & m_{mc} \end{bmatrix} = (m_{jh})$$

步骤4: 在建立的吸引区间矩阵 I_{ab} 、排斥区间矩阵 I_{cd} 以及点值矩阵 I_M 的基础上根据式(7)~(10) 可求得内河航道健康发展各评价指标的相对隶属度, 并构成矩阵 $\mu_A(\mu)_{jh}$ 。

步骤5: 计算评价对象 u 对于等级 h 的综合相对隶属度 $v_A(u)$ 。评价指标 j 在级别 h 下关于区间的左、右极点的权距离分别为

$$d_L = \left\{ \sum_{j=1}^m [\omega_j(1 - \mu_A(u)_j)]^p \right\}^{1/p} \quad (14)$$

$$d_R = \left\{ \sum_{j=1}^m [\omega_j \mu_A(u)_j]^p \right\}^{1/p} \quad (15)$$

则对象 u 对于等级 h 的综合相对隶属度为

$$v_A(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_L}{d_R}\right)^\alpha} \quad (16)$$

α 与 p 分别取值 1 或 2。作为进一步优化评价模型而设置的准则参数 α 和距离参数 p 可有 4 种组合方式, 再对每种组合方式下的可变模糊评价结果取均值, 该方法的优点是使评价结果所反映的内容更加真实可靠。

步骤6: 对内河航道健康发展水平进行整体评

价时, 所对应的模糊概念为航道发展状况的健康程度, 要求所设 c 个等级的相对隶属度满足归一化条件。因此, 将步骤 5 所求的综合相对隶属度 $v_A(u)$ 统一作归一化处理, 结果表示为

$$v_A(u) = (v_A(u)_1, v_A(u)_2, \dots, v_A(u)_c) = (v_A(u)_h) \quad (h=1,2,\dots,c)$$

模糊综合评价法所遵循的最大隶属度原则在分等级条件下会出现因评判值差别较小而出现不适应的情况^[17,20-21]。为避免该问题, 应用级别特征值向量公式:

$$H = (1, 2, \dots, c) \cdot v_A(u)^T \quad (17)$$

变换可变模糊集中 α 与 p 的参数组合, 确定特征值 H 的变动范围, 分析 H 的稳定性, 最终确定区域内河航道健康发展水平的级别。

3 案例研究

3.1 评价对象及数据来源

以江苏省宿迁市内河航道健康发展状况作为评价案例。宿迁市处于长江三角洲经济带之中, 也是淮海经济带重要城市之一, 属于沿海、沿江的中间城市, 受周边发达城市的经济辐射, 是江苏省最年轻的城市, 也是黄淮地区新兴的城市。宿迁市拥有洪泽湖、骆马湖等重要湖泊, 内有京杭大运河、徐洪河、淮河、沂河、沭河等重要河道, 区域内水网密布, 航道众多。为确保研究结果的客观性和可比性, 相关数据均来自于《2014 年宿迁市统计年鉴》、《宿迁市交通统计年鉴》、《江苏航道船闸统计资料汇编》以及《2014 年宿迁市水资源公报》, 相关定性指标数据通过案卷研究、专家咨询、实地调研等方法收集, 并选用三角模糊数两级比例量化法对定性指标进行量化。

3.2 评价等级区间的建立

为使评价结果能相对真实、客观地反映航道健康发展的实际水平, 避免出现对同一评价对象因主观因素影响而导致评价结果差距较大, 通过查阅国家和江苏省航道相关部门的规划报告、管理规范以及与航道发展有关的研究成果资料, 在区域内河航道健康发展评价过程中建立 5 级评价标准。各指标的评价等级划分见表 2。

表 2 区域内河航道健康发展评价指标分级标准

分级	定量指标										定性指标	评语
	航道投资占综合交通总投资比/%	高等级航道覆盖率/%	对综合交通运输的贡献率/%	事故直接经济损失/万元	航标正常率/%	全员劳动生产率/(万 t·人 ⁻¹)	能源节约/亿元	内河航道水域总面积占比/%	对水质的影响/%			
1	>10	>80	>70	<50	>90	>0.55	>2.5	>2.0	<10	0.9~1.0	很健康	
2	10~7	80~60	70~58	50~125	90~78	0.55~0.40	2.5~2.0	2.0~1.5	10~20	0.9~0.7	健康	
3	7~4	60~40	58~45	125~185	78~65	0.40~0.25	2.0~1.5	1.5~1.0	20~30	0.7~0.5	一般	
4	4~1	40~20	45~30	185~250	65~50	0.25~0.10	1.5~1.0	1.0~0.5	30~40	0.5~0.3	不健康	
5	≤1	≤20	≤30	≥250	≤50	≤0.10	≤1.0	≤0.5	≥40	0.3~0	很不健康	

3.3 案例计算

步骤1:根据式(11)~(13)确定各维度指标的权重。各层指标权重计算结果见表3。

表3 指标权重计算结果

目标层	准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	最终指标权重
区域内河航道健康发展评价P	运行效果性准则A	0.254	航道投资占综合交通总投资比 A_{11}	0.242	0.0614
			高等级航道覆盖率 A_{12}	0.333	0.0846
			对综合交通运输的贡献率 A_{13}	0.425	0.1079
	运输安全性准则B	0.196	事故直接经济损失 B_{11}	0.425	0.0833
			应急能力 B_{12}	0.575	0.1127
	支持保障性准则C	0.254	信息化水平 C_{11}	0.248	0.0629
			航标正常率 C_{12}	0.145	0.0368
			船闸技术状况 C_{13}	0.222	0.0564
			全员劳动生产率 C_{14}	0.178	0.0452
			政策支持度 C_{15}	0.207	0.0528
	环境友好性准则D	0.296	能源节约 D_{11}	0.271	0.0802
			内河航道水域总面积占比 D_{12}	0.188	0.0556
			对水质的影响 D_{13}	0.229	0.0678
			对水资源综合利用的影响 D_{14}	0.312	0.0924

步骤2:根据表2构建吸引区间矩阵 I_{ab} 、排斥区间矩阵 I_{cd} :

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [15,10] & [10,7] & [7,4] & [4,1] & [1,0] \\ [100,80] & [80,60] & [60,40] & [40,20] & [20,0] \\ [100,70] & [70,58] & [58,45] & [45,30] & [30,0] \\ [0,50] & [50,125] & [125,185] & [185,250] & [250,300] \\ [100,90] & [90,78] & [78,65] & [65,50] & [50,0] \\ [0.7,0.55] & [0.55,0.4] & [0.4,0.25] & [0.25,0.1] & [0.1,0] \\ [3.0,2.5] & [2.5,2.0] & [2.0,1.5] & [1.5,1.0] & [1.0,0.5] \\ [2.5,2.0] & [2.0,1.5] & [1.5,1.0] & [1.0,0.5] & [0.5,0] \\ [0,10] & [10,20] & [20,30] & [30,40] & [40,50] \\ [1,0.9] & [0.9,0.7] & [0.7,0.5] & [0.5,0.3] & [0.3,0] \end{bmatrix}$$

$$I_{cd} = \begin{bmatrix} [15,10] & [15,4] & [10,1] & [7,0] & [4,0] \\ [100,60] & [100,40] & [80,20] & [60,0] & [40,0] \\ [100,58] & [100,45] & [70,30] & [58,0] & [45,0] \\ [0,125] & [0,185] & [50,250] & [125,300] & [185,300] \\ [100,78] & [100,65] & [90,50] & [78,0] & [65,0] \\ [0.7,0.4] & [0.7,0.25] & [0.55,0.1] & [0.4,0] & [0.25,0] \\ [3.0,2.0] & [3.0,1.5] & [2.5,1.0] & [2.0,0.5] & [1.5,0.5] \\ [2.5,1.5] & [2.5,1.0] & [2.0,0.5] & [1.5,0] & [1.0,0] \\ [0,20] & [0,30] & [10,40] & [20,50] & [30,50] \\ [1,0.7] & [1,0.5] & [0.9,0.3] & [0.7,0] & [0.5,0] \end{bmatrix}$$

步骤3:根据实际问题的物理概念确定点值矩阵 I_M ,确定标准为:①1、2级中的 M 点取其吸引域 $[a,b]$ 的左极点 a ;②3级中的 M 点由其吸引域 $[a,b]$ 的中点 $(a+b)/2$ 确定;③4、5级中的 M 点取其吸

引域 $[a,b]$ 的右极点 b 。

据此得到标准点值矩阵 I_M 为

$$I_M = \begin{bmatrix} 15 & 10 & 5.5 & 1 & 0 \\ 100 & 80 & 50 & 20 & 0 \\ 100 & 70 & 51.5 & 30 & 0 \\ 0 & 50 & 155 & 250 & 300 \\ 100 & 90 & 71.5 & 50 & 0 \\ 0.7 & 0.55 & 0.325 & 0.1 & 0 \\ 3.0 & 2.5 & 1.75 & 1.0 & 0.5 \\ 2.5 & 2.0 & 1.25 & 0.5 & 0 \\ 0 & 10 & 25 & 40 & 50 \\ 1 & 0.9 & 0.6 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

步骤4:通过已确定的吸引区间矩阵 I_{ab} 、排斥区间矩阵 I_{cd} 和点值矩阵 I_M 判断指标值 x 属于 M 点左侧或是右侧,据此使用式(7)或式(8)计算相对差异函数 $D_{\underline{A}}(u)_{jh}$,再由式(10)求解相对隶属度矩阵 $\mu_{\underline{A}}(u)$:

$$\mu_{\underline{A}}(u) = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.000 & 0.049 & 0.549 & 0.452 \\ 0.095 & 0.595 & 0.405 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.003 & 0.997 & 0.498 \\ 0.430 & 0.930 & 0.930 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.500 & 0.500 & 0.000 \\ 0.000 & 0.625 & 0.750 & 0.000 & 0.000 \\ 0.945 & 0.945 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.500 & 0.500 & 0.000 \\ 0.360 & 0.860 & 0.140 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.500 & 0.500 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.350 & 0.650 & 0.150 \\ 0.000 & 0.500 & 0.600 & 0.550 & 0.000 \\ 0.960 & 0.540 & 0.460 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.625 & 0.750 & 0.000 & 0.000 \end{bmatrix}$$

步骤5:根据式(14)~(16)计算参数 α 与 p 不同取值情形下的综合相对隶属度并进行归一化处理,同时应用式(17)计算内河航道健康发展可变模型评价结果,见表4。

表4 不同参数组合的模糊评价结果

参数组合	综合相对隶属度向量 $v_{\underline{A}}(u)$	级别特征值 H	健康等级
$\alpha=1, p=1$	(0.109, 0.245, 0.328, 0.250, 0.067)	2.922	一般,偏健康
$\alpha=1, p=2$	(0.139, 0.230, 0.287, 0.259, 0.084)	2.919	一般,偏健康
$\alpha=2, p=1$	(0.035, 0.236, 0.467, 0.250, 0.012)	2.968	一般,偏健康
$\alpha=2, p=2$	(0.069, 0.230, 0.377, 0.303, 0.021)	2.978	一般,偏健康

3.4 评价结果分析

从不同的参数组合计算结果可以看出,宿迁市内河航道健康发展的总体水平处在一般偏向健康区

间,显示出宿迁市内河航道整体发展呈现健康趋势,但是航道健康发展的程度相对较低,这与宿迁市内河航道在当前江苏省航道建设发展的实际状况相符。通过实证分析,一方面,表明该市内河航道健康发展取得了一些效果,但也存在内河航道交通发展投资不足、地方政府重视程度不够等问题;另一方面,表明采用可变模糊评价方法评价航道发展的健康程度具有可行性,也验证了模型的合理性与有效性。

4 结 语

a. 以区域内河航道健康发展水平为核心,综合考虑航道运行效果、安全性、保障性和环境友好性等因素对内河航道健康发展水平的影响作用,建立了4个维度的评价准则,以及14个评价指标的区域内河航道健康发展评价指标体系。从实证分析结果可以看出,该指标体系能较为全面地反映航道健康发展的客观状况。选用二元对比法对评价准则和指标赋权,结果表明,该权重确定方法更符合思维逻辑习惯,具有较好的适用性。

b. 可变模糊集法被广泛应用于具有模糊性和不确定性的多层次、多目标评价问题。区域内河航道健康发展评价体系是一个关系复杂、动态多变的体系,存在着许多不确定性因素,具有明显的模糊性,并且对于评价结果的优劣没有绝对分明的界限,采用精确的数学方法研究这一模糊问题困难较大。而可变模糊评价法可以有效解决评价指标标准区间值对评价结果的影响,通过变化模型参数,合理地确定评价指标对各级指标标准区间的相对隶属度,进而提高评价结果的可信度。宿迁市内河航道的实证研究显示,变化不同的参数组合所得的整体级别特征值大致相同,健康水平等级一致,基本符合当前宿迁市内河航道发展的健康水平。表明可变模糊集理论对该类问题有较好的适用性,可引入内河航道健康发展水平的评价中,为合理开发利用内河航道提供决策参考依据。

参考文献:

[1] PIRES JR F C M, DE CARVALHO F S. Multicriteria analysis of inland waterway transport projects: the case of the Marajo Island waterway project in Brazil [J]. Transportation Planning & Technology, 2013, 36: 435-449.

[2] VAN LIER T, MACHARIS C. Assessing the environmental impact of inland waterway transport using a life-cycle assessment approach: the case of Flanders [J]. Research in Transportation Business & Management, 2014, 12: 29-40.

[3] KEUKEN M P, MOERMAN M, JONKERS J, et al. Impact of inland shipping emissions on elemental carbon concentrations near waterways in the Netherlands [J]. Atmospheric Environment, 2014, 95: 1-9.

[4] ROHÁCS J, SIMONGÁTI G. The role of inland waterway navigation in a sustainable transport system [J]. Acta Biochimica Polonica, 2007, 54(4): 857-861.

[5] MIHIC S, GOLUSIN M, MIHAJLOVIC M. Policy and promotion of sustainable inland waterway transport in Europe-Danube River [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(4): 1801-1809.

[6] 孙建设. 内河航道外部性实证研究与对策建议 [J]. 现代经济探讨, 2009(2): 54-58.

[7] 王晨, 江福才, 马全党. 基于熵权 TOPSIS 模型的航道引航环境风险评价 [J]. 安全与环境学报, 2016(3): 33-37.

[8] 侯珏, 刘芳, 陈征. 基于熵权和灰色关联分析的航道绿色水平综合评价方法 [J]. 大连海事大学学报, 2016, 42(3): 56-62.

[9] 阮思阳, 李宇薇. 澜沧江—湄公河国际水运通道建设研究 [J]. 广西社会科学, 2016(6): 52-57.

[10] 刘均卫. 长江生态航道发展探析 [J]. 长江流域资源与环境, 2015(增刊1): 9-14.

[11] 周业付, 罗晰. 长江黄金水道建设与流域经济发展协调关系研究: 基于主成分分析 [J]. 华东经济管理, 2015(8): 67-70.

[12] 于黎, 王多银, 汪承志. 内河航运可持续发展评价内容分析 [J]. 中国水运, 2013, 13(6): 23-26.

[13] 权美香. 内河水运投资对区域经济增长的贡献研究: 以江苏省为例 [D]. 南京: 河海大学, 2013.

[14] 郭坤荣. 大汶河生态健康评价研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2007.

[15] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1994.

[16] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2009.

[17] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2002.

[18] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

[19] 曹永强, 王本德, 刘金禄. 基于二元对比定权法的水质评价模型及其应用 [J]. 水电能源科学, 2002, 20(3): 19-21.

[20] 陈守煜, 胡吉敏. 可变模糊评价法及在水资源承载能力评价中的应用 [J]. 水利学报, 2006, 37(3): 264-271.

[21] 陈守煜, 于雪峰. 相对隶属度理论及其在地下水水质评价中应用 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2003, 22(5): 691-694.

(收稿日期: 2016-07-20 编辑: 胡新宇)