

文章编号:1000-4653(2025)03-0098-08

# 预约模式下考虑碳排放的内河通航 枢纽服务水平评价

蒋军, 李火梅, 尹泓, 马志明

(重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

**摘要:**从通航服务、预约通航、绿色低碳等方面构建了6个一级指标和22个二级指标的预约模式下内河通航枢纽服务水平指标体系。其次,运用博弈综合赋权法将区间二元语义法和CRITIC法分别确定的定性权重与定量权重进行组合赋权。接着,基于物元可拓理论构建了预约模式下内河通航枢纽服务水平评价模型。最后,以长江三峡通航枢纽为例开展实证分析,验证了模型的科学性和可行性。研究结论对提升内河通航枢纽服务水平具有较好的参考价值。

**关键词:**预约通航; 服务水平评价; 碳排放; 物元可拓

中图分类号:U697 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.012

## Service level evaluation of inland navigation hub considering carbon emissions under reservation mode

JIANG Jun, LI Huomei, YIN hong, MA Zhiming

(School of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** From the aspects of navigation service, reservation navigation, green and low carbon, the service level index system of inland navigation hub under the reservation mode of 6 first-level indicators and 22 second-level indicators is constructed. Secondly, the game comprehensive weighting method is used to combine the qualitative weights and quantitative weights determined by the interval two-tuple linguistic method and the CRITIC method respectively. Then, based on the matter-element extension theory, the service level evaluation model of inland navigation hub under the reservation mode is constructed. Finally, taking the Three Gorges navigation hub of the Yangtze River as an example, the empirical analysis is carried out to verify the scientificity and feasibility of the model. The research conclusion has a good reference value for improving the service level of inland navigation hub.

**Key words:** appointment for gate clearance; service level evaluation; matter-element extension; carbon emission

水路运输具有运能大、能耗低、污染小等优势,近年来发展十分迅速。但是,也导致部分内河通航枢纽出现了极度拥堵现象。例如三峡枢纽通过能力无法适应水运需求的增长,2022年1月份三峡下行平均待闸时间已超过200小时<sup>[1]</sup>,基本处于满负荷运行。近年来,为缓解船舶通航拥堵状况,实现通航

时空均衡性和充分利用通航设施,国内多个枢纽开始实施“预约”通航<sup>[1]</sup>策略。随着信息技术的发展,“预约”通航模式将逐步运用于各个内河通航枢纽,预约模式下内河通航枢纽服务水平评价也逐步成为人们关注的焦点。

回顾以往通航枢纽服务水平研究,主要集中于

收稿日期:2024-02-29

基金项目:重庆市教育委员会人文社会科学研究项目(23SKGH141);重庆市研究生科研创新项目(CYS22409)

作者简介:蒋军(1983—),男,副教授,工学博士,研究方向为港口、航运与综合物流。E-mail:362531571@qq.com

通信作者:李火梅(1998—),女,硕士研究生,研究方向为航运与多式联运。E-mail:2411368051@qq.com

引用格式:蒋军,李火梅,尹泓,等. 预约模式下考虑碳排放的内河通航枢纽服务水平评价[J]. 中国航海,2025,48(3):98-105.

JIANG J, LI H M, YIN H, et al. Service level evaluation of inland navigation hub considering carbon emissions under reservation mode [J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 98-105. (in Chinese)

枢纽通过能力、船舶待闸时间和船闸利用率等<sup>[3-6]</sup>指标,其评价指标体系的构建尚不够完善。此外,以往内河通航枢纽服务水平评价未考虑碳排放因素,但随着全球温室效应加剧,当今社会发展也越来越重视环境问题,碳排放已成为当前交通运输行业重点关注的问题。因此,研究内河通航枢纽服务水平评价也应该考虑碳排放。当前,服务水平评价理论已具有较丰富的研究成果,例如层次分析法<sup>[7]</sup>、熵权法<sup>[8]</sup>、网络分析法<sup>[9]</sup>、云模型<sup>[10]</sup>、模糊评价模型<sup>[11]</sup>以及 SERVQUAL<sup>[12]</sup>等。服务水平评价研究不断引入了马氏链<sup>[13]</sup>、物元<sup>[14]</sup>可拓<sup>[15]</sup>理论等新理论,对构建服务评价模型具有重要参考借鉴作用。

针对内河通航枢纽服务水平评价指标体系不完善及绿色低碳发展的需求,本文提出预约模式下考虑碳排放的内河通航枢纽服务水平评价指标体系,运用博弈论综合赋权法克服区间二元语义赋权和 CRITIC 赋权的局限性,融合两种方法的优势,得到组合权重,并基于物元可拓理论来构建内河通航枢纽服务水平评价模型。

## 1 预约模式下内河通航枢纽服务水平评价指标体系构建

### 1.1 服务水平评价指标体系构建原则

内河通航枢纽作为内河航运建设的重要设施,由诸多系统组成,其服务水平影响因素较多,为保证预约模式下内河通航枢纽服务水平评价指标的有效性应遵行以下原则。

1) 可行性:即选取的指标在现有条件下能直接或间接测量。

2) 科学性:即选取指标应符合预约模式下内河通航枢纽实际情况并能进行科学验证。

3) 可靠性:即评价指标的概念明确,稳定可靠,准确无误。

4) 系统性:即选取指标覆盖因素全面。

5) 独立性:各评价指标相互应该独立存在,即各指标间界限清楚,不具有重复部分。此外,指标相互不能推算。

### 1.2 构建预约模式下内河通航枢纽服务水平评价指标体系

安全、高效、畅通是船舶通航追求的主要目标,本文参考内河通航枢纽服务水平往年研究经验,分别从通航效率、通航安全、通航可靠等三个方面对内河通航枢纽本身运行情况进行评价。根据船舶通航需求和相关影响因素提出通航效率、通航安全及通

航可靠的二级评价指标。其中,通航效率充分考虑船舶过闸和通航设施利用两种因素。通航安全主要从坝区事故发生情况、安全设备完备情况及对突发情况的处理等方面选取二级指标。通航可靠则从检修、监测以及管理人员水平等方面构建二级指标,具体如表 1 所示。

严格规范碳排放是当前世界可持续发展的需求,本文将枢纽碳排放作为服务水平评价指标选取的重要方面。碳排放作为近年来的研究热点和难点,目前主要利用燃料燃烧消耗与碳系数关系进行计算,但维持枢纽运行的能源具有明显差异性,无法通过传统碳排放核算进行评价。因此,本文将预约模式下碳排放评价分为两个方面,一是维持枢纽运营造成的碳排放,二是船舶通过枢纽产生的碳排放。鉴于枢纽本身碳排放量核算困难,本文采用设备及能源运用情况、相关节能技术等进行评价,具备包括节能设备使用率、清洁能源利用率和节能技术应用水平。针对船舶通航所引起的碳排放,则根据船舶碳排放核算公式进行计算。

较传统内河通航枢纽服务水平评价,预约模式下内河通航枢纽服务水平评价还需对预约服务系统进行评价。针对预约服务系统评价,主要考虑预约服务效果和预约服务公平。其中,预约服务效果包括预约系统稳定性、预约结果可靠性及预约操作便利性。依据服务水平评价指标选取原则,本文以预约系统出错率、预约时间调整次数、预约流程复杂度等指标进行评价,具体如表 1 所示。预约服务公平性则从预约服务的覆盖程度、预约排列顺序等方面来选取指标。

综上,本文从通航效率、通航安全、通航可靠、预约服务便捷、预约服务公平及碳排放等六个方面构建了预约模式下通航建筑物服务水平评价指标体系,具体内容如表 1 所示。

对于表 1 中的定量指标,部分指标已具有明确的数值考核标准即直接运用,对于未有明确考核标准的指标则根据现有可量化参数计算所得。定性指标则依托于专家评价,主要采取百分制。

## 2 基于物元可拓理论的评价模型构建

根据物元可拓理论建立经典域、节域、待评价物元和各评价指标的关联系数矩阵。首先,运用区间二元语义处理专家信息的不确定性,并计算得到各指标定性权重,运用 CRITIC 计算指标定量权重。然后,借助博弈理论处理上述两个权重得到综合权

表 1 预约模式下通航建筑物服务水平评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system for ship lock service level under reservation mode

目标	一级指标 $A_i$	二级指标 $C_{ij}$	指标性质	指标解析
通航效率		船舶平均等待时间 $C_{11}$	定量	年平均船舶等待过闸时间(小时)
		枢纽平均通航率 $C_{12}$	定量	全年实际通航天数与全年总天数的比值
		船舶过闸时间 $C_{13}$	定量	平均每艘船舶(包括危险品船和客船)完成通航作业总时间(分钟)
		船闸利用率 $C_{14}$	定量	排布进闸室内的船舶总面积与闸室面积的比值
通航安全		坝区航道事故率 $C_{21}$	定量	坝区每年出现事故次数(指造成人员伤亡或财产损失的事件)与该年通航闸次的比值
		通航安全设备完整率 $C_{22}$	定量	已有通航安全设备数量与按相关规定应该配备的通航安全设备数量的比值
		应急预案合理性 $C_{23}$	定性	由专家进行评价应急预案是否全面、完整及合理
通航可靠		设备故障停航率 $C_{31}$	定量	每年因设备故障停航时间(包括维修时间)与船闸计划运营时间的比值
		检修效率 $C_{32}$	定量	单次检修(主要指年修)停航时间(天)
		管理人员水平 $C_{33}$	定性	枢纽运营管理人员水平高低,主要考察相关人员不同船型、主尺度排布的合理性,由专家评价资格证书、日常培训与考核等
		枢纽监测技术水平 $C_{34}$	定性	由专家评价监测技术自动化程度和能否及时响应两个方面评价
预约服务		系统出错率 $C_{41}$	定量	预约系统每年出错次数
		预约时间稳定性 $C_{42}$	定量	每年预约时间调整次数与预约次数的比值
		预约流程复杂度 $C_{43}$	定性	由预约客户评价预约流程是否很复杂,不方便操作
		预约服务时间误差 $C_{44}$	定量	预约时间与实际通航时间的差值(分钟)
预约公平		预约覆盖率 $C_{51}$	定量	提交预约通航船舶数量与通航船舶总数量比值
		预约优先级 $C_{52}$	定性	是否按照国家相关法律法规规定,对优先级船舶进行优先通航
		同批次预约时间差 $C_{53}$	定量	预约船舶过闸时间差(分钟)
碳排放		节能设备使用率 <sup>[16]</sup> $C_{61}$	定量	枢纽已使用节能设备数量与行业领域可使用节能设备数量的比值
		清洁能源利用率 <sup>[17]</sup> $C_{62}$	定量	枢纽已用清洁能源项目数量与行业领域可使用清洁能源项目数量的比值
		节能技术应用水平 $C_{63}$	定性	指供电节能技术和启闭控制节能技术等,依托专家评价
		坝区船舶碳排放量 $C_{64}$	定量	以日均船舶碳排放核算,即碳系数与日均燃料消耗的乘积 <sup>[18]</sup> (吨)

重,以便弥补两方面计算权重的不足。最后,根据经典域、节域确定评价物元的综合关联度,引入置信度和等级赋值识别评价物元的等级。

## 2.1 数据处理

### 1) 数据标准化

本文以 min-max 标准化对插补数据进行标准化

(归一化)处理。

### 2) 数据插补

由于本文构建的 22 个具体评价指标出现时间存在差异性。因此,收集数据时难免会存在一定的缺失。为保证数据的相对完整性和后续计算的准确性,本文借助随机森林插值算法处理缺失值。

随机森林插值法对具有多个标签的数据进行补充的原理是把其中数据缺失特征作为标签,剩余特征和原本的标签组成新的特征矩阵。在新特征矩阵中,对含有缺失值的列进行0的填补,最后利用随机回归模型对缺失值进行补充。

## 2.2 基于博弈论组合赋权

在确定各指标相对评价目标的权重时,本文从定性和定量两个方面计算,并运用线性博弈理论来组合权重。

### 1) 基于区间二元语义赋权

较层次分析法等常规方法,区间二元语义能灵活处理专家评价信息的不确定性,更为完整、准确地表征专家评价信息。因此,本文采用区间二元语义<sup>[19]</sup>处理专家评价信息,从定性角度计算各指标重要性权重。

### 2) CRITIC 赋权

搜集船闸的相关评价指标数据,运用 CRITIC<sup>[20]</sup>权重计算理论,得到预约模式下考虑碳排放的船闸服务水平评价指标的定量权重。

### 3) 博弈组合赋权

根据博弈方法将两种权重进行组合优化。

#### ①两个权重线性组合:

$$\mathbf{W}_i = \alpha_1 \mathbf{w}_i^T + \alpha_2 \boldsymbol{\lambda}_i^T \quad (1)$$

式(1)中: $\mathbf{W}_i$ 为指标线性组合权重, $\mathbf{w}_i$ 为区间二元语义赋权计算所得指标的定性权重, $\boldsymbol{\lambda}_i$ 为 CRITIC 赋权所得指标  $i$  的定量权重, $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 为权重系数。

②基于博弈集结理论,以离差极小化为优化目标,建立目标函数:

$$\min \sum_{\rho=1}^m \left\| \sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{W}_i^T - W_p \right\|^2 \quad (2)$$

$W_p$ 为单一方式计算的权重, $\alpha_i$ 为权重系数。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{w}_i \mathbf{w}_i^T & \mathbf{w}_i \boldsymbol{\lambda}_i^T \\ \boldsymbol{\lambda}_i \mathbf{w}_i^T & \boldsymbol{\lambda}_i \boldsymbol{\lambda}_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_i \mathbf{w}_i^T \\ \boldsymbol{\lambda}_i \boldsymbol{\lambda}_i^T \end{bmatrix} \quad (3)$$

#### ③所得系数做归一化处理。

## 2.3 节域和经典域

对预约模式下内河通航枢纽服务水平等级进行划分,并确立各个评价指标数值和打分的取值区间,从而确定各服务水平等级对应的经典域。

$$\mathbf{R}_i = (N, c, v) = \begin{bmatrix} N_m & c_{i1} & v_{i1} \\ & c_{i2} & v_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{in} & v_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_m & c_{i1} & a_{i1}, b_{i1} \\ & c_{i2} & a_{i2}, b_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{in} & a_{ij}, b_{ij} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中: $\mathbf{R}_i$ 为评价对象的第  $i$  个特征物元, $N_m$ 为

评价等级, $c_{in}$ 为  $R_i$  的评价指标,等级对应下该指标的取值范围为  $v_{in}$ , $a_{ij}$ 为取值下界, $b_{ij}$ 为取值上界。

根据可拓理论中节域定理,本文将各评价指标数值或评分取值范围作为预约模式下内河通航枢纽服务水平评级模型的节域,节域  $\mathbf{R}_{pi}$  可表示为:

$$\mathbf{R}_{pi} = (N_{pi}, c_{pij}, V_{pij}) = \begin{bmatrix} N_{pi} & c_{pi1} & V_{pi1} \\ & c_{pi2} & V_{pi2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{pin} & V_{pin} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{pi} & c_{pi1} & a_{pi1}, b_{pi1} \\ & c_{pi2} & a_{pi2}, b_{pi2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{pin} & a_{pij}, b_{pij} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中: $N_{pi}$ 为评价等级, $c_{pin}$ 为该等级对应指标, $V_{pij}$ 为相应评价等级和指标对应取值范围, $a_{pij}$ 为取值下界, $b_{pij}$ 为取值取上界。

后续计算均基于标准化的数据,因此经典域具体取值见表2,节域为0-1。

## 2.4 物元化

根据物元理论,预约模式下船闸服务水平评价一级指标化为

$$\begin{bmatrix} \text{服务水平评价} & \text{通航效率} & \text{评价结果 1} \\ & \text{通航安全} & \text{评价结果 2} \\ & \text{通航可靠} & \text{评价结果 3} \\ & \text{预约服务} & \text{评价结果 4} \\ & \text{预约公平} & \text{评价结果 5} \\ & \text{碳排放} & \text{评价结果 6} \end{bmatrix} \quad (6)$$

二级指标物元化为(它二级指标物元化同理):

$$\begin{bmatrix} \text{通航效率} & \text{船舶平均等待时间} & \text{评价结果 1} \\ & \text{过闸安排计划} & \text{评价结果 2} \\ & \text{船舶过闸时间} & \text{评价结果 3} \\ & \text{船闸利用率} & \text{评价结果 4} \end{bmatrix} \quad (7)$$

## 2.5 建立评价等级关联函数

结合各指标取值范围和各评价等价取值范围,根据物元可拓理论的关联函数求解模型计算各指标于相应等级下的关联度,并结合前文所得博弈综合权重确定通航建筑物的整体服务水平等级。

各评价等级所对应的有界区间:

$$v_{ij} = [a_{ij}, b_{ij}] \quad (8)$$

式(8)中: $v_{ij}$ 为评价指标取值区间, $a_{ij}$ 下极限, $b_{ij}$ 为上极限。

有界区间的模为:

$$|v_{ij}| = |a_{ij}, b_{ij}| \quad (9)$$

指标取值到区间的距离:

$$\rho(C_{ij}, v_{ij}) = \left| C_{ij} - \frac{1}{2}(a_{ij} + b_{ij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ij} - a_{ij}) \quad (10)$$

$C_{ij}$ 为评价指标的取值,  $\rho(C_{ij}, v_{ij})$ 为  $C_{ij}$ 到模  $v_{ij}$  的距离。

$$k_{C_{ij}^r}(v_{ij}) = \begin{cases} \frac{-\rho(C_{ij}, v_{ij})}{|v_{ij}|} & (C_{ij} \in v_{ij}) \\ \frac{\rho(C_{ij}, v_{ij})}{\rho(C_{ij}, v_{ij}) - \rho(C_{ij}, v_{ij})} & (C_{ij} \notin v_{ij}) \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中:  $k_{C_{ij}^r}(v_{ij})$ 为指标  $C_{ij}$ 于评价等级  $r$  级下的关联度。

## 2.6 基于权重计算综合关联度

利用前文中计算得到的综合权重,并将权重赋予到关联矩阵中,得到最终关联矩阵对船闸输出服务水平评价结果。

$$\mathbf{K}_{C_{ij}^r}(v_{ij}) = k_{C_{ij}^r}(v_{ij}) \mathbf{W}_i \quad (12)$$

式(12)中:  $\mathbf{K}_{C_{ij}^r}(v_{ij})$ 为考虑权重后各指标于  $r$  等级下的综合关联度,  $\mathbf{w}_i$ 为博弈组合赋权值。

## 2.7 服务水平分级

参考各相关领域服务水平等级划分方式,本文评价结果采用评价集  $V_i = \{V \text{级(不合格)}, IV \text{级}, III \text{级}, II \text{级}, I \text{级}\}$  五个等级的评价方式,代表服务水平质量依次递增,不取边界值,每个等级呈现出船闸服务水平状态如表2所示。

表2 评价等级

Tab.2 Evaluation Levels

评价等级	经典域	通航状态
I级	0.9-1	通航环境很安全稳定,通航效率很高,碳排放极低,船舶过闸几乎不等待
II级	0.6-0.9	通航环境较安全稳定,通航效率较高,碳排放较低,船舶等待时间较短
III级	0.3-0.6	通航环境基本安全稳定,通航效率一般,碳排放一般,船舶等待时间一般
IV级	0.1-0.3	通航环境较不安全稳定,通航效率较低,碳排放较高,船舶等待时间较长
V级 (不合格)	0-0.1	通航环境非常不安全稳定,通航效率很低,碳排放很高,船舶等待时间很长

## 3 案例分析

本文选取三峡通航枢纽来开展预约模式下考虑碳排放的内河通航枢纽服务水平评价分析。

### 3.1 数据处理

本文数据主要来源于《长江航运发展报告》和网络数据资源搜索,由于预约过闸是船舶通航新模式,相关数据存在缺失(如图1所示)。因此,本文采用随机森林插值法对缺失的数值进行补充,并结合实际进行优化调整,再对补充完整的数据进行标准化处理。

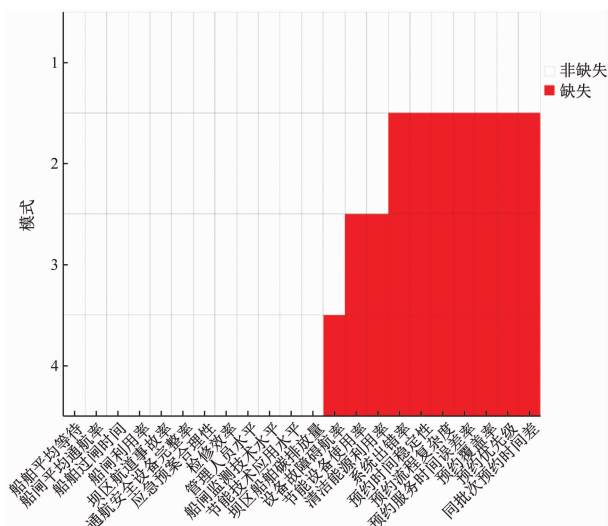


图1 数据缺失值模式

Fig.1 Data missing distribution

为显示所有数据的插补情况,本文将上述指标所有数值按照排列顺序编号,运用 Matlab 软件得出插补数据波动图,如图2所示。

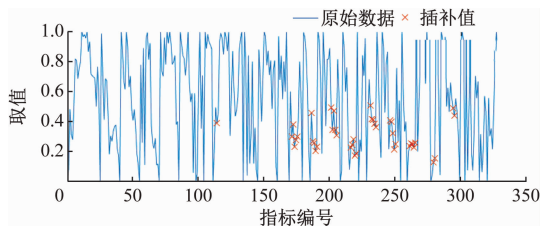


图2 插补后数据波动图

Fig.2 Interpolated Data Fluctuation Chart

### 3.2 权重计算

#### 1) 区间二元语义

以二元组  $(s_i, \alpha)$  表示评价对象的评价语集,本文运用3个评价语集,分别为5元素评价语集  $X = \{\text{很不重要}(x_1), \text{不重要}(x_2), \text{一般}(x_3), \text{重要}(x_4), \text{很重要}(x_5)\}$ ,7元评价语言集  $Y = \{\text{完全无意义}(y_1), \text{无意义}(y_2), \text{较无意义}(y_3), \text{一般}(y_4), \text{比较有意义}(y_5), \text{有意义}(y_6), \text{很有意义}(y_7)\}$ ,9元评价

语言集  $Z = \{ \text{极低}(z_1), \text{很低}(z_2), \text{低}(z_3), \text{稍低}(z_4), \text{中等}(z_5), \text{稍高}(z_6), \text{高}(z_7), \text{很高}(z_7), \text{极高}(z_7) \}$ 。总共有 20 位专家参与权重评价,根据专家

语义特点,分为三类,各类权重分别为 0.3, 0.4, 0.3。根据专家评判结果计算区间二元语义判断矩阵如表 3 所示。

表 3 指标权重  
Tab. 3 index weight

指标	专家 1(5 位)	专家 2(9 位)	专家 3(6 位)	二元语义	CRITIC	博弈权重
	(0.3)	(0.4)	(0.3)			
$C_{11}$	$[(x_3, 0), (x_5, 0)]$	$[(y_6, 0), (y_6, 0)]$	$[(z_7, 0), (z_8, 0)]$	0.057 400	0.097 218	0.084 464
$C_{12}$	$[(x_3, 0), (x_4, 0)]$	$[(y_3, 0), (y_3, 0)]$	$[(z_5, 0), (z_4, 0)]$	0.037 927	0.033 333	0.034 805
$C_{13}$	$[(x_2, 0), (x_3, 0)]$	$[(y_4, 0), (y_4, 0)]$	$[(z_7, 0), (z_4, 0)]$	0.042 243	0.038 456	0.039 669
$C_{14}$	$[(x_2, 0), (x_2, 0)]$	$[(y_3, 0), (y_5, 0)]$	$[(z_3, 0), (z_4, 0)]$	0.033 203	0.034 339	0.033 975
$C_{21}$	$[(x_5, 0), (x_5, 0)]$	$[(y_6, 0), (y_7, 0)]$	$[(z_7, 0), (z_9, 0)]$	0.066 950	0.043 540	0.051 038
$C_{22}$	$[(x_1, 0), (x_1, 0)]$	$[(y_2, 0), (y_4, 0)]$	$[(z_4, 0), (z_4, 0)]$	0.026 032	0.036 750	0.033 317
$C_{23}$	$[(x_3, 0), (x_2, 0)]$	$[(y_4, 0), (y_5, 0)]$	$[(z_5, 0), (z_7, 0)]$	0.043 331	0.047 207	0.045 965
$C_{31}$	$[(x_3, 0), (x_2, 0)]$	$[(y_5, 0), (y_4, 0)]$	$[(z_5, 0), (z_7, 0)]$	0.045 370	0.046 735	0.046 298
$C_{32}$	$[(x_2, 0), (x_3, 0)]$	$[(y_3, 0), (y_5, 0)]$	$[(z_5, 0), (z_4, 0)]$	0.037 723	0.039 928	0.039 222
$C_{33}$	$[(x_2, 0), (x_3, 0)]$	$[(y_3, 0), (y_4, 0)]$	$[(z_3, 0), (z_5, 0)]$	0.034 494	0.048 967	0.044 332
$C_{34}$	$[(x_3, 0), (x_3, 0)]$	$[(y_6, 0), (y_5, 0)]$	$[(z_5, 0), (z_7, 0)]$	0.049 550	0.035 475	0.039 983
$C_{41}$	$[(x_3, 0), (x_3, 0)]$	$[(y_5, 0), (y_5, 0)]$	$[(z_5, 0), (z_7, 0)]$	0.055 021	0.042 276	0.046 359
$C_{42}$	$[(x_3, 0), (x_2, 0)]$	$[(y_6, 0), (y_5, 0)]$	$[(z_7, 0), (z_6, 0)]$	0.041 291	0.037 252	0.038 546
$C_{43}$	$[(x_2, 0), (x_3, 0)]$	$[(y_2, 0), (y_4, 0)]$	$[(z_5, 0), (z_5, 0)]$	0.034 834	0.047 758	0.043 619
$C_{44}$	$[(x_2, 0), (x_3, 0)]$	$[(y_3, 0), (y_5, 0)]$	$[(z_5, 0), (z_4, 0)]$	0.037 723	0.041 102	0.040 020
$C_{51}$	$[(x_3, 0), (x_3, 0)]$	$[(y_5, 0), (y_6, 0)]$	$[(z_6, 0), (z_4, 0)]$	0.047 171	0.041 589	0.043 377
$C_{52}$	$[(x_3, 0), (x_4, 0)]$	$[(y_5, 0), (y_5, 0)]$	$[(z_6, 0), (z_6, 0)]$	0.049 652	0.038 406	0.042 008
$C_{53}$	$[(x_2, 0), (x_3, 0)]$	$[(y_3, 0), (y_4, 0)]$	$[(z_3, 0), (z_4, 0)]$	0.033 305	0.043 689	0.040 363
$C_{61}$	$[(x_4, 0), (x_3, 0)]$	$[(y_5, 0), (y_7, 0)]$	$[(z_8, 0), (z_6, 0)]$	0.058 488	0.049 062	0.052 081
$C_{62}$	$[(x_3, 0), (x_4, 0)]$	$[(y_7, 0), (y_6, 0)]$	$[(z_5, 0), (z_7, 0)]$	0.055 769	0.041 535	0.046 094
$C_{63}$	$[(x_4, 0), (x_4, 0)]$	$[(y_6, 0), (y_3, 0)]$	$[(z_4, 0), (z_7, 0)]$	0.051 793	0.054 045	0.053 324
$C_{64}$	$[(x_5, 0), (x_4, 0)]$	$[(y_6, 0), (y_5, 0)]$	$[(z_7, 0), (z_7, 0)]$	0.060 731	0.061 337	0.061 143

2) 权重博弈

将前文通过随机森林插补处理过的数据带入模型中进行计算,各权重结果如图 3 所示。

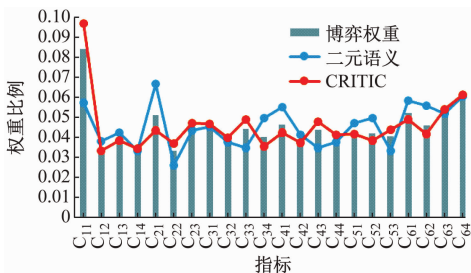


图 3 权重汇总图

Fig. 3 Weight Summary Chart

3.3 结果分析

收集 2021—2023 各年度第一季度的指标取值,获取对各季度的月份值,以常态化值(即去除两个极端值后取平均值)作为源数据,计算关联函数,结果如表 4 所示。

从表 4 中可以看出,预约模式下三峡通航枢纽通航效率为Ⅲ级,三峡通航枢纽近年来拥堵较严重,从服务水平上来说通航效率较低,比较符合实际情况;通航安全、通航可靠均为 I,三峡通航枢纽作为世界大型通航建筑物,其安全性和可靠性处于领先水平,符合实际;预约服务和预约公平处于初始阶

表4 服务水平评价结果  
Tab.4 Service Level Evaluation Results

指标	指标取值	I级	II级	III级	IV级	V级(不合格)	等级	一级指标等级
$C_{11}$	176	-0.836 435	-0.754 653	-0.509 306	0.236 041	-0.242 820	IV	
$C_{12}$	93.50%	-0.242 424	0.156 863	-0.632 353	-0.789 916	-0.836 601	II	III级
$C_{13}$	165	-0.425 676	0.045 455	-0.034 091	-0.448 052	-0.570 707	II	
$C_{14}$	85%	-0.380 531	0.469 136	-0.351 852	-0.629 630	-0.711 934	II	
$C_{21}$	0.032%	0.151 292	-0.151 292	-0.787 823	-0.878 756	-0.905 699	I	
$C_{22}$	0.991	-0.307 692	0.266 667	-0.550 000	-0.742 857	-0.800 000	II	I级
$C_{23}$	94	0.411 765	-0.411 765	-0.852 941	-0.915 966	-0.934 641	I	
$C_{31}$	0.30%	0.181 080	-0.181 080	-0.795 270	-0.883 011	-0.909 009	I	
$C_{32}$	32	-0.189 189	0.101 449	-0.673 913	-0.813 665	-0.855 072	II	I级
$C_{33}$	91	0.040 000	-0.040 000	-0.760 000	-0.862 857	-0.893 333	I	
$C_{34}$	93	0.032 258	-0.032 258	-0.758 065	-0.861 751	-0.892 473	I	
$C_{41}$	1	-0.333 333	0.333 333	-0.500 000	-0.714 286	-0.777 778	II	
$C_{42}$	0.061	-0.310 906	0.274 032	-0.544 476	-0.739 701	-0.797 545	II	II级
$C_{43}$	89	-0.354 839	0.407 407	-0.444 444	-0.682 540	-0.753 086	II	
$C_{44}$	22	-0.333 333	0.333 333	-0.500 000	-0.714 286	-0.777 778	II	
$C_{51}$	0.54	-0.444 444	-0.166 667	0.333 333	-0.285 714	-0.444 444	III	
$C_{52}$	90	-0.277 108	0.207 207	-0.594 595	-0.768 340	-0.819 820	II	II级
$C_{53}$	13	-0.384 615	0.444 444	-0.333 333	-0.619 048	-0.703 704	II	
$C_{61}$	0.89	-0.189 189	0.101 449	-0.673 913	-0.813 665	-0.855 072	II	
$C_{62}$	0.8	-0.166 667	0.083 333	-0.687 500	-0.821 429	-0.861 111	II	
$C_{63}$	89	-0.315 068	0.283 951	-0.537 037	-0.735 450	-0.794 239	II	II级
$C_{64}$	208	-0.465 541	-0.198 312	0.396 624	-0.273 423	-0.441 997	III	
汇总		-0.253 976	0.022 909	-0.482 036	-0.629 739	-0.729 701	II	

段,存在进步空间;此外,节能减排工作还有一定的上升空间,特别是受通航拥堵限制,坝区船舶平均碳排放尚处于III级。

综合评价来看,三峡通航枢纽总体预约通航服务水平处于II,总体良好,但因为通航能力不足,导致通航效率较低,拉低了整体的评价等级。因此,尽快开工建设三峡水运新通道,提高三峡断面通航能力和通航效率,十分必要,且迫在眉睫。

#### 4 结束语

预约模式下考虑碳排放的内河通航枢纽服务水平评价研究有助于提升内河通航枢纽调度管理水平。本文研究成果总结如下。

1)在参考传统内河通航枢纽服务水平评价指标体系的基础上,针对预约通航的新场景,考虑节能

减排的新因素,构建了考虑碳排放的通航建筑物服务水平评价指标体系,相对更加全面合理。

2)针对节能减排和预约模式下内河通航枢纽服务水平,构建了基于博弈综合赋权的物元可拓综合评价模型,并以三峡通航枢纽为例开展了实证分析。模型具有较好的科学性和可行性,且具有一定的创新性。

鉴于当前国内预约模式过闸案例较少,数据获取困难,部分数据由技术处理所得,因此不可避免存在一定的误差,未来尚需开展深入研究。

#### 参 考 文 献

- [1] 长江管理局通航安全处. 2022年1月份三峡通航形势分析[R/OL]. [2022-02-24]. [https://sxth.mot.gov.cn/sj/sxthxsfx/202202/t20220224\\_250594.html](https://sxth.mot.gov.cn/sj/sxthxsfx/202202/t20220224_250594.html).

- Navigation Safety Department of the Yangtze River Management Bureau. Analysis of the navigation situation of the three gorges in January 2022[R/OL]. [2022-02-24]. [https://sxth.mot.gov.cn/sj/sxthxsfx/202202/t20220224\\_250594.html](https://sxth.mot.gov.cn/sj/sxthxsfx/202202/t20220224_250594.html). (in Chinese)
- [2] 蒋军,付晓娜. 基于综合优先级的三峡枢纽船闸预约通航调度研究[J]. 中国水运(下半月),2021,21(9):12-14.  
JIANG J, FU X N. Research on the appointment and navigation scheduling of three gorges hub ship locks based on comprehensive priority [J]. China Water Transport (Second Half of the Month), 2021, 21(9): 12-14. (in Chinese)
- [3] 胡峰军,张利分. 基于船闸服务水平的通过能力公式的确定[J]. 中国水运(下半月),2016,16(11):85-87.  
HU F J, ZHANG L F. Determination of capacity formula based on lock service level [J]. China Water Transport (Second Half of the Month), 2016, 16(11): 85-87. (in Chinese)
- [4] GUAN H X, XU Y M, LI L H, et al. Optimizing lock operations and ship arrivals through multiple locks on inland waterways [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021(1):6220559. 1-6220559. 13.
- [5] 邹静. 三峡船闸通航效率指标分析研究[C]. // 中国航海学会船闸专业委员会 2015 年学术交流会议论文集. 2015:1-8.  
ZOU J. Analysis and research on navigation efficiency indicators of the three gorges ship lock [C] // Proceedings of the 2015 Academic Exchange Meeting of the Shiplock Professional Committee of the Chinese Society of Navigation. 2015:1-8. (in Chinese)
- [6] 胡晓琴,朱志国,宋伟,等. 岷江下游航道特定尺度船闸的通过能力仿真[J]. 交通运输工程与信息学报,2011,9(3):93-98.  
HU X Q, ZHU Z G, SONG W, et al. Simulation of the carrying capacity of specific scale shiplocks in the lower minjiang river channel [J]. Journal of Transportation Engineering and Information Technology, 2011, 9(3): 93-98. (in Chinese)
- [7] RODRIGUES G S, REIS J G M, ORYNYCZ O, et al. A study on the viability of adopting battery electric vehicles in bus rapid transit in brazil using the AHP method[J]. Energies, 2023, 16(13):4858.
- [8] XUE J W, WANG J Q, YI J Y, et al. Optimal parking path planning and parking space selection based on the entropy power method and bayesian network: A Case Study in an Indoor Parking Lot [J]. Sustainability, 2023, 15(11):8450.
- [9] 黄友滔,黄喜兵. 基于 ANP 与麻雀搜索算法优化 BP 神经网络的装配式建筑进度风险评价[J]. 工程管理学报,2022,36(6):36-41.  
HUANG Y T, HUANG X B. Risk assessment of prefabricated construction progress based on ANP and sparrow search algorithm optimized BP neural network [J]. Journal of Engineering Management, 2022, 36(6): 36-41. (in Chinese)
- [10] 蒋军,袁一平,邓萍等. 基于云模型和 VIKOR 法的重庆长江上游航运中心建设成效评价[J]. 中国航海,2023,46(3):91-97.  
JIANG J, YUAN Y P, DENG P, et al. Evaluation of the construction effectiveness of chongqing yangtze river upstream shipping center based on cloud model and VIKOR method [J]. China Navigation, 2023, 46(3): 91-97. (in Chinese)
- [11] 邵晓青,邹家炜. 基于分层模糊评价法的本体评价[J]. 计算机与现代化,2011(6):175-180.  
SHAO X Q, WU J W. Ontology evaluation based on hierarchical fuzzy evaluation method [J]. Computer and Modernization, 2011(6): 175-180. (in Chinese)
- [12] LOKE Z, KOVÁCS E, BACSI Z, et al. Assessment of service quality and consumer satisfaction in a Hungarian spa[J]. DETUROPE, 2018, 10(2):124-146.
- [13] DOU F, NING Y, WEI Y, et al. Evaluation method for service level of facility network in urban rail transit station[C] // International conference on electrical and information technologies for rail transportation. Singapore: Springer Singapore, 2021: 373-380.
- [14] 任其亮,周礼节. 基于物元法的网约车服务水平评价研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(10):73-79.  
REN Q L, ZHOU L J. Research on evaluation of online ride hailing service level based on matter element method [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2018, 37(10): 73-79. (in Chinese)
- [15] 赵晓磊,肖为周. 基于物元可拓法的轨道交通换乘站服务水平综合评价[J]. 河北工业科技,2022,39(4):282-289.  
ZHAO X L, XIAO W Z. Comprehensive evaluation of service level of rail transit transfer stations based on extension matter element method [J]. Hebei Industrial Technology, 2022, 39(4): 282-289. (in Chinese)
- [16] 郝岭,徐红. 船闸工程低碳设计方案评价方法[J]. 中国港湾建设,2023,43(4):70-73.

- regulatory framework and domestic implementation challenges[J]. *Marine Policy*, 2014, 47: 46-56.
- [5] HAQUE M. Occupational health and safety in the ship-breaking industries of Bangladesh[M] // *Governance in South Asia*. Routledge India, 2016: 169-189.
- [6] AHMED I. The origin and evaluation of ship breaking regime of South Asia: a critical perspective from Bangladesh[J]. *Legal Issues J.*, 2020, 8: 1.
- [7] 常文,赵颖磊. 我国船舶拆解立法现状及履约建议[J]. *中国海事*, 2014(6): 26-30.  
CHANG W, ZHAO Y L. Current situation of chinese ship recycling convention legislation and implementation proposal [J]. *China Maritime Safety*, 2014(6): 26-30. (in Chinese)
- [8] 邱奇. 船舶拆解作业海事监管问题与对策[J]. *世界海运*, 2018, 41(4): 26-28.  
QIU Q. The problems and countermeasures of maritime supervision in shipbreaking operations [J]. *World Shipping*, 2018, 41(4): 26-28. (in Chinese)
- [9] 汪建波,代世勇.《海洋环境保护法》背景下船舶拆解海事监管对策研究[J]. *中国航海*, 2024, 47(增刊1): 126-131.  
WANG J B, DAI S Y. A study on maritime regulatory responses to ship dismantling in the context of the Marine Environment Protection Law [J]. *Navigation of China*, 2024, 47(Suppl. 1): 126-131. (in Chinese)
- [10] 江振峰,彭译依,杨忠振. 拆船补贴政策下的干散货船队更新策略与政策效果[J]. *大连海事大学学报*, 2019, 45(3): 17-23.  
JIANG Z F, PENG Y N, YANG Z Z. Renewal strategy and policy effect of dry bulk fleet under shipbreaking subsidy policy [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2019, 45(3): 17-23. (in Chinese)
- [11] 牛浩安,董自康. 我国拆船污染现状及防治对策研究[J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40(10): 142-144.  
NIU H A, DONG Z K. Study on the ship breaking pollution status and countermeasures for prevention and control in china [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2022, 40(10): 142-144. (in Chinese)
- [12] 张少峰,陈昕,魏玖长. 中国高质量发展政策评价研究——基于政策文本的量化分析[J]. *华东经济管理*, 2024, 38(9): 61-72.  
ZHANG S F, CHEN X, WEI J C. Research on the evaluation of china's high-quality development policies: A quantitative analysis based on policy texts [J]. *East China Economic Management*, 2024, 38(9): 61-72. (in Chinese)

(上接第 105 页)

- HAO L, XU H. Evaluation method for low-carbon design schemes of ship lock engineering [J]. *China Harbour Construction*, 2023, 43(4): 70-73. (in Chinese)
- [17] 王小峰. 船闸工程绿色低碳评价指标体系研究及实证分析[D]. 南京:东南大学, 2015.  
WANG X F. Research and empirical analysis on the green and low carbon evaluation index system of ship lock engineering [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [18] XU Z, QIAN J L, HAO Y, et al. An improved mathematical model for green lock scheduling problem of the three gorges dam[J]. *Sustainability*, 2019, 11(9): 2640-2640.
- [19] 李震. QFD 中客户需求权重确定的区间二元语义方法[J]. *科技管理研究*, 2015, 35(13): 196-200.
- LI Z. Interval binary semantic method for determining customer demand weights in QFD [J]. *Science and Technology Management Research*, 2015, 35(13): 196-200. (in Chinese)
- [20] 和焯龙,张鹏飞,赵永娟等. 基于 CRITIC 和 AHP 组合赋权的 TOPSIS 法蜂群威胁评估研究[J/OL]. *火炮发射与控制学报*: 1-9 [2023-11-11].  
HE Y L, ZHANG P F, ZHAO Y J, et al. Study on the TOPSIS method for bee swarm threat assessment based on CRITIC and AHP combination weighting [J/OL]. *Journal of Artillery Launch and Control*: 1-9 [2023-11-11]. (in Chinese)