文章编号：2097-5899(2026)04-0061-14　**中图分类号**：U2-9；U6　**文献标识码**：A
DOI：10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202503120002
引用格式：郑文丽，白骏逸，杨珺喆，等. 基于智慧口岸建设的业务自适应评价模型研究[J]. 铁路物流，2026，44(4)：61-74.
ZHENG Wenli，BAI Junyi，YANG Junzhe，et al. Research on Business-Adaptive Evaluation Model Based on Smart Port Construction[J]. Railway Logistics，2026，44(4)：61-74.

基于智慧口岸建设的业务自适应评价模型研究

郑文丽[1]，白骏逸[1,2]，杨珺喆[1]，包先雨[1]，张荫芬[3]，周金萍[4]

(1. 深圳市检验检疫科学研究院，广东 深圳　518045；2. 香港大学 建筑学院，香港　999077；
3. 中国标准化研究院，北京　100086；4. 中国电子口岸数据中心，北京　100730)

摘　要：针对我国智慧口岸建设评价指标主观性较强、业务适用范围窄等问题，从综合服务、设施设备、口岸协同监管、运行管理、区域合作5个维度建立了评价指标体系，提出了K均值-CRITIC评价方法，构建了一种适用于智慧口岸建设的业务自适应评价模型，并从智能化、数字化、精准化、泛在化、机制化方面进行系统分析。选取陆运、水运、空运3类口岸开展横向和纵向分析，结果表明，该模型可客观评价智慧口岸建设，自适应计算评价权重，适用于不同业务类型口岸评价需求，可为智慧口岸的建设和持续改进提供依据。

关键词：智慧口岸；业务自适应；评价模型；指标体系；K均值-CRITIC

0　引言

在全球经济变化与激烈国际竞争的背景下，贸易方式不断发展且其规模逐渐扩大，口岸面临着通关效率、监管协同与信息化建设等方面的挑战[1-2]。通过建设智慧口岸，结合信息技术和数字化手段，可以有效优化口岸营商环境，促进贸易高水平发展。目前国家口岸管理办公室已组织开展智慧口岸试点建设，截至2024年10月，全国已有21个地区56个口岸开展试点，然而对不同口岸实现科学、精准的评价仍是一项挑战。随着智慧口岸建设不断推进，如何评价其成效以指导口岸发展成为当前的研究热点。

目前，国内外学者在口岸评价领域做了大量研究。在评价指标体系方面，Avetisyan等[3]分析了基础设施指标，研究了国际贸易运输与物流全球化对贸易便利化的影响。Nayak等[4]结合货物类别和社会经济效益需求，提出了港口绩效评价指标并对印度口岸群进行实证分析。在贸易便利化评价体系研究中，崔日明等[5]聚焦边境管理效率与市场准入条件等核心要素，系统构建了适用于“一带一路”沿线国家的贸易便利化综合评价指标体系。王敏等[6]针对21世纪海上丝绸之路沿线国家的具体特点，提出并应用了一套全面的贸易便利化评价指标体系，以评估该区域国家的贸易便利化发展水平与实践现状。马竞等[7]针对中老铁路磨丁口岸，选取通关模式效率、查验流程耗时等关键评价指标，构建了便利化通关评价体系，提升国际联运效率。上述指标体系研究为口岸评价提供了重要参考，但对智慧口岸的研究较少，且多用专家评分法对指标打分，评价主观性较强。

在综合评价方法方面，Mešić等[8]基于国际运输与口岸合作的权重重要性研究了口岸国际化的评价方法。Hua等[9]构建了绿色口岸评价指标体系，采用模糊重要

收稿日期：2025-03-12　**修订日期**：2026-02-12
通信作者：包先雨(1981—)，男，安徽桐城人，深圳市检验检疫科学研究院研究员。
基金项目：海关总署科研计划项目(2023HK106，2024HK240)；深圳市科技计划项目(JSGG20220606140201003)

性—绩效分析方法评价低碳口岸。Yang等[10]分析了变量意义与决策特征，应用模糊积分加权测度对口岸低碳建设进行了评价。柯培超等[11]结合粤港澳大湾区特点，构建了SMART贸易便利化评价机制，并应用层次分析法对前海综合保税区进行分析。王洋等[12]侧重研究海关监管流程信息化，应用熵权法测算海关贸易便利化评价体系。樊爱霞等[13]以CRITIC方法对云南省口岸经济高质量发展水平进行了趋势分析。宋海涛[14]构建了国际物流企业资质评价指标体系，并运用数理方法对指标进行了筛选与优选。以上研究丰富了口岸评价实践，但不同业务类型的智慧口岸建设侧重点有区别，评价时需要调整指标权重以适应口岸业务，而且单一权重方法难以满足不同业务的自适应性评价需求。

综上，现有研究难以满足智慧口岸建设量化、业务自适应评价的需求，因此遵循口岸发展特点，聚合客观量化指标，建立了设施设备智能化、运行管理数字化、口岸协同监管精准化、综合服务泛在化、区域合作机制化五维评价指标体系，结合K均值与CRITIC评价方法，通过聚类口岸并根据不同业务类型口岸自动调整指标权重，构建智慧口岸建设评价模型，旨在提高评价的业务自适应性。

1　指标体系

1.1　体系构建

智慧口岸建设是口岸助力新质生产力发展的具体体现，其要求口岸在基础设施、运行管理、协同监管、综合服务、区域合作等方面实现高质量的创新升级[15]，推进口岸数字化转型，增强口岸竞争力，从而助力新质生产力的发展。结合口岸业务特点，突出智能共享、数据驱动、效率配置、质优便利、开放融合，智慧口岸建设评价指标体系如图1所示，建立了包含智能化、精准化、数字化、泛在化、机制化的量化评价指标体系，构建了业务自适应评价模型，应用K均值-CRITIC评价进行自适应评价。

1.2　指标选取

为了确保口岸发展与新质生产力的要求相匹配，突出助力新质生产力的关键点，评价指标选取重点考虑因素如表1所示。

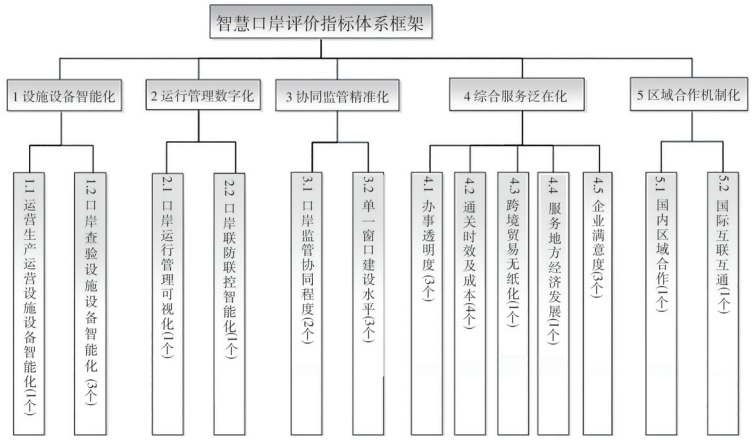


图1　智慧口岸建设评价指标体系

Fig.1　Evaluation index system for smart port construction

表1　评价指标选取重点考虑因素

Tab.1　Key considerations for selecting evaluation indexes

评价维度	助力新质生产力的关键点	指标选取重点考虑因素
设施设备智能化	智能共享	智能化设备的先进程度、覆盖程度、共享程度
运行管理数字化	数据驱动	以数据驱动口岸运行管理水平，包括运行可视化能力、绩效评估能力、联防联控能力
协同监管精准化	效率配置	口岸监管协同程度(监管自动化、信息共享、物流协同)、单一窗口建设水平(技术创新、服务覆盖)、集约监管部门要素
综合服务泛在化	质优便利	办事透明度，贸易便利化(通关时效及成本、无纸化)，口岸经济辐射，服务满意度
区域合作机制化	开放融合	跨境跨区合作水平，包括合作机制、互联互通、毗邻口岸设施共享

基于智慧口岸建设评价指标选取重点考虑因素以及评价指标的客观性，提出业务自适应评价模型的五维评价指标体系，包含5个一级指标与对应的13个二级、25个三级指标，其中有20个采信于公开数据的客观指标、5个由专家打分的主观指标。指标体系及说明如表2所示。

表2　指标体系及说明

Tab.2　Evaluation index system and explanation

一级指标	二级指标	三级指标	指标说明	计算方式
1设施设备智能化	1.1口岸生产运营设施设备智能化	1.1.1口岸生产运营智能设施设备覆盖度	评价口岸生产运营环节智能设施设备的覆盖程度	对照口岸生产运营环节及对应的通用智能设施设备列表进行计算得分，参考计算公式如下 分值 = 实际使用的通用智能设施设备类型数/列表给出的通用智能设施设备类型总数×100 或者为 分值 = 实际使用通用智能设施设备的口岸生产运营环节数/列表给出口岸生产运营环节总数×100
	1.2 口岸查验设施设备智能化	1.2.1口岸查验智能设施设备覆盖度	评价口岸监管查验环节智能设施设备的覆盖程度	对照口岸监管查验环节及对应的通用智能设施设备类别进行计算得分，参考计算公式如下 分值 = 实际使用通用智能设施设备的口岸监管查验环节数/列表给出的口岸监管查验环节总数×100 或者为 分值 = 口岸监管查验环节实际使用的通用智能设施设备类别数/列表给出的口岸监管查验环节对应通用智能设施设备类别总数×100
		1.2.2口岸查验智能设施设备使用率	评价口岸监管查验环节智能设施设备的利用程度	使用率 = $\frac{\sum_{i=1}^{n} T_i}{T_{\max} \times n}$ 其中，$T_{\max}$为口岸每天开放的时长，h；T_i为某个设备的每天平均使用时长，h；n为该口岸监管查验环节使用的智能设施设备总数 分值 = 使用率×100
		1.2.3口岸查验智能设施设备共享度	评价口岸监管查验环节智能设施设备跨部门集约共享程度(如通过共享视频监控、闸口验放等设施设备，取得提升效率、节省人力、提高设备使用率等效果)	通过举证智能设施设备集约共享案例得分，并需附相关印证材料
2运行管理数字化	2.1 口岸运行管理可视化	2.1.1口岸运行管理可视化程度	评价口岸全要素信息资源展示的完整、实时、真实和有效程度	通过以下4个分值综合计算得分，最终分值取4个分值的加权平均 完整性分值 = 展示信息项数/应展示信息项数×100 实时性分值=$\frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}} \times 100$ 其中，$T_{\min}$为本次评价中全国口岸最小值；$T_{\max}$为本次评价中全国口岸最大值；T为该口岸可视化展示的更新时间周期(对全部信息项的实时性评价分值求加权平均得到) 真实性分值，通过实地调研或相关材料验证得分(百分制) 有效性分值，通过举证实例或相关材料验证得分(百分制)

续表

一级指标	二级指标	三级指标	指标说明	计算方式
	2.2 口岸联防联控智能化	2.2.1 口岸联防联控智能化水平	评价口岸联防联控能力具备情况，包括机制建设、联防联控协同平台、协同工作开展、应急演练与处置等方面	针对口岸联防联控智能化水平所涉相关方面设计百分制评分表，每项能力分为5级 对评分表中每项能力进行勾选打分后，通过求平均或加权平均计算出该指标的综合得分
3协同监管精准化	3.1 口岸监管协同程度	3.1.1 口岸监管部门间信息共享程度	评价口岸监管部门之间通过“单一窗口”实现信息互通共享的程度	通过举证监管部门间信息共享案例得分，并附相关印证材料
		3.1.2 口岸监管与物流作业协同程度	评价口岸监管和物流作业的协同程度，主要是口岸监管与物流作业的流程衔接顺畅程度	通过举证口岸监管与物流作业协同案例得分，并附相关印证材料
	3.2 单一窗口建设水平	3.2.1 技术创新应用程度	评价新技术在“单一窗口”的创新应用程度，主要指通过新技术与传统业务相结合，提供全新解决方案，实现数字赋能，并取得显著效益	通过举证区块链、大数据、人工智能、物联网等新技术应用及取得效益情况案例得分，并附相关印证材料
		3.2.2 应用功能创新程度	评价“单一窗口”应用功能创新程度，主要指创新应用场景，满足实际需求，并取得显著效益	通过举证“单一窗口”应用功能创新满足实际需求并取得效益情况案例得分，并附相关印证材料
		3.2.3 跨境贸易全链条业务覆盖度	评价“单一窗口”对跨境贸易领域主要业务的覆盖程度，主要指口岸执法、通关物流、贸易服务、跨境互联等方面	分值 = “单一窗口”在运行跨境贸易全链条业务个数/跨境贸易全链条业务总数×100
4综合服务泛在化	4.1 办事透明度	4.1.1 口岸政策信息公开	评价及时在“单一窗口”贸易信息门户发布政策信息覆盖度，包括相关法律法规、政策文件、标准规范等	分值 = 及时发布口岸政策信息的口岸管理相关部门数/全部口岸管理相关部门数×100
		4.1.2 口岸业务办理信息公开	评价及时发布业务信息的口岸部门和机构覆盖度(获取渠道包括口岸部门和机构的官网、“单一窗口”、门户、办事大厅及电话、短信、微信公众号等主动通知方式)，口岸业务办理信息包括办理时间、业务事项、业务流程、业务要求等与业务办理直接相关的信息	分值 = 及时发布业务办理相关信息覆盖度分值+获取业务办理信息便利性分值 其中，及时发布业务办理相关信息覆盖度分值 = 及时发布业务办理信息的口岸相关部门和机构数/口岸涉及的全部部门和机构数×50 获取业务办理信息便利性分值采用分段计分方法

续表

一级指标	二级指标	三级指标	指标说明	计算方式
		4.1.3 口岸收费信息公开	评价及时发布更新口岸收费项目和收费标准的覆盖度	分值 = 及时发布更新口岸收费项目和收费标准的进出口服务企业数/口岸进出口服务企业总数×100
	4.2 货物通关时效及成本	4.2.1 进口整体通关时效	评价口岸的货物进口通关效率。评价时可将进口货物从抵港到允许提离所需时间与本次评价可比较口岸的整体通关时间进行比较	采用前沿距离法计算得出分值 分值 = $\frac{T_{max}-T}{T_{max}-T_{min}}\times100$ 其中，T_{min}为本次评价中得到的最小时间；T_{max}为本次评价中得到的最大时间；T为本次评价中得到的该口岸整体通关时间或为本次评价中得到的该口岸旅客进境通关时间
		4.2.2 出口整体通关时效	评价口岸的货物出口通关效率，评价细则同上	采用前沿距离法计算得出分值 分值 = $\frac{T_{max}-T}{T_{max}-T_{min}}\times100$ 其中，T_{min}为本次评价中得到的最小时间；T_{max}为本次评价中得到的最大时间；T为本次评价中得到的该口岸整体通关时间或为本次评价中得到的该口岸旅客出境通关时间
		4.2.3 进口合规成本	评价口岸进口合规成本的合理性。评价时可将货物在进口通关环节中所花费的费用与本次评价可比较口岸的平均进口合规成本进行比较（如泊位费、操作费等基础性费用）	参考世界银行EBS进口合规成本指标的计算方法，或者以口岸收费公示系统作为数据采集来源计算得到
		4.2.4 出口合规成本	评价口岸出口合规成本的合理性，评价细则同上	参考世界银行EBS出口合规成本指标的计算方法，或者以口岸收费公示系统作为数据采集来源计算得到
	4.3 跨境贸易无纸化程度	4.3.1 单证无纸化水平	评价货物通关过程中无纸化单证的覆盖度/应用程度	分值 = (1－纸质单证数量/贸易环节涉及的单证总数量)×100
	4.4 服务地方经济发展	4.4.1 口岸经济区经济比重	评价口岸经济区对所在地市经济的影响程度，评价时可将口岸经济区经济总量占所在地市经济总量比例与本次评价全部口岸中的最大最小比例进行比较 比例=口岸经济区经济总量/所在地市经济总量×100	采用前沿距离法计算得出分值 分值 = $\frac{S-S_{min}}{S_{max}-S_{min}}\times100$ 其中，S_{min}为本次评价中最小比重值；S_{max}为本次评价最大比重值；S为该口岸经济区经济总量占地方经济总量比例
		4.4.2 口岸经济区提供就业能力	评价口岸经济区对所在地市就业情况的影响程度，评价时可将口岸经济区提供就业岗位数占口岸所在地市就业岗位总数的比例与本次评价全部口岸中的最大最小比例进行比较 比例=口岸经济区提供就业岗位数/所在地市就业岗位总数	以调查问卷方式计算得分，调查问卷中每个调查项目可设置5个选项 分值 = 各项分数加总/各项满分总和×100

续表

一级指标	二级指标	三级指标	指标说明	计算方式
	4.5 企业满意度	4.5.1 服务体验满意度	评价口岸服务对象对口岸相关部门所提供服务的可得性、好用性、便利性和公平性等方面的满意程度	以调查问卷方式计算得分，调查问卷中每个调查项目可设置5个选项 分值 = 各项分数加总/各项满分总和×100
		4.5.2 政务信息公开满意度	评价口岸服务对象对相关政策、可公开信息的可获取性、及时性以及发布主动性的满意度	以调查问卷方式计算得分，调查问卷中每个调查项目可设置5个选项 分值 = 各项分数加总/各项满分总和×100
		4.5.3 口岸降本增效综合满意度	评价口岸服务对象对智慧口岸建设促进口岸降本增效的整体满意程度	以调查问卷方式计算得分，调查问卷中每个调查项目可设置5个选项 分值 = 各项分数加总/各项满分总和×100
5区域合作机制化	5.1 国内区域合作	5.1.1国内区域合作水平	评价口岸参与区域协作合作程度，主要包括合作机制、跨区合作项目	针对各项设计百分制评分表，每项分为5级，通过对各项分值求平均或加权平均计算出该指标的综合得分
	5.2 国际互联互通	5.2.1国际互联互通水平	评价口岸参与跨境合作程度，包括跨境合作机制建设、跨境互联互通项目、毗邻口岸设施共享项目等	针对国际合作机制建设和国际合作项目建设2部分打分。其中，国际合作项目建设又分为互联互通项目和边境智慧口岸项目2大类 根据口岸现实情况，针对国际合作机制建设、国际合作项目建设2项，或针对国际合作机制建设、国际互联互通项目、边境智慧口岸项目3项，设计百分制评分表，每项分为5级，通过对各项分值求平均或加权平均计算出该指标的综合得分

1.3　指标分析

1.3.1　设施设备智能化

设施设备智能化是口岸劳动资料要素的跃升，口岸设施设备要以先进性能、应用覆盖率以及跨部门集约共享能力体现劳动资料的高技术含量。通过设施设备的性能指标、使用率与覆盖率以及共享水平，评价口岸设施设备的智能化水平。提出口岸查验设施设备智能化与口岸生产运营设施设备智能化2个二级指标，细分为4个三级指标。考核口岸通过集成和应用先进的物联网、大数据、人工智能、机器人等技术，实现设备的自动化控制、远程监控、故障预警和维护管理等，以提升设施设备的运行效率和口岸管理水平。

1.3.2　运行管理数字化

运行管理数字化是口岸劳动对象要素的跃升，其将数据这一新型生产要素作为重要劳动对象，通过考核口岸挖掘数据提升运行管理效率的能力来评价数字化水平。对口岸分析运行数据、提供决策支持、开展预警防控的能力进行评价，包括口岸运行管理可视化及口岸联防联控智能化2个二级指标。

1.3.3　协同监管精准化

协同监管精准化结合了效率配置要素，考察口岸通过信息技术促进部门协同共享、推进单一窗口建设、集约监管要素以实现监管精准的评价成效。考虑智慧口岸的“智慧化”衡量指标应与口岸通用指标有区分度，指标体系重点选取了单一窗口建设和监管协同2个二级指标。单一窗口将口岸各项服务功能及货物申报数据集成在一个平台上，实现信息的共享和精准处理，提高监管效率。口岸监管协同涉及部门间共享监管、作业、通关等信息的程度，以评价监管的精准度和效率。

1.3.4　综合服务泛在化

综合服务泛在化是口岸面对多样、增长的业务需求，形成质优、泛在的供给匹配。考察口岸以数字化、信息化手段，提升综合服务优质便利的水平，实现对泛在化的评价。提出办事透明度、货物通关时效及成本、跨境贸易无纸化程度、服务地方经济发展与企业满意度共5个二级指标，分为13个三级指标。以办事透明度反映营商环境的开放性，对货物通关时效及成本、跨境贸易无纸化程度进行评价，从而促进通关便利化；服务地方经济发展与企业满意度指标反映智慧口岸建设对营商环境的改善。

1.3.5　区域合作机制化

区域合作机制化结合了开放融合要素，通过评价跨境跨区口岸合作机制建设与互联互通程度，评价跨境合作深度和共建水平。考核国内国际合作机制的建立和落地情况，评价各地区之间实现资源共享、信息互通和协同发展的程度，鼓励通过合作机制建设，整合区域资源和优势，畅通跨境跨区贸易供应链，培育共聚合力、共促发展、共享智慧的口岸生态。

2　K均值-CRITIC评价方法

K均值聚类方法[16]对高维数据表现更好，CRITIC赋权方法[17]同时考虑了指标的差异性与相关性，权重计算较全面，结合2种方法可有效聚类不同类型口岸，对其进行客观、可靠的评价。但经典CRITIC方法没有考虑数据离散性可能引起的评价失真问题[18]，为此本方法通过增加冗余信息熵的计算改进CRITIC方法，提高了权重分配的合理性。算法流程如图2所示。

算法步骤如下。

步骤1：量化初始评价数据。通过评价指标体系量化选取样本得到初始评价数据$D=\{x_1, x_2, \cdots, x_m\}$，$m$为参与评价的智慧口岸样本数量，$x$为单个智慧口岸样本，$x=\{k_1, k_2, \cdots, k_n\}$，$k$为指标量化数据，$n$为三级指标总数，对于所提模型$n=29$。

步骤2：口岸聚类。K均值是基于距离的聚类算法，根据距离将数据分簇，每个簇是相似数据的集合，相似智慧口岸共享指标权重。

针对初始评价数据D，为参与评价的智慧口岸数

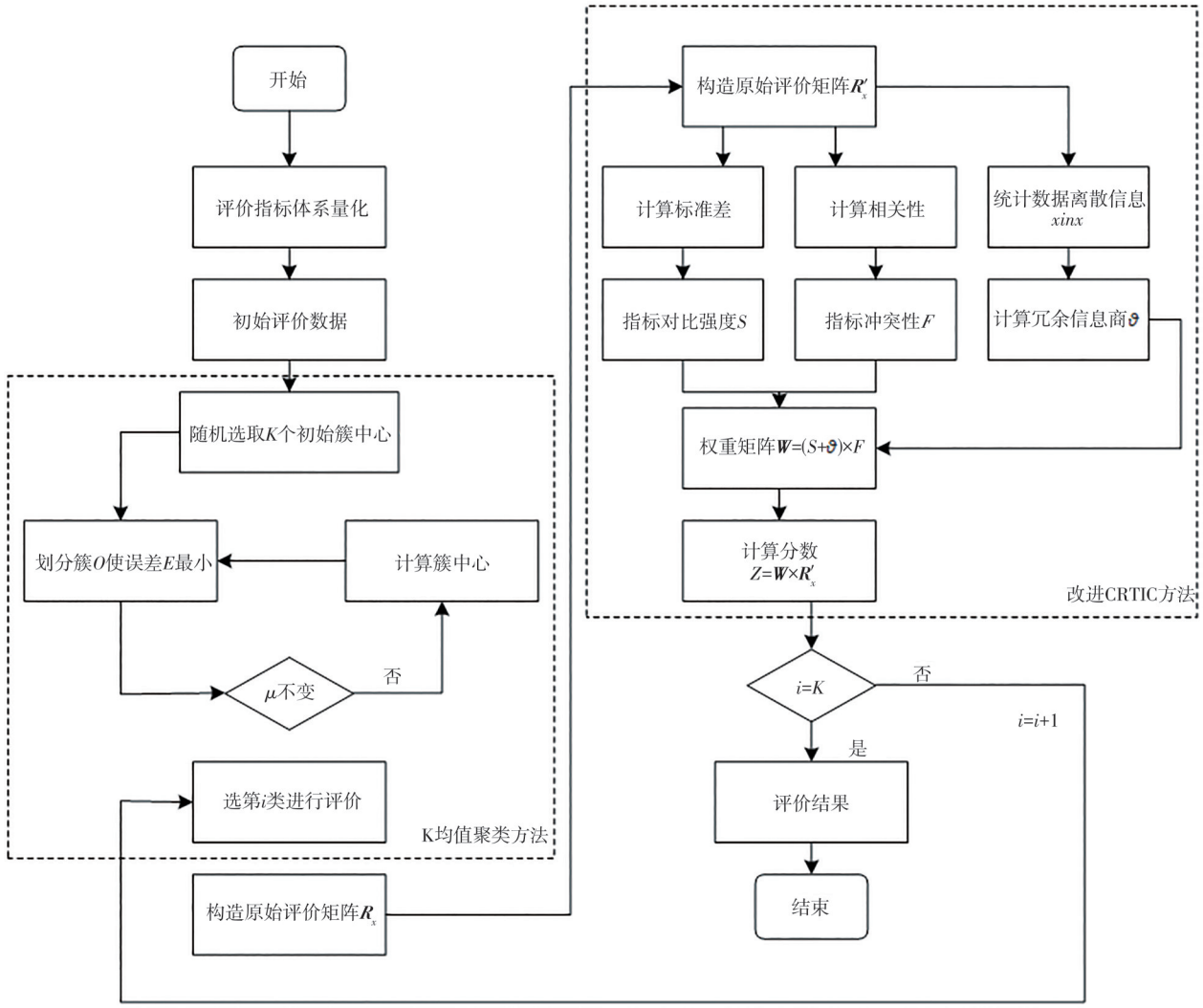


图2　算法流程

Fig.2　Algorithm flow

量，划分所得簇$C=\{C_1,C_2,\cdots,C_k\}$，使其平方误差E最小，即

$$E=\sum_{i=1}^{k}\sum_{x\in C_i}\left(x-\mu_i\right)_2^2 \tag{1}$$

其中，C_k为单个簇；$\boldsymbol{\mu}_i$代表簇C_i的均值向量，其公式为

$$\mu_i=\frac{1}{|C_i|}\sum_{x\in C_i}x \tag{2}$$

所得簇为K均值聚类算法结果。

步骤3：将每一类口岸群矩阵化处理，构造原始评价矩阵，记为

$$\boldsymbol{R}_x=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{11} & \cdots & \boldsymbol{x}_{1n}\\ \vdots & & \vdots\\ \boldsymbol{x}_{m1} & \cdots & \boldsymbol{x}_{mn}\end{bmatrix} \tag{3}$$

步骤4：构造标准评价矩阵。该操作是为了消除评价过程中各评价指标量纲不同的影响。对每个簇内的m个待评价样本的n项评价指标进行无量纲化处理。

成本型指标处理公式为

$$\boldsymbol{x}'_{ij}=\frac{\max\left(\boldsymbol{x}_j\right)-\boldsymbol{x}_{ij}}{\max\left(\boldsymbol{x}_j\right)-\min\left(\boldsymbol{x}_j\right)} \tag{4}$$

效益型指标处理公式为

$$\boldsymbol{x}'_{ij}=\frac{\max\left(\boldsymbol{x}_j\right)-\boldsymbol{x}_{ij}}{\max\left(\boldsymbol{x}_j\right)-\min\left(\boldsymbol{x}_j\right)} \tag{5}$$

得到标准评价矩阵记为

$$\boldsymbol{R}_{x'}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}'_{11} & \cdots & \boldsymbol{x}'_{1n}\\ \vdots & & \vdots\\ \boldsymbol{x}'_{m1} & \cdots & \boldsymbol{x}'_{mn}\end{bmatrix}$$

步骤5：通常CRITIC赋权方法需计算指标对比强度与指标冲突性，得到信息量后加权得到指标权重。计算指标对比强度为

$$S_j=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x'_{ij}-\overline{x}'_j)^2}{n-1}}\qquad \boldsymbol{j}=1,2,\cdots,\boldsymbol{n} \tag{6}$$

标准差表示指标间对比波动情况，标准差越大表明评价对比信息越多，相应的权重应更大。

步骤6：计算指标冲突性。

$$\boldsymbol{F}_j=\sum_{i=1}^{n}\left(1-\boldsymbol{K}_{ij}\right)\qquad \boldsymbol{j}=1,2,\cdots,\boldsymbol{n} \tag{7}$$

相关系数K_{ij}表示指标间的威尔逊相关性，指标间相关性越强、冲突性越小，评价信息重叠越多，权重强度应越小。

步骤7：计算表示离散程度的冗余信息熵θ_j。

$$\boldsymbol{\theta}_j=1+\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{\ln \boldsymbol{n}}\left(\boldsymbol{x}_{ij}\ln \boldsymbol{x}_{ij}\right) \tag{8}$$

步骤8：计算指标信息量。第$\boldsymbol{j}$个指标信息量应由该指标的对比强度、冲突性与离散强度共同决定，其值越大权重越大。

$$\boldsymbol{C}_j=(\boldsymbol{\theta}_j+\boldsymbol{S}_j)\times \boldsymbol{F}_j\qquad \boldsymbol{j}=1,2,\cdots,\boldsymbol{n} \tag{9}$$

步骤9：由信息量计算权重。

$$w_j=\frac{C_j}{\sum_{j=1}^{n}C_j}\qquad \boldsymbol{j}=1,2,\cdots,\boldsymbol{n} \tag{10}$$

步骤10：将标准评价矩阵与权重矩阵相乘计算每类评价分数Z，公式为

$$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{R}_{x'}\times \boldsymbol{W} \tag{11}$$

$\boldsymbol{W}=(\boldsymbol{W}_1,\ \boldsymbol{W}_2,\cdots,\ \boldsymbol{W}_n)$代表权重向量，$Z$中数据表示评价个体的指标得分，求和得到其评价总得分。每类评价得分为最终评价结果。

3　算例分析

3.1　数据来源

考虑到智慧口岸在经济较发达地区的建设水平较高，且贸易统计、申报数据等平台开放度更高、数据可获取性更好，评价模型分别选取了深圳、上海、福建的陆运、水运、空运3种业务类型的10个口岸进行测算。以中国国际贸易单一窗口平台、中经网统计数据库、口岸收费公示平台及海关统计数据查询平台为主要数据来源，结合各口岸官网、公众号等媒体的信息计算指标数据，按照表2三级指标细则要求测算。

3.2　权重计算

指标分为主观指标与客观指标。客观指标中，对于无法直接获得数据的指标，如口岸监管智能设施设备先进程度指标，将各口岸设备的关键性能参数区间设置为[10，100]，运用前沿距离法得到指标数据。主观指标包括指标1.5.2，1.5.3，3.1.3，3.2.1，4.2.1，4.3.1，采用专家评分法得到平均得分。除指标1.2.3与1.2.4是参考世界银行EBS成本指标计算方法外，其余27个指标为[0，100]的正向指标，得分越高表明该指标表现越好。按指标体系量化得到评价原始数据，初始评价数据如表3所示。其中，口岸A，B，C，D选自深圳，口岸F，G，H选自上海，口岸E，I，J选自福建。其中口岸B，C，F为陆运口岸，口岸D，E，H，I为水运口岸，口岸A，G，J为空运口岸。

根据表3初始评价数据进行K均值聚类，考虑陆运、水运、空运等不同口岸业务类型将聚类数量设为

表3　初始评价数据

Tab.3　Initial evaluation data

三级指标	原始数据									
	口岸A	口岸B	口岸C	口岸D	口岸E	口岸F	口岸G	口岸H	口岸I	口岸J
1.1.1口岸生产运营智能设施设备覆盖度	65.56	38.67	45.32	74.62	62.73	58.70	43.43	74.60	65.91	67.42
1.2.1口岸查验智能设施设备覆盖度	34.16	72.55	36.70	45.00	56.56	67.05	34.67	45.50	34.24	32.87
1.2.2口岸查验智能设施设备使用率	40.30	60.43	40.49	20.66	40.73	40.52	40.09	40.20	40.17	44.70
1.2.3口岸查验智能设施设备共享度	72.68	54.01	56.13	65.72	63.44	46.06	50.08	68.61	72.99	76.84
2.1.1口岸运行管理可视化程度	64.73	48.12	65.40	47.80	32.14	55.98	74.75	59.93	64.36	64.79
2.2.1口岸联防联控智能化水平	82.68	67.89	88.77	75.89	54.18	69.61	77.48	75.25	82.96	86.09
3.1.1口岸监管部门间信息共享程度	32.98	31.88	46.33	43.99	46.27	37.97	32.54	44.60	32.95	32.93
3.1.2口岸监管与物流作业协同程度	62.28	65.17	70.27	73.90	71.67	69.79	61.24	75.76	62.79	62.86
3.2.1技术创新应用程度	42.27	67.88	58.17	53.94	62.94	75.55	74.93	46.96	42.05	42.19
3.2.2应用功能创新程度	30.2	80.5	30.4	30.2	40.8	20.3	40.0	60.3	30.1	30.9
3.2.3跨境贸易全链条业务覆盖度	57.60	35.55	46.19	62.98	61.30	48.06	47.42	49.82	37.91	32.75
4.1.1 口岸政策信息公开	54.12	89.25	68.92	76.99	53.80	47.76	83.00	68.74	54.43	55.61
4.1.2 口岸业务办理信息公开	87.13	69.55	76.62	65.08	64.06	81.58	97.69	77.89	87.37	82.10
4.1.3 口岸收费信息公开	77.75	63.74	53.18	71.72	63.03	60.54	41.00	71.18	71.81	76.97
4.2.1 进口整体通关时效	85.07	72.75	66.25	79.05	81.80	66.60	72.76	69.82	88.25	81.95
4.2.2 出口整体通关时效	91.75	66.79	84.22	82.14	87.66	91.75	86.92	73.82	95.00	93.37
4.2.3 进口合规成本	52.73	65.25	61.66	34.48	37.48	56.06	51.21	34.07	52.39	51.73
4.2.4 出口合规成本	53.30	56.69	63.93	35.43	34.62	49.51	49.12	35.49	53.53	53.90
4.3.1 单证无纸化水平	92.73	100.80	104.90	96.87	91.76	100.16	106.40	90.78	92.72	92.72
4.4.1 口岸经济区经济比重	95.45	103.18	102.47	94.71	92.12	97.76	103.98	90.84	95.77	96.19
4.4.2 口岸经济区提供就业能力	72.15	47.50	85.61	88.64	65.73	83.39	62.29	68.39	72.62	72.88
4.5.1 服务体验满意度	63.64	56.43	52.33	65.14	49.69	54.85	51.73	51.04	43.20	43.60
4.5.2 政务信息公开满意度	61.32	72.47	45.04	57.03	64.51	52.82	53.69	72.70	61.57	41.33
4.5.3 口岸降本增效综合满意度	86.10	91.36	93.25	91.85	93.58	89.84	92.88	74.67	86.52	86.19
5.1.1国内区域合作水平	89.32	68.91	91.59	87.83	87.05	93.37	92.49	88.87	89.68	89.19
5.2.1国际互联互通水平	71.95	62.77	84.99	75.74	79.14	63.32	76.13	75.56	71.99	71.81

3，口岸聚类结果如表4所示。其中类别1口岸均为陆运口岸，类别2口岸均为水运口岸，类别3口岸均为空运口岸，与业务类型相同，说明口岸被正确聚类。对数据进行无量纲化处理后，对每类分别应用改进CRITIC法自适应计算权重。

3个类别结果中综合服务泛在化维度的权重均为最高，考虑该维度三级指标的数量为指标总数的44.8%，难以体现聚类结果侧重，因此对比评价模型一级指标的平均权重，口岸一级指标平均权重对比如图3所示。

表4　口岸聚类结果

Tab.4　Port clustering results

聚类结果	口岸名称
类别1	口岸B、口岸C、口岸F
类别2	口岸D、口岸E、口岸H、口岸I
类别3	口岸A、口岸G、口岸J

陆运口岸协同监管精准化维度权重较高，深圳与上海的整体数据分布相似，但在监管部门协同、物流

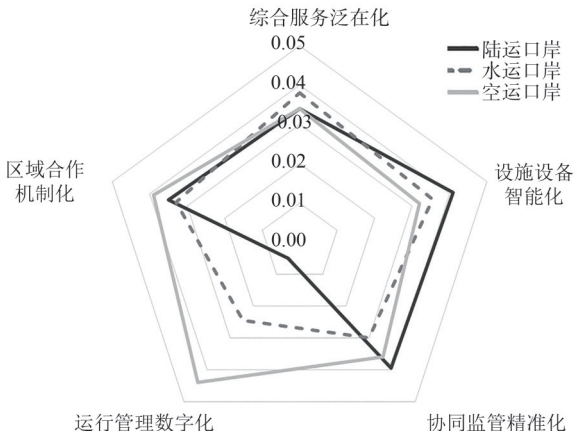


图3　口岸一级指标平均权重对比

Fig.3　Comparison of average weights of primary indicators for ports

作业以及自动化通关的具体建设方法上各有特点，解释了其权重偏好。水运口岸的各项指标权重较平均，综合服务泛在化维度的平均权重最高。水运“十四五”发展规划预测水运运量需求将维持高位，要求水运口岸持续优化线上线下协同服务能力建设，提高综合服务水平。考虑水运口岸的大量货物吞吐，其货物通关时效及成本等指标权重较高符合现实评价逻辑。空运口岸运行管理数字化维度的平均权重较高。“十四五”航空物流发展专项规划阐述了国际产业链格局转型的形势，要求空运口岸区域化、多元化发展，强调跨境跨区的协调合作，且因我国空运口岸数字化水平处于高速发展阶段，需加强所有航运物流尤其是空运口岸相关部门间数据跟踪与预警防控的能力，与计算结果契合。

上述分析说明评价模型通过聚类计算口岸初始评价数据，自动识别相似业务类型的口岸，并据此分配相应权重，体现不同业务类型口岸的评价侧重，使评价模型能自适应不同业务的评价需求。

3.3　结果分析

3.3.1　横向评价

评价模型量化客观指标，以自适应权重求取评价分数，对各类口岸进行横向对比分析。

陆运智慧口岸的设施设备智能化维度与协同监管精准化维度平均权重较高，陆运口岸评价二级指标权重及得分如表5所示。其中口岸B综合得分最高，为67.34，在生产运营设备智能化与单一窗口建设上优势明显，但在跨境贸易无纸化方面得分较低，需加强对报关单进行无纸审核、验放处理的模式。而得分最低的口岸F，在权重较高的货物通关时效及成本指标上表现稍差，且单一窗口建设指标得分稍低。考虑口岸F作为上海唯一的陆路口岸，受交通运输及数据体量的压力，在货物通关与信息平台上的得分稍低是符合现实情况的，可进一步挖掘大数据读取与物联网跟踪监管技术进行改善。

表5　陆运口岸评价二级指标权重及得分

Tab.5　Weights and scores of secondary indicators for land transport port evaluation

二级指标	权重	口岸得分		
		口岸B	口岸C	口岸F
1.1 口岸生产运营设施设备智能化	0.146	8.53	6.46	7.89
1.2 口岸查验设施设备智能化	0.065	2.73	3.33	3.58
2.1 口岸运行管理可视化	0.029	1.41	1.92	1.61
2.2 口岸联防联控智能化	0.029	1.97	2.60	2.04
3.1 口岸监管协同程度	0.103	5.85	6.10	6.51
3.2 单一窗口建设水平	0.070	4.08	3.71	3.42
4.1 办事透明度	0.113	7.72	7.70	8.19
4.2 货物通关时效及成本	0.128	10.58	10.77	9.86
4.3 跨境贸易无纸化程度	0.033	1.61	2.89	2.82
4.4 服务地方经济发展	0.072	4.65	3.55	4.88
4.5 企业满意度	0.096	7.10	8.67	7.96
5.1 跨区合作机制化	0.033	2.99	2.31	1.60
5.2 跨境合作机制化	0.036	2.56	2.79	2.97
综合得分		67.34	65.73	65.31

水运口岸综合服务泛在化维度平均权重较高，水运口岸评价二级指标权重及得分如表6所示，其中口岸H得分最高，为66.86，其在权重最高的货物通关时效指标上得分最高，为提高通关效率，口岸H通过企业联网监管模式，实现了直接联网对接企业，将非保税货物的通关效率提高了2.5倍，相比其他水运口岸有一定优势。口岸D与口岸E表现类似，但口岸E单一窗口建设水平较薄弱，且在跨区合作机制化上表现稍差，评价得分较低。口岸D作为深圳水运口岸，该区域口岸数量较多，口岸参与资源共享、共驻共建的比例较高，形成的组合港合作机制较有成效，可为其他口岸提供参考。

空运类口岸运行管理数字化维度与区域合作机制化维度的平均权重较高，空运口岸评价二级指标权重及得分如表7所示，其中口岸G在运行管理可视化、联防联控能力与跨境合作机制化3个方面表现最好，运行管理数字化建设成效显著，得分为最高的67.80。口岸G作为上海区域的空运口岸，近年来持续推进航空口

表6　水运口岸评价二级指标权重及得分

Tab.6　Weights and scores of secondary indicators for water transport port evaluation

二级指标	权重	口岸得分			
		口岸D	口岸E	口岸H	口岸I
1.1 口岸生产运营设施设备智能化	0.144	7.72	7.86	8.45	7.15
1.2 口岸查验设施设备智能化	0.066	3.78	3.49	3.70	4.05
2.1 口岸运行管理可视化	0.030	1.45	0.98	1.82	1.36
2.2 口岸联防联控智能化	0.031	2.01	1.66	2.32	2.81
3.1 口岸监管协同程度	0.098	5.86	5.90	5.35	5.46
3.2 单一窗口建设水平	0.063	3.86	2.89	3.46	2.36
4.1 办事透明度	0.105	8.20	8.20	7.52	8.17
4.2 货物通关时效及成本	0.144	8.95	9.26	11.00	10.75
4.3 跨境贸易无纸化程度	0.030	2.67	1.99	2.08	3.66
4.4 服务地方经济发展	0.067	4.08	3.84	4.21	4.75
4.5 企业满意度	0.118	8.93	10.17	9.43	6.78
5.1 跨区合作机制化	0.028	2.15	1.52	1.93	1.95
5.2 跨境合作机制化	0.036	2.39	2.34	2.82	3.36
最终得分		64.89	63.06	66.86	65.48

表7　空运口岸评价二级指标权重及得分

Tab.7　Weights and scores of secondary indicators for air transport port evaluation

二级指标	权重	口岸得分		
		口岸A	口岸G	口岸J
1.1 口岸生产运营设施设备智能化	0.068	4.26	3.39	4.56
1.2 口岸查验设施设备智能化	0.133	7.00	7.10	7.03
2.1 口岸运行管理可视化	0.031	1.98	3.30	2.75
2.2 口岸联防联控智能化	0.037	2.47	2.83	3.55
3.1 口岸监管协同程度	0.104	4.63	6.03	4.66
3.2 单一窗口建设水平	0.069	3.04	3.08	3.22
4.1 办事透明度	0.100	8.47	7.60	8.37
4.2 货物通关时效及成本	0.147	10.70	10.11	9.63
4.3 跨境贸易无纸化程度	0.040	2.89	2.10	2.87
4.4 服务地方经济发展	0.070	4.38	3.80	4.00
4.5 企业满意度	0.093	7.42	8.44	7.13
5.1 跨区合作机制化	0.035	1.94	2.75	2.31
5.2 跨境合作机制化	0.039	3.37	3.99	3.17
最终得分		65.34	67.80	66.20

岸机场大脑、空运通等技术平台建设，助力实现运行管理全流程数字化。口岸A与口岸J各指标得分接近，但口岸A在口岸综合绩效评估与应用表现上略低于口岸J。口岸J近年来从航空物流作业历史数据中调整决策，推出进口货物“机边分流”，避免查验货物的二次周转，体现口岸运行管理数字化的能力。

尽管3类指标权重各有侧重，但货物通关时效及成本和口岸查验设施设备智能化指标的权重均高于0.128，为每类权重最高的2个二级指标，应得到建设重视。而口岸的智慧化是从建设数字化、设施设备自动化出发，最终体现于货物通关与贸易便利化，表明评价模型可在重要指标评价侧重一致的基础上体现业务自适应评价。

3.3.2　纵向评价

对于同一口岸，业务自适应模型也可从时间发展的角度自适应纵向评价。以2019年至2023年的口岸A为例，选择部分代表性的指标做分析，口岸A纵向评价结果如图4所示。口岸A的企业满意度有波动，其余指标均逐年提高，其中企业满意度、口岸监管协同与跨区合作机制化得分在2022年到2023年增长率最高，与智慧口岸发展趋势吻合。在智慧口岸试点建设开展后，口岸A运用区块链与物联网技术提升通关时效、

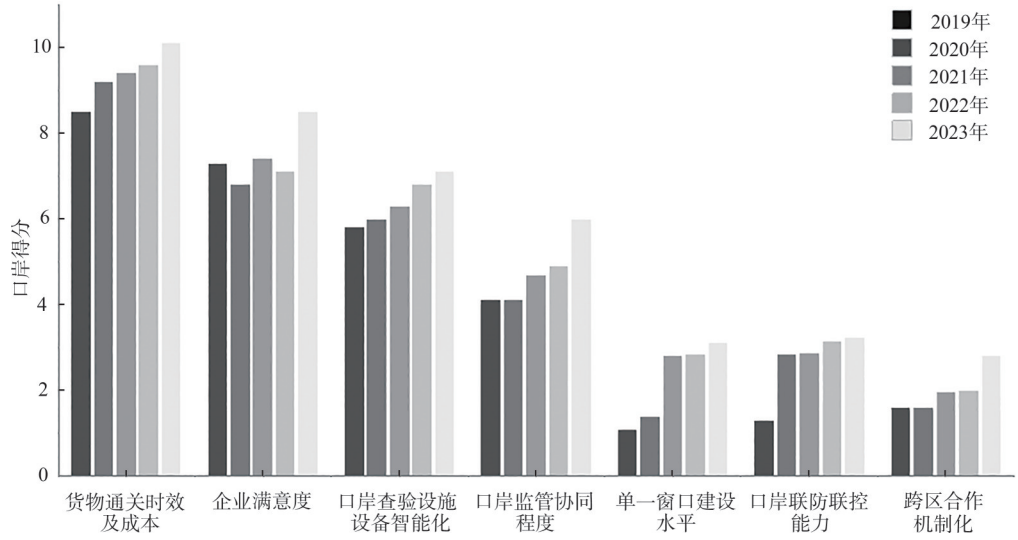


图4　口岸A纵向评价结果

Fig.4　Vertical evaluation results of Port A

升级设备取得明显成效，2023年进口和出口整体通关时间较2019年分别压缩80.82%、74.23%，有效应用大数据链式追踪框架并提升各部门信息系统集约程度，与国际贸易单一窗口有机结合，并通过智慧机场建设与出入境边检协调机制建设，提高陆路口岸防控预警与协调合作能力。

贡献率是某维度评价得分占总得分的比例，代表该维度在评价中的重要性，对口岸A各评价维度贡献率进行纵向分析，口岸A评价贡献率如表8所示。综合服务泛在化维度与区域合作机制化维度贡献率实现逐年提升，代表智慧口岸试点建设开展以来，口岸综合服务与合作机制的提升较为显著。其中设施设备智能化维度与运行管理数字化维度贡献率出现下降，说明口岸A在设备智能化与运行管理数字化方面虽取得发展成效，但提升速度相对缓慢。综合纵向评价分析，在所选时间段中，口岸A的智慧口岸建设取得明显成效，发展重点为综合服务的泛在化提升，而智能化与数字化仍存在发展空间。

综上，聚类分析结果反映出陆运口岸侧重设施设备与监管精准，空运口岸侧重运行管理与区域合作，水运口岸权重分布较平均；横向评价口岸，对比分析了3类口岸建设成效与可发展空间，给出针对性建设意见，并总结共性建设重点为货物通关时效、成本以及设施设备智能化；纵向对比不同时间点的口岸，分析智慧口岸建设试点开展以来取得的成效及发展趋势。结果表明，研究提出的评价模型可量化反映智慧口岸建设水平，可对口岸进行业务自适应评价，针对智慧口岸建设给出有效决策建议。

表8　口岸A评价贡献率

Tab.8　Evaluation contribution rate of Port A

评价维度	贡献率				
	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年
综合服务泛在化	0.46	0.47	0.48	0.50	0.52
设施设备智能化	0.19	0.19	0.18	0.18	0.16
协同监管精准化	0.14	0.16	0.14	0.12	0.12
运行管理数字化	0.16	0.13	0.13	0.12	0.11
区域合作机制化	0.04	0.04	0.06	0.07	0.08

4　结束语

研究构建的智慧口岸建设业务自适应评价模型，通过聚合客观量化指标建立评价体系，并创新应用K均值-CRITIC评价方法，基于业务特征聚类动态调整权重，有效克服了现有评价主观性强的不足，显著提升了评价对不同口岸业务场景的自适应性。在适用性方面，该模型展现出较广的覆盖范围：其自适应权重机制能够为不同规模口岸，无论大型枢纽或中小型地方口岸，以及承载特定功能类型的口岸，生成与其实际业务结构和数据分布相匹配的客观评价指标，核心适用关键取决于客观基础数据的可获得性与质量，例如通关效率、设施能力及信息化水平等关键指标。然而，模型也存在一定局限性：评价高度依赖数据的完备性与准确性，信息化薄弱或数据采集困难的口岸应用受限；聚类与权重优化的效果受制于样本的代表性与充分性，特定类型口岸如样本不足或数据稀疏，可

能影响其适应性精度；此外，评价指标体系虽力求全面，仍需持续迭代以适应未来新兴业态与国家政策变化。尽管如此，该模型仍为推进我国各类口岸实现以评促建、以评促改，进而促进口岸高水平开放与高质量发展，提供了重要的科学评价工具。

参考文献：

[1] 郑婷婷，孙　强，汪万春，等. 智慧口岸建设的理论内涵辨析[J]. 中国市场，2022(23)：6-10.

[2] 郑婷婷，孙　强，汪万春，等. 智慧口岸建设的实践逻辑与框架研究[J]. 中国市场，2022(22)：187-190.

[3] AVETISYAN M，HERTEL T. Impacts of Trade Facilitation on Modal Choice and International Trade Flows[J]. Economics of Transportation，2021，28：100236.

[4] NAYAK N，PANT P，SARMAH S P，et al. A Novel Index-Based Quantification Approach for Port Performance Measurement：A Case from Indian Major Ports[J]. Maritime Policy & Management，2024，51(2)：174-205.

[5] 崔日明，黄英婉. “一带一路”沿线国家贸易投资便利化评价指标体系研究[J]. 国际贸易问题，2016(9)：153-164.
CUI Riming，HUANG Yingwan. Study on the Trade & Investment Facilitation Evaluation Index System of Countries of “One Belt and One Road”[J]. Journal of International Trade，2016(9)：153-164.

[6] 王　敏，吴晓芬，邓建高，等. “21世纪海上丝绸之路”贸易便利化水平测度[J]. 统计与决策，2021，37(5)：104-108.

[7] 马　竞，何永兵，何安然. 中老铁路磨丁口岸便利化通关现状及优化研究[J]. 铁道货运，2024，42(8)：28-34，40.
MA Jing，HE Yongbing，HE Anran. Current Facilitated Customs Clearance at Boten Port of China-Laos Railway and Its Optimization[J]. Railway Freight Transport，2024，42(8)：28-34，40.

[8] MEŠIĆ A，MIŠKIĆ S，STEVIĆ Ž，et al. Hybrid MCDM Solutions for Evaluation of the Logistics Performance Index of the Western Balkan Countries[J]. Economics，2022，10(1)：13-34.

[9] HUA C Y，CHEN J H，WAN Z，et al. Evaluation and Governance of Green Development Practice of Port：A Sea Port Case of China[J]. Journal of Cleaner Production，2020，249：119434.

[10] YANG S，PAN Y，ZENG S Z. Decision Making Framework Based Fermatean Fuzzy Integrated Weighted Distance and TOPSIS for Green Low-Carbon Port Evaluation[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence，2022，114：105048.

[11] 柯培超，钟楚红，方凯彬，等. 粤港澳大湾区贸易便利化SMART评价机制研究[J]. 物流科技，2023，46(9)：12-17.
KE Peichao，ZHONG Chuhong，FANG Kaibin，et al. Study on SMART Evaluation Mechanism of Trade Facilitation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Logistics Sci-tech，2023，46(9)：12-17.

[12] 王　洋，胡书婷，张纪凤，等. 海关监管视角下口岸贸易便利化测评体系的建立与应用研究[J]. 对外经贸，2023(11)：28-32，37.
WANG Yang，HU Shuting，ZHANG Jifeng，et al. Study on Establishment and Application of Port Trade Facilitation Measurement System from the Perspective of Customs Supervision[J]. Foreign Economic Relations & Trade，2023(11)：28-32，37.

[13] 樊爱霞，潘海岚，王晓琴. 口岸经济高质量发展水平评价指标体系构建与测度：基于云南的实证研究[J]. 云南民族大学学报(哲学社会科学版)，2024，41(2)：115-128.
FAN Aixia，PAN Hailan，WANG Xiaoqin. An Empirical Study of the Construction and Measurement of the Evaluation Index System for the High-Quality Developmental Level of Trading-Port Economy in Yunnan[J]. Journal of Yunnan Nationalities University (Social Sciences Edition)，2024，41(2)：115-128.

[14] 宋海涛. 国际物流企业资质评价指标体系构建研究[J]. 铁道货运，2018，36(9)：15-20.
SONG Haitao. A Study on a Qualification Assessment System for International Logistics Enterprises[J]. Railway Freight Transport，2018，36(9)：15-20.

[15] 高　帆. “新质生产力”的提出逻辑、多维内涵及时代意义[J]. 政治经济学评论，2023，14(6)：127-145.
GAO Fan. The Logic，Multidimensional Connotation and Current Significance of “New Quality Productivity”[J]. China Review of Political Economy，2023，14(6)：127-145.

[16] XU R，WUNSCH D. Survey of Clustering Algorithms[J]. IEEE Transactions on Neural Networks，2005，16(3)：645-678.

[17] DIAKOULAKI D，MAVROTAS G，PAPAYANNAKIS L. Determining Objective Weights in Multiple Criteria Problems：The Critic Method[J]. Computers & Operations Research，1995，22(7)：763-770.

[18] 陈　晨，闫向阳，齐桓若，等. 基于FAHP-改进CRITIC组合赋权的屋顶光伏接入配网评价方法[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(15)：97-108.
CHEN Chen，YAN Xiangyang，QI Huanruo，et al. An Evaluation Method of a Roof Photovoltaic Access Distribution Network Based on the Weight of FAHP-Improvement CRITIC Combination[J]. Power System Protection and Control，2023，51(15)：97-108.

（责任编辑：魏　然）

Research on Business-Adaptive Evaluation Model Based on Smart Port Construction

ZHENG Wenli[1], BAI Junyi[1,2], YANG Junzhe[1], BAO Xianyu[1], ZHANG Yinfen[3], ZHOU Jinping

(1. Shenzhen Institute of Inspection and Quarantine Science, Shenzhen 518045, Guangdong, China; 2. Faculty of Architecture, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China; 3. China National Institute of Standardization, Beijing 100086, China; 4. China Electronic Port Data Center, Beijing 100730, China)

Abstract: To address the problems of strong subjectivity and narrow business application scope of evaluation indexes for smart port construction in China, an evaluation index system was established from five dimensions: comprehensive services, facilities and equipment, port supervision, operation management, and regional cooperation. A K-means-CRITIC evaluation method was proposed, and a business-adaptive evaluation model suitable for smart port construction was constructed, which was systematically analyzed from the aspects of intelligentization, digitalization, precision, ubiquity, and institutionalization. Three types of ports, namely land transport, water transport, and air transport, were selected to carry out horizontal and vertical analyses. The results show that this model can objectively evaluate the smart port construction, adaptively calculate evaluation weights, is suitable for the evaluation needs of ports with different business types, and can provide a basis for the construction and continuous improvement of smart ports.

Keywords: Smart Port; Business Adaptability; Evaluation Model; Index System; K-means-CRITIC