

文章编号:1005-0523(2014)05-0056-07

## 干散货海铁联运系统关键因素敏感性分析

范小晶<sup>1</sup>, 封学军<sup>1</sup>, 张艳<sup>1,2</sup>, 蒋柳鹏<sup>1</sup>

(河海大学 1.港口、海岸与近海工程学院;2.水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心,江苏 南京 210098)

**摘要:**随着我国对干散货需求的不断增加,海铁联运模式日益受到重视。为明确干散货海铁联运系统中关键因素,运用系统动力学及建模软件 VENSIM,构建了干散货海铁联运的系统动力学模型,并采用福建省湄洲湾港干散货海铁联运案例对模型进行仿真验证,证明了该模型有效可行。最后对模型的关键因素进行敏感性分析,并提出促进湄洲湾海铁联运发展的相关建议。

**关键词:**海铁联运;系统动力学;关键因素;敏感性分析

**中图分类号:**U659.3;F550

**文献标志码:**A

随着世界经济的发展,经济的全球化和一体化进程加快,促进了生产性资源的全球配置和产业转移,中国、印度等新型工业化国家对初级能源和生产原材料的需求不断增加。我国2013年进口铁矿石8.2亿吨,增长10.2%,进口煤炭3.3亿吨,增长13.4%。干散货在港口的进出以铁路、大型船舶运输为主。干散货干燥、散装、量大的特点,均有利于发挥铁路运输的各种优势,从而形成了港口干散货集疏运依赖于铁路的局面。干散货海铁联运即指货物的进出港经由港口的装卸设备、港口铁路线等基础设施,将船舶运输和铁路运输无缝联接起来的一种运输方式。由于作业对环境污染小,安全性强,以铁路和港口共建的港站为依托,以内陆为辐射,使得海铁联运具有得天独厚的优势。

发达国家开展海铁联运已经有相当长的一段历史,无论是在基础设施的建设上,管理模式上,市场开发程度、商务运作模式上都达到了较为完善的程度。据统计,欧洲大部分港口海铁联运的比例已经达到了20%以上,而美国部分港口则达到了35%以上<sup>[1-3]</sup>。相比之下,我国海铁联运方式所占运量比例却很低,远低于发达国家,制约我国海铁联运发展的因素研究也成为国内学者新的研究方向。舍妮亚<sup>[4]</sup>在分析新亚欧大陆桥海铁联运中,由存在的问题定性分析了政策、基础设施、信息化建设等关键因素;刘妍等<sup>[5]</sup>从宏观(包括经济发展水平、政策及法律)、微观(包括运价、技术、货物及管理体制与模式)两个方面对影响我国多式联运的影响因素进行了深入分析;陶学宗等<sup>[6]</sup>在研究粮食多式联运的无缝运输中,对其主要影响因素包括基础设施与设备硬件系统、运输组织与管理软件系统进行了定性分析;许长新等<sup>[7]</sup>将系统动力学方法应用于港口吞吐量预测模型,在传统研究基础上,定量地考虑了综合运输系统、环境等各种主要因素对港口吞吐量的影响;高晓月<sup>[8]</sup>考虑了影响集装箱生成量大小的主要因素如国民经济以及对外贸易发展水平、外贸进出口构成、外贸货物重量系数、外贸适箱货集装箱箱化率等,对南京港集装箱生成量进行了预测。

从已有研究可见影响我国海铁联运主要有硬件因素(港口、铁路等基础设施)、软件因素(装卸技术、信息化建设、社会经济)和政策因素。但现有研究侧重从定性的角度对影响因素进行阐述分析,缺乏对关键

收稿日期:2014-06-20

基金项目:国家自然科学基金(51009060);中央高校基本科研基金(B13020031)

作者简介:范小晶(1990—),男,硕士研究生,研究方向为交通运输规划与管理;封学军(1975—),男,教授,研究方向为物流管理与水运经济。

因素定量的分析。

敏感性分析是指从定量分析的角度研究有关因素发生某种变化对某一个或一组关键指标影响程度的一种不确定分析技术。其实质是通过逐一改变相关变量数值的方法来解释关键指标受这些因素变动影响大小的规律。通过参数的变动实现对目标趋势与特性的把握,比一味追求数值的精确求解更具应用价值<sup>[9]</sup>。本文将在现有文献基础上,运用系统动力学构建干散货海铁联运系统的模型,并结合案例,通过关键因素定量的敏感性分析,来确定关键因素对干散货海铁联运量的影响及影响程度,得出的结论及建议将有利于决策者确定推动海铁联运发展措施的实施序列。

## 1 研究方法思路

我国海铁联运仍处于起步阶段,影响因素众多,历史数据不全,反馈机制复杂,各子系统以及各个变量之间都存在着复杂的、非线性的相互作用和反馈关系。传统的研究方法往往忽略了海铁联运与诸多社会系统的相互关系,对单因素的影响分析不够系统。系统动力学是一门分析研究信息反馈系统的学科,也是一门认识系统问题和解决系统问题的交叉性、综合性学科<sup>[10]</sup>。运用系统动力学方法建模,能较全面地考虑一个动态的、复杂系统的各种主要影响因素,可以对系统进行比较充分的分析,结论也更符合实际情况。同时,系统动力学也能定量地对系统中的因素进行敏感性分析。因此,本文提出将系统动力学的方法应用于干散货海铁联运系统。

根据系统动力学解决问题的一般步骤:第1,确定研究问题为干散货海铁联运系统,同时确定系统结构边界、地理边界及时间边界;第2,对干散货海铁联运系统进行直观的结构分析、因果关系分析;第3,定义变量,通过绘图软件VENSIM PLE,绘制系统动力学模型;第4,应用案例的统计数据对模型进行反复调试对模型进行验证,直至模拟结果与历史数据相符;第5,在模型有效可行的基础上,对相关主要因素进行敏感性分析,即每次对单一因素进行0.1个单位增加,观察对比干散货海铁联运量受到的影响,从而提出干散货海铁联运发展的措施及建议。

## 2 模型的构建

为准确地分析干散货海铁联运系统,考虑主要影响因素即基础设施、装卸技术、政策的前提下,还选取了港口所在地及腹地经济水平、港口岸线资源、环境承载力、沿海港口竞争等作为影响干散货海铁联运的因素。

### 2.1 因果关系分析

因果关系分析能够直观地反映系统动态发展的内在机理。选取干散货海铁联运系统的内部因素为需求及供给;环境承载力、岸线资源、港口所在地及腹地经济水平、沿海港口竞争等为系统发展的外部因素,建立干散货海铁联运系统基本因果反馈图(如图1所示)。

### 2.2 干散货海铁联运系统主要因果反馈环分析

因果反馈环能够清楚地表达系统中各要素之间的定性关系,因此,因果反馈环的确定是系统动力学研究中的关键。此处分析图1中几个主要的因果反馈环。

反馈环1:港口收益→+港口所在地GDP→+交通运输总投资→+铁路投资→+港口运输供给能力→+港口吞吐能力→+港口吞吐量→+港口收益。此反馈环为正反馈环,反映了港口发展与社会经济的互相加强关系。

反馈环2:港口收益→+港口所在地GDP→+交通运输总投资→+铁路投资→+港口铁路吞吐能力→+海铁联运分担率→+干散货海铁联运量→+港口收益。此反馈环为正反馈环,反映了干散货海铁联运系统的自加强机理。

反馈环3:港口收益→+港口所在地GDP→+港口技术投资→+港口技术提高→+港口铁路吞吐能力→+

海铁联运分担率→+干散货海铁联运量→+港口收益。此反馈环为正反馈环,与反馈环2相同,反映了系统的自加强机理。

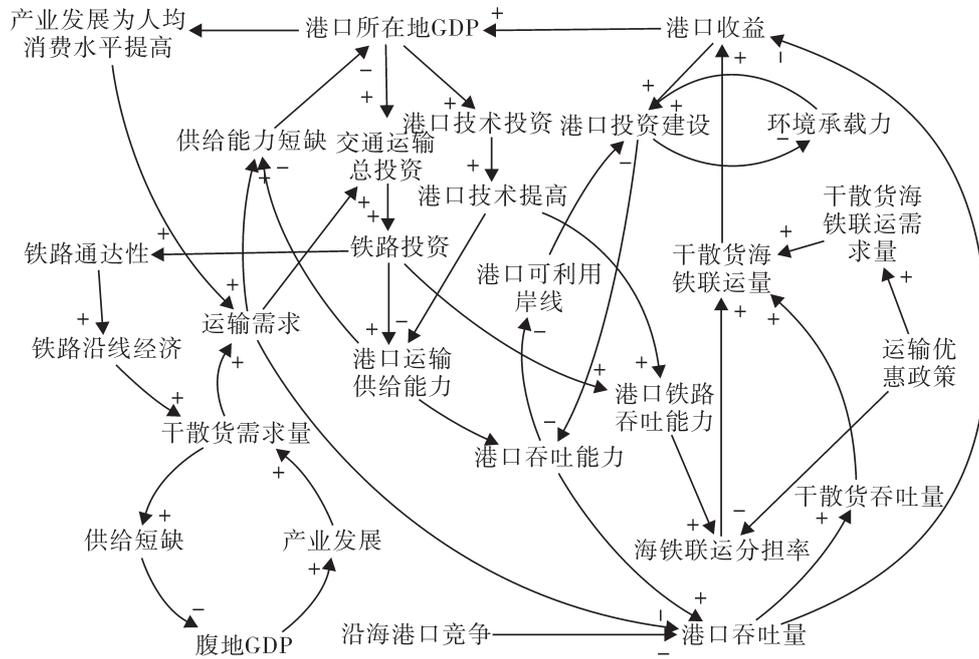


图1 干散货海铁联运系统因果反馈图

Fig.1 Causal feedback loop diagram for rail-sea intermodal transport system of dry bulk

反馈环 4: 交通运输总投资→+铁路投资→+铁路通达性→+铁路沿线经济→+干散货需求量→+运输需求→+交通运输总投资。此反馈环为正反馈环,反映了铁路运输的供需互相促进的原则。

反馈环 5: 港口收益→+港口投资建设→+港口吞吐能力→+港口吞吐量→+干散货吞吐量→+干散货海铁联运量→+港口收益。此反馈环为正反馈环,反映了港口吞吐量的增加将直接促进港口干散货海铁联运的增加。

反馈环 6: 港口投资建设→+港口吞吐能力→-港口可利用岸线→+港口投资建设。此反馈环为负反馈环,反映了港口岸线资源的重要性,起着调节城市与港口协调发展的重要性。

### 2.3 干散货海铁联运系统动力学模型构建

因果反馈图只能描述反馈结构的基本方面,不能表示不同性质变量的区别,例如状态变量的积累概念,以及影响它的速率。通过流图能够清晰地描述影响反馈系统动态性能的积累效应,区别物质流与信息流。根据干散货海铁联运系统的因果关系和系统内部结构,对系统内的变量进行区分及定义,选取港口可利用岸线、港口干散货吞吐能力、码头铁路线长度、港口所在地GDP及腹地GDP为状态变量。通过VEN-SIM软件,构建了干散货海铁联运系统的动力学模型(如图2所示)。

模型涉及到的主要方程和变量(L为状态方程,R为速率方程,A为辅助方程,T为表函):

A 干散货海铁联运量=港口干散货吞吐量×海铁联运分担率×海铁联运开展与否

A 港口干散货吞吐量=港口干散货吞吐能力×港口使用效率×港口竞争影响因子

L 港口干散货吞吐能力=INTEG(+年干散货通过能力增加值,初始值)

R 年干散货通过能力增加值=港口技术×港口资金×可利用岸线因子×环境承载力因子

A 海铁联运分担率=港口铁路吞吐能力/港口干散货吞吐能力×海铁联运运输优惠政策

L 码头铁路线长度=INTEG(+码头铁路线年新增长度,初始值)

- A 港口铁路吞吐能力=铁路装卸效率×码头铁路线长度
- T 海铁联运运输优惠政策= WITHLOOPUP(Time, 数组)
- R 港口所在地GDP年增量=港口所在地GDP×GDP年增长率表1(Time)
- T GDP年增长率表1=WITHLOOPUP(Time, 数组)
- T 港口竞争影响因子=WITHLOOPUP(Time, 数组)
- A 可利用岸线因子=港口可利用岸线/宜港岸线总长度

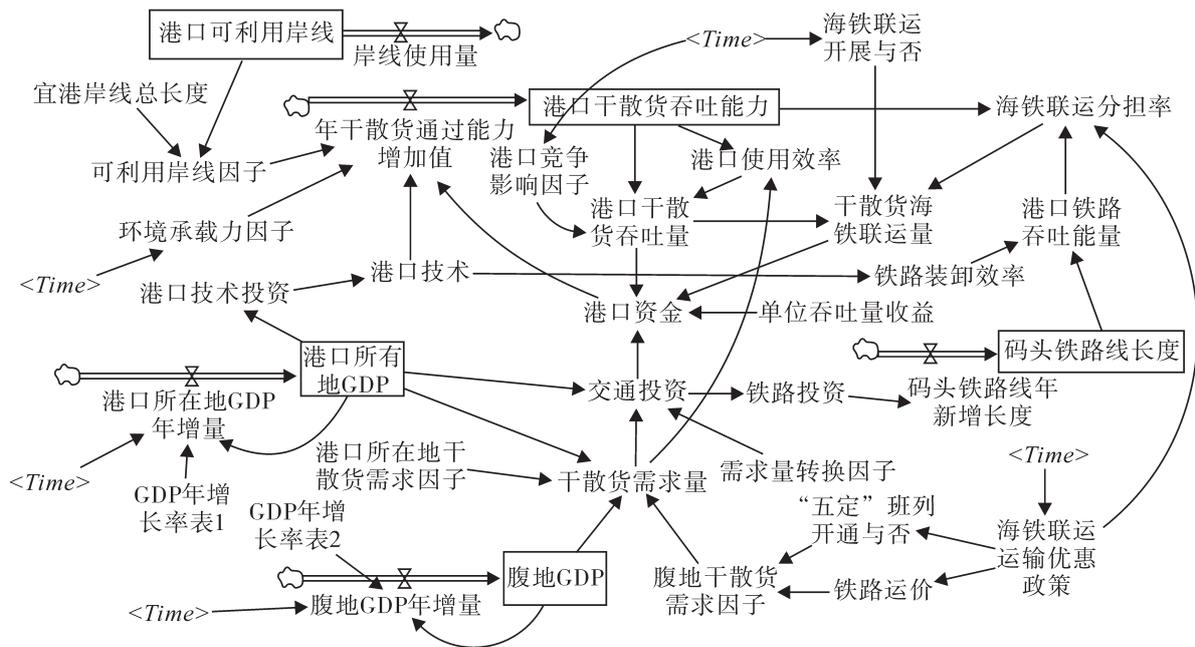


图2 港口干散货海铁联运系统动力学模型

Fig.2 System dynamics model of rail-sea intermodal transport system of dry bulk

2.4 模型的使用

根据案例实际情况、收集历史数据及对相关部门的调研,可将方程中初始值、常量、辅助变量等进行设定,并对模型中的可变参数进行调试,最终获得模拟出的干散货海铁联运运量。对比干散货海铁联运运量历史数据,进行历史性检验,误差在可接受范围内,即证明该模型的有效性,可进一步使用模型。

关键因素敏感性分析是在同一时间区间内,先逐一对模型中影响干散货海铁联运量的因素进行固定调整,得出不同的干散货海铁联运量,再通过对比分析,得出不同因素对干散货海铁联运量的影响方式及程度,从而可以提出干散货海铁联运发展的建议。

3 案例分析

湄洲湾港位于台湾海峡西岸,福建省沿海中部,莆田市和泉州市交界处。自2009年湄洲湾港口管理局正式挂牌成立,湄洲湾港口管理局统一管理原来分别隶属于泉州和莆田的4个港区即湄洲湾南岸的肖厝港区、斗尾港区,北岸的秀屿港区、东吴港区。

福建省近年来重点推进“两集两散”港口建设,其中湄洲湾港发展以大宗散货为主。湄洲湾南北岸均有疏港铁路支线进入港口,共建有铁路装车线1500m,能满足100车皮同时装车作业。2013年底新建成的向莆铁路,由湄洲湾港前编组站莆田东站,通过港口支线铁路连接湄洲湾东吴港区、罗屿港区、秀屿港区、莆头港区,进行海铁联运,构成了东南最大的物流中心枢纽。2015年全面建成的航道3期工程将湄洲湾主航道通航等级将提高至40万吨,将进一步提高湄洲湾港的服务水平,形成干散货运输新的规模效应。

### 3.1 参数确定

系统动力学模型基本结构是信息反馈,它强调系统的行为模式主要取决于内部的动态结构和反馈机制,对大多数参数则表现出不敏感性。但这并不是说模型的参数无需估计,干散货海铁联运系统的模型十分复杂,变量众多,本文参阅相关统计资料和相关文献,并咨询有关专家进行参数调试,确定或标定了上述模型中各个参数。

1) 根据湄洲湾港所在地即泉州市、莆田市两市2009—2013年历史统计数据,如单位吞吐量平均收益、GDP增长率、港口使用效率等。

2) 不同的参数类型,选择不同的公式按比例类推。如根据历年数据情况推算交通投资与技术投资占GDP比例、铁路投资占交通投资比例。

3) 由于目前福建铁路辐射范围有限,故选取传统腹地江西省作为腹地考虑。

4) 干散货需求因子、环境承载力因子、港口竞争影响因子、需求量转换因子是根据历史数据并结合相关部门出台的各项政策措施初步获得,结合专家意见进行修正确定。具体参数数值见表1。

表1 模型中主要参数

参数	数值
单位吞吐量平均收益/(万元/万吨)	52.35
腹地GDP增长率/%	10.73
港口所在地GDP增长率/%	15.80
港口使用效率/%	70
港口技术投资/亿元	0.1%×港口所在地GDP
交通投资/亿元	4%×港口所在地GDP
铁路投资/亿元	8%×交通投资

### 3.2 系统仿真及检验

系统动力学模型检验的目的是验证所建立的模型是否较好地反映湄洲湾港干散货海铁联运的本质特征和某些主要特征。首先,模型是建立在系统分析港口干散货海铁联运影响因素基础上的模型,能反映各因素之间动态制约关系;其次,通过模型运行与历史数据进行比较分析,以检验模型的有效性。利用湄洲湾港口管理局自2009年成立至2013年5年的港口干散货吞吐量历史统计数据,运行模型得到二者拟合程度较好的结论如表2所示。

表2 模型误差分析

Tab.2 Model error analysis

年份	湄洲湾港口干散货吞吐量			干散货海铁联运量		
	实际值/万吨	仿真值/万吨	误差%	实际值/万吨	仿真值/万吨	误差%
2009	1 196	1 200.5	0.38			
2010	1 773	1 710.31	-3.54			
2011	2 308	2 250.11	-2.51	284	284.64	0.23
2012	3 058	3 135.97	2.55	288	287.34	-0.23
2013	3 692	3 755.87	1.73	290	290.61	0.21

注:统计数据来自湄洲湾港口管理局。

表2中仿真值与实际值误差均小于5%,证明了模型有效且具有较高可信度。湄洲湾港的海铁联运于2011年始有,港口铁路装车线长度有限,铁路装卸效率偏低,且海铁联运运输优惠政策力度不够,故海铁联运量小,增长甚微。

### 3.3 关键因素敏感性分析

如前文所述,影响干散货海铁联运的主要因素有硬件因素(港口、铁路等基础设施)、软件因素(装卸技术、信息化建设)和政策因素,对铁路投资、技术投资、海铁联运运输优惠政策进行敏感性分析。将铁路投资、技术投资、海铁联运运输优惠政策各进行0.1个单位的增加,得出的对比分析如图3,图4所示。

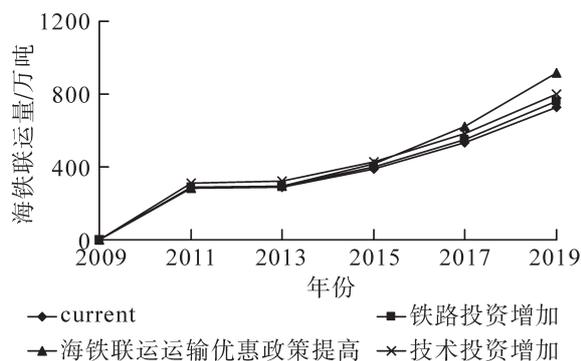


图3 关键因素分析A

Fig.3 Key factor analysis A

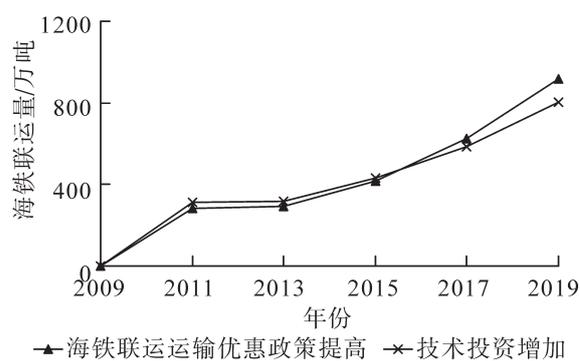


图4 关键因素分析B

Fig.4 Key factor analysis B

由图3可以看出,中期发展来看,海铁联运运输优惠政策的提高对海铁联运发展的重要性大于铁路投资和技术投资的增加,并且随着海铁联运量的不断增长,因素的重要性越来越明显。这是由于优惠政策的提高,如运价的降低、“五定”班列的开通,将极大地吸引腹地干散货需求量,同时大幅提升港口的海铁联运分担率。由图4可知,在海铁联运发展初期,加大技术投资,对提高港口铁路的装卸效率将更为有效。

### 3.4 建议

为进一步加快湄洲湾港干散货海铁联运发展,本文建议湄洲湾在近期加大港口技术投入,在现有政策及码头铁路线资源的基础上,提高铁路装卸效率,从而更快更好地提供干散货海铁联运服务。

作为中远期考虑,应加大省、市级政府的政策支持与财政补贴,如提高单位干散货海铁联运量补贴,开设干散货海铁联运“五定”或“三定”班列等措施,提高地区经济效益的同时,发挥福建省地域及港口的优势,更好地为福建山区和内陆省份服务。

## 4 结论

利用系统动力学,先在定性分析干散货海铁联运系统之后建立了系统动力学模型,然后应用案例进行仿真,同时对系统关键因素进行了定量的敏感性分析。与传统研究的影响因素定量分析相比,实现了对干散货海铁联运系统中关键因素定量的敏感性分析,为港口决策者在推动干散货海铁联运发展提供了实施序列的参考。

通过对湄洲湾港干散货海铁联运系统的仿真分析,验证了模型的有效性与可靠性,对模型中的关键因素的敏感性分析,为加快湄洲湾港的海铁联运发展提供了建议。

### 参考文献:

- [1] PATTON R, WESTERMAN H, HAYTER, et al. Port of vancouver rail network simulation model: Planning for intermodal growth [J]. Bridges, 2004(10):68.
- [2] DAGANZO C F. On statistical models of traffic assignment[J]. Transportation science, 1997 (11):253-274.
- [3] YE YULING, SHI LIMIN. Research on the countermeasure for development of container rail-sea intermodal transportation in East China region[J]. Shanghai railway science & technology, 2010 (5):8-10.
- [4] 舍妮亚. 新亚欧大陆桥集装箱多式联运影响因素研究[D]. 大连:大连海事大学, 2011.
- [5] 刘妍, 范厚明, 慈吉利. 关于我国多式联运组织协调影响因素问题的探讨[J]. 中国水运, 2007, 7(6):27-28.

- [6] 陶学宗, 杨德旭, 刘德军, 等. 粮食多式联运无缝衔接问题研究[J]. 物流工程与管理, 2010,32(5): 57-59.
- [7] 许长新, 严以新, 张萍. 基于系统动力学的港口吞吐量预测模型[J]. 水运工程, 2006(5):26-28,40.
- [8] 高晓月, 封学军, 蒋柳鹏. 南京港集装箱生成量预测与发展措施建议[J]. 华东交通大学学报, 2013,30(1):91-95.
- [9] 潘婧, 杨山, 沈芳艳. 基于系统动力学的港城耦合系统模型构建及仿真——以连云港为例[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(11): 2439-2446.
- [10] 王其藩. 系统动力学[M]. 上海:上海财经大学出版社,2009:2-11.

## Sensitivity Analysis on Key Factors of Rail-sea Intermodal Transport System of Dry Bulk

Fan Xiaojing<sup>1</sup>, Feng Xuejun<sup>1</sup>, Zhang Yan<sup>1,2</sup>, Jiang Liupeng<sup>1</sup>

(Hohai University 1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering; 2. State Key Engineering Research Center of Efficient Utilization of Water Resources and Engineering Safety, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** With the growing demand of dry bulk in China, rail-sea intermodal transport gets more attention. In order to define the key factors of rail-sea intermodal transport of dry bulk, this study uses system dynamic and modeling software VENSIM to establish system dynamic model of rail-sea intermodal transport of dry bulk, and the case of rail-sea intermodal transport of dry bulk of Meizhou Bay Port in Fujian is simulated and verified by the model. The result shows that the model is feasible and effective. Finally, the key factors in the model are sensitively analyzed, and suggestions for promoting the development of rail-sea intermodal transport in Meizhou Bay have been proposed.

**Key words:** rail-sea intermodal transport; system dynamic; key factors; sensitivity analysis