

11-20-2019

Multi-Agent Modeling and Simulation on China's Marine Energy Channel Security

Yongchen Guo

College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

Shen Yang

College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multi-Agent Modeling and Simulation on China's Marine Energy Channel Security

Abstract

Abstract: Security factors influencing China's offshore energy channel are analyzed, and the actual situation of China's oil import and transportation is described. Based on multi-agent modeling and simulation method, *and starting at the micro level, the energy transport process is simulated and a multi-agent model of China's offshore energy channel (middle east lines) is built; and the simulation program on the NetLogo platform is conducted.* The results show that the quantity of China's VLCC is far from enough; the security impact of tropical cyclones is more serious than that of pirates; the increase proportion of carrier's quantity is usually lower than that of the total oil transportation, while the larger the increase proportion of pirates and tropical cyclones, the faster the change proportion of total oil transportation.

Keywords

energy channel, multi-agent, NetLogo, modeling and simulation

Recommended Citation

Guo Yongchen, Shen Yang. Multi-Agent Modeling and Simulation on China's Marine Energy Channel Security[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(4): 655-670.

中国海上能源通道安全性多主体建模与仿真

郭勇陈, 沈洋

(南京航空航天大学经济与管理学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 分析了中国海上能源通道安全影响因素, 描述了中国石油进口运输的实际情况, 基于多主体建模与仿真方法, 从微观层面出发, 构建了**中国海上石油运输(中东航线)多主体仿真模型**, 设计并实现了 NetLogo 平台下的仿真程序, 在验证模型有效性的基础上, 对海上石油进口安全影响进行了仿真实验。结果显示我国拥有的超级油轮数量远远不够; 热带气旋带来的安全影响比海盗更为严重; 油轮数量增加比例通常低于油运总量增加的比例, 而海盗与热带气旋的增加比例越大, 油运总量变化比例加速增大。

关键词: 能源通道; 多主体; NetLogo; 建模与仿真

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 04-0655-16

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0125

Multi-Agent Modeling and Simulation on China's Marine Energy Channel Security

Guo Yongchen, Shen Yang

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Security factors influencing China's offshore energy channel are analyzed, and the actual situation of China's oil import and transportation is described. Based on multi-agent modeling and simulation method, *and starting at the micro level, the energy transport process is simulated and a multi-agent model of China's offshore energy channel (middle east lines) is built; and the simulation program on the NetLogo platform is conducted.* The results show that the quantity of China's VLCC is far from enough; the security impact of tropical cyclones is more serious than that of pirates; the increase proportion of carrier's quantity is usually lower than that of the total oil transportation, while the larger the increase proportion of pirates and tropical cyclones, the faster the change proportion of total oil transportation.

Keywords: energy channel; multi-agent; NetLogo; modeling and simulation

引言

近年来, 中国的能源需求持续上升, 能源价格走高, 历了三十年的国内改革, 中国的能源安全状

况仍没有实质改善^[1]。中国是世界最大的能源消费国和第二大的原油消费国, 根据国际能源总署 (IEA) 的预测, 在 2035 年, 中国的原油进口依赖度将达到 84.6%^[2]。本文从中国石油进口的海上运输安全因素分析入手, 将石油运输过程可以视为一个复杂多变的系统, 采用多主体 (Multi-Agent) 建模与仿真方法, 依照现实情况, 选取重点航线和仿真主体, 明确主体属性、主体间交互规则, 采用 NetLogo 仿真平台, 编写仿真程序, 通过仿真实验, 对中国



收稿日期: 2017-03-20 修回日期: 2017-07-23;
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC08 02603), 中央高校基本科研业务费专项资金(NJ20140030, NR2017043), 南京航空航天大学教改项目(201501JG09014);
作者简介: 郭勇陈(1982-), 男, 陕西, 硕士, 研究方向为多主体建模与仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 655 •

海上能源通道安全性进行研究。

1 文献综述

国内外学者对中国海上能源通道安全性进行了大量研究, 现有研究过程基本遵循“选取安全因素、建立评价体系、选用评价方法、赋值与计算、分析评价结果、给出决策建议”的步骤。在不同的研究中, 评估指标的选取各有侧重。其中, 作为研究基础的安全因素选取研究主要包括: 彭丽^[4]充分考虑了油轮及其设备安全、石油货物安全这大两方面的基本指标。张罕育^[5]列出了中国进口原油的 7 大航线, 考虑 5 大一级指标: 进口来源安全、进口海运航线安全、运输船舶安全、港口卸载能力、存储安全。明平军^[6]分析提出要从人、船、环境、管理四个方面构建海运安全评价指标体系。何剑彤^[7]从军事、政治法律、经济、文化、航道航行安全、非传统安全因素几个一级指标建立评价体系。巫蓓^[8]以南沙群岛海域为研究对象, 因此在建立指标体系时删除了那些对南海海域不重要的海运影响因素, 比如海流、潮汐、雾等因素。杨理智^[9-10]对南海海域进行研究, 重点考虑基于海盗因素影响下而带来的指标评价, 57% 的指标因素都是与海盗因素相关。王尧^[11]针对经过马六甲海峡的 3 条海上线路进行重点研究, 考虑的一级指标较为全面, 涉及自然、人为等多方面因素。

现有研究成果对能源安全研究有着重要的贡献, 然而在安全指标选取方面, 仍存在着一些问题需要解决。在许多研究中, 由于研究对象和学科领域的局限, 对安全因素的选取往往对某一方面或若干方面明显侧重^[6-11]; 一些重要的因素, 如人员^[4]、管理^[5]、自然因素^[3]等常被忽视; 在指标体系中, 各安全因素的选择与重要程度也有待商榷^[7]; 此外一些指标被单独作为一部分, 未加入到完整的评价指标体系中^[6], 并且影响到了随后的量化分析。因此, 现有研究在综合评价我国海上能源通道安全方面, 对于安全因素的选择往往不够系统和全面, 难以反映我国海上石油进口运输安全的整体情形。一

个能够综合考虑关于海上能源通道安全各因素及其关系的综合评估的指标体系仍有待开发。

除此之外, 在选定评价指标体系后, 现有研究大多是选用不同的评价方法对指标进行打分和计算, 这种评价基于事后宏观层面的分析, 对于能源运输过程的体现往往不够。本文基于多主体建模与仿真方法, 从微观层面出发, 模拟能源运输过程, 综合考虑固有和现实安全因素的影响, 对多次仿真结果进行客观分析, 从而涌现出宏观层面的能源通道安全性研究结果。

2 中国海上能源通道安全因素分析

2.1 中国海上石油运输现状

中国石油的主要进口来源地为中东、非洲、中南美洲、东南亚和俄罗斯等地, 中国 80% 的进口能源来自于中东及非洲国家, 因此“印度洋—马六甲海峡—南海”航线成为中国进口能源的必经之地。主要航线情况如表 1 所示。

中国进口石油 80% 要经过马六甲海峡, 中东是中国石油进口最重要来源, 2014 年中国进口石油总计 3.1 亿吨^[13], 中东航线占比 52%, 近年来, 中东石油进口占总进口量的比例始终在在 50% 左右, 因此, 本文主要针对中东航线进行研究。中国进口石油的运输由本国公司和外国公司船舶共同承运, 2007 年中国 90% 的进口石油依靠外国公司运输, 为了保障能源安全, 国家提出“国油国运”战略, 到 2012 年, 国油国运量上升到 35% 左右, 通过中国现有四大石油运输企业的官方网站进行数据统计, 这些企业拥有和长期租赁的 VLCC (Very Large Crude Carriers, 载重吨超过 20 万吨小于 32 万吨的超级油轮) 数量分别是: 中远集团下属的大连远洋油轮公司目前拥有和控制 24 艘 VLCC, 中海集团下属的中海油轮运输有限公司拥有 16 艘 VLCC, 招商局下属的海宏轮船有限公司拥有 13 艘 VLCC, 中国能源运输有限公司(招商局和中外运长航集团组建)有 26 艘 VLCC, 总计 79 艘, 船龄为 1~23 年。

表 1 中国石油进口主要海运航线情况
Tab. 1 Main shipping routes of China's oil imports

地区	航线	距离/ 海里	典型航线说明	2014 年运 量/亿吨	主要船型
中东	波斯湾-霍尔木兹海峡-马六甲海 峡-南海-台湾海峡-中国	6 000	沙特 RASTANURA 装货到宁波卸货	1.6	VLCC
西非	西非-好望角-马六甲海峡(或巽 他海峡)-中国	9 600	安哥拉 CABINDA 装货到宁波卸货	0.56	VLCC
中南美	中南美-好望角-马六甲海峡(或 巽他海峡)-中国	13 300	委内瑞拉 JOSE 装货到宁波卸货	0.32	VLCC
	巴拿马运河西面-太平洋-中国	8 321	巴拿马 PUERTO ARMUELLES 装货 到宁波卸货	--	VLCC
北非	北非-地中海-直布罗陀海峡-好 望角-马六甲海峡-中国	14 481	因利比亚动乱, 现在很少用这条航线	--	SUEZMAX

数据来源: 中航南京油运公司调研数据和参考文献[12]。

通过南京油运公司调研, 对中国海上石油运输的实际情况了解如下:

(1) 国际油运以 VLCC 船型为主, SUEZMAX 船型(苏伊士型)为辅, 中国中东航线的油轮大都是 VLCC, 极少用 SUZEMAX;

(2) 中国公司的 VLCC 载货定额在 26~27.7 万吨;

(3) VLCC 航速一般在 13~16 节, 满载和空载航速由船东根据货物受载期、合同规定以及成本效益等因素来决定的, 可以随时调整的, 并不是保持不变(航速快慢和油耗有正向关系), 一般可认为空载比满载快 0.5~1 节;

(4) VLCC 中东航线的实际运行中, 正常情况下整个航次耗时(包括装、卸货以及常规的码头拥挤等待时间)大概在 45~50 天, 其中包括在空载时安排靠港加油, 耗时一般为 1 天, 装货耗时 2 天, 卸货耗时 2~3 天;

(5) VLCC 的船龄对安全防卫能力没有影响;

(6) 中国企业的 VLCC 每个月有 8~15 个航次在中东航线进行石油运输, 占该航线的五成左右。

2.2 中国海上能源通道安全因素分析

结合现有文献, 对中国海上能源通道安全因素

进行分析汇总, 将安全因素分为固有安全因素和现实安全因素两大类^[14], 因素列表如表 2 所示。

在这些安全因素中, 遵循全面考虑、重点突出的原则, 可以根据对我国海上能源运输的影响程度, 对影响因素进行筛选。

在固有自然因素中, 海洋气象中的热带气旋是安全航行中必须要避免的自然因素, 且与其他因素有着密切的因果关系, 在安全性研究中需要重点考虑。带气旋可以引起一系列相关的自然现象, 包括大风、大浪、低能见度等。从热带气旋出现的时间来看, 7~10 月份, 南海的热带气旋出现次数多, 危险性较高, 9~11 月份印度洋的热带气旋出现次数较多, 危险性高; 从热带气旋出现的频率和发展规律来看, 南海年均出现达到台风强度的热带气旋 9 个, 印度洋年均气旋 10 个, 其中达到台风强度的热带气旋 6 个^[14]。

在固有设备及人员因素中, 可以综合考虑船舶设备、货物安全、人员素质等方面, 给出一个具体数值来代表综合性设备因素, 在仿真中将主体属性值的形式出现。

在现实安全因素中, 多个因素具有多重归属性, 可产生交叉、复合影响, 其中以海盗问题最具

代表性, 海盗与多个其他因素有一定的关联, 需要重点考虑和研究, 该因素也是后续仿真建模过程中主体种类之一。根据国际海事组织(IMO)官方网站(<http://www.imo.org>)上公布的海盗袭击报告发现,

南海和印度洋是海盗事件高发地区, 作为中东航线必经之路, 按照月份为单位, 对发生在南海和印度洋的海盗活动进行更细致的统计, 结果见表 3。

表 2 中国海上能源通道安全因素汇总

Tab. 2 Summary of safety factors in China's offshore energy channel

安全因素分类	因素	
固有安全因素	海洋气象	海面风场、热带气旋(台风、飓风、热带风暴)、大风、大浪、降水、雷暴、海雾、云、大气波导、大气温度、密度、湿度、气压、低能见度、风暴潮
	海洋水文	海温、海流、海浪、潮汐、海水盐度、密度、声速、透明度、海冰、海洋跃层、海洋峰、中尺度涡、内波
	海洋地理	海陆构架、岛礁分布、海峡、通道地理信息、海洋资源分布、地形、地貌、底质、海水声场、重力场、磁力场
	船舶安全因素	船舶条件(船队控制力、所有权、国籍、货物运输权、船舶技术、建造技术、运载参数、船龄、通讯设施、自卫装备、船队规模、吨位、海图资料完备性、国内船队承运份额) 船员条件(船员国籍、操作能力、协作水平、应急预案与应急处置能力、心理承受能力、求生欲望、身体素质、应急训练效果)
	货物安全因素	货源稳定性、货物经济价值、对外依存度、货物装卸水平、漏油
	运输距离	航程、备用通道数量
	港口装卸能力	设备条件、存储条件、吨位、装卸条件
	航线通过能力	所经海峡和运河、管理能力、安全监管能力、污染监管能力、所经岛屿数、船舶流量密度、受限水域弯曲度、受限水域碍航物、同行秩序、助航条件、运力控制
现实安全因素	恐怖主义与海盗	国际护航力量部署、犯罪手段、犯罪工具、犯罪人数、航道地区全球和平指数、航道地区经济稳定性程度、航道地区环境复杂程度、周边国家反海盗警卫力量
	地缘政治与国际形势	政治格局变动、国际冲突格局变动、大国霸权主义、通道沿岸国政治战略措施
	进口地稳定性	进口来源集中度、与中国领海争端程度、人均 GDP、与中国贸易密切程度、国际合作、与中国历史争端程度、和平解决问题意愿、国际规范、大国对该国的博弈度、与中国友好程度、进口地政治环境、国家军事实力
	战争及地区冲突	民族矛盾、主权争端、沿岸国民族文化、领海争端、资源争端、局部战争冲突
	法律条文	国际法律法规限制、沿岸国国内法律约束
	经济因素	中国能源贸易需求、世界能源格局变化、中国在世界能源格局中的地位、能源垄断、石油价格波动、油船运费波动、保险、行业基金
	其他因素	主观航行危险度、电子航标、渔船活动情况、视觉航标、背景灯光、小船活动情况、航线和锚地规划、VTS 信息服务、VTS 助航服务
	恐怖主义与海盗	国际护航力量部署、犯罪手段、犯罪工具、犯罪人数、航道地区全球和平指数、航道地区经济稳定性程度、航道地区环境复杂程度、周边国家反海盗警卫力量
地缘政治与国际形势	政治格局变动、国际冲突格局变动、大国霸权主义、通道沿岸国政治战略措施	

表 3 南海-印度洋海盗活动次数统计
Tab. 3 Statistics of piracy frequencies in South China Sea - India ocean

时间段	2013 年			2014 年			2015 年		
	南海	印度洋	全球	南海	印度洋	全球	南海	印度洋	全球
1 月	10	5	24	6	0	13	0	0	2
2 月	15	2	31	4	4	23	9	0	17
3 月	12	1	23	0	3	17	9	4	29
4 月	17	3	33	6	3	23	7	3	25
5 月	7	1	28	12	3	28	5	3	25
6 月	14	1	24	18	2	32	-	-	-
7 月	13	3	26	10	4	19	-	-	-
8 月	7	6	18	6	3	24	-	-	-
9 月	5	2	10	3	7	16	-	-	-
10 月	19	5	36	14	5	31	-	-	-
11 月	12	2	24	9	4	31	-	-	-
12 月	11	0	26	15	2	25	-	-	-
全年	142	30	303	103	40	291	-	-	-

数据来源: 国际海事组织

由表 3 可以发现, 南海几乎每个月都有海盗事件发生, 在 6, 7, 10, 12 这 4 个月份中, 发生次数均为两位数, 相对而言, 印度洋海盗事件发生次数较少。

3 中国海上能源通道多主体建模与仿真

基于多主体系统的建模与仿真是一种自下而上的建模方法, 通过对 Agent 个体及其相互之间(包括与环境)的行为进行刻画, 观察 Agent 整体作用的涌现性找到宏观规律, 以此来解释现实世界中的具体现象, 描述复杂系统的宏观行为^[15]。该方法根据系统内部的不同个体明确建模对象, 并将关键属性抽象出来建立个体 Agent 模型, 设定 Agent 属性、行为、交互规则和相关约束条件, 通过系统的运行研究个体行为对系统整体特性产生的影响。

3.1 中国海上能源通道多主体模型

首先选择中东航线作为模型构建对象, 该航线以沙特 RASTANURA 港为起点, 经过霍尔木兹海峡到印度洋, 然后通过马六甲海峡来到中国南海, 经过台湾海峡到达中国宁波港, 该航线经过的港口、海域、海峡等组成了模型中的“世界”。其次选

择油轮、海盗、热带气旋为仿真主体, 其中油轮主体的基本属性有: 装载量、安全防卫指数、航行速度等, 海盗主体的基本属性有出现频率、出现区域、攻击指数等, 热带气旋主体的基本属性有出现频率、出现区域、影响范围等。海盗主体代表了现实安全因素这一类对海上能源通道安全性有影响的因素, 热带气旋代表了固有安全因素, 而设备、船员素质等因素则在油轮主体的安全防卫指数属性中得以体现。接下来描述主体间交互规则, 油轮主体在航线上以一定范围的速度随机的进行移动, 往返于波斯湾和宁波港, 在港口位置进行加油和卸油事件; 海盗和热带气旋主体以一定的概率随机的出现在航线的特定范围内; 在油轮航行过程中, 如果油轮与海盗相遇或者油轮处于热带气旋影响范围内, 则主体间产生交互, 根据油轮安全防卫指数与海盗攻击指数或者热带气旋的影响范围数值相比较, 油轮采取相应的变动行为, 或停止航行或绕道航行等。最后, 交互过程中的随机数据由仿真平台产生, 通过不断调节仿真参数和程序, 观察仿真结果是否符合实际情况来进行仿真有效性验证。

根据以上模型描述, 在识别出主体和主体的行为后, 还需进一步分析主体行为的执行过程和仿

真系统的结构,并采用合适的工具进行描述。此时,以面向对象的视角观察多主体仿真系统,可以发现多主体仿真系统由多个主体与环境构成,这些主体之间的、以及它们与环境之间的交互就形成了多主体仿真系统的结构。

在 UML 建模工具 Rational Rose 软件中构建我国海上石油运输仿真系统类图模型,如图 1 所示。

在类图模型的基础上,对仿真系统模型中的主体活动进行描述,这里采用 UML 中的活动图来表示,活动图是对系统业务过程的工作流建模或对计算过程的具体操作建模^[16]。中国海上石油运输仿真系统活动图如图 2 所示。

3.2 中国海上能源通道多主体仿真

依据以上模型,针对中国石油进口中的中东

航线油运过程进行仿真,充分考虑该过程中主要参与者种类和各自的行为,抽取了 3 种 Agent,分别是:油轮(tankers),海盗(pirates)和热带气旋(typhoons),航线则由 patch 来构建,仿真在以下假设条件下进行:

假设 1:航线固定,航线经过海域无军事封锁等完全阻断航线因素存在;

假设 2:参与仿真的油轮在仿真周期内不进行特检修理,只进行与石油运输有关的活动,周期内始终在航线上移动,热带气旋可以准确预报;

假设 3:不考虑经济因素对航行的影响,包括油价变动、运费变动等;

在 NetLogo5.2 版本下完成仿真程序,仿真环境如图 3 所示。

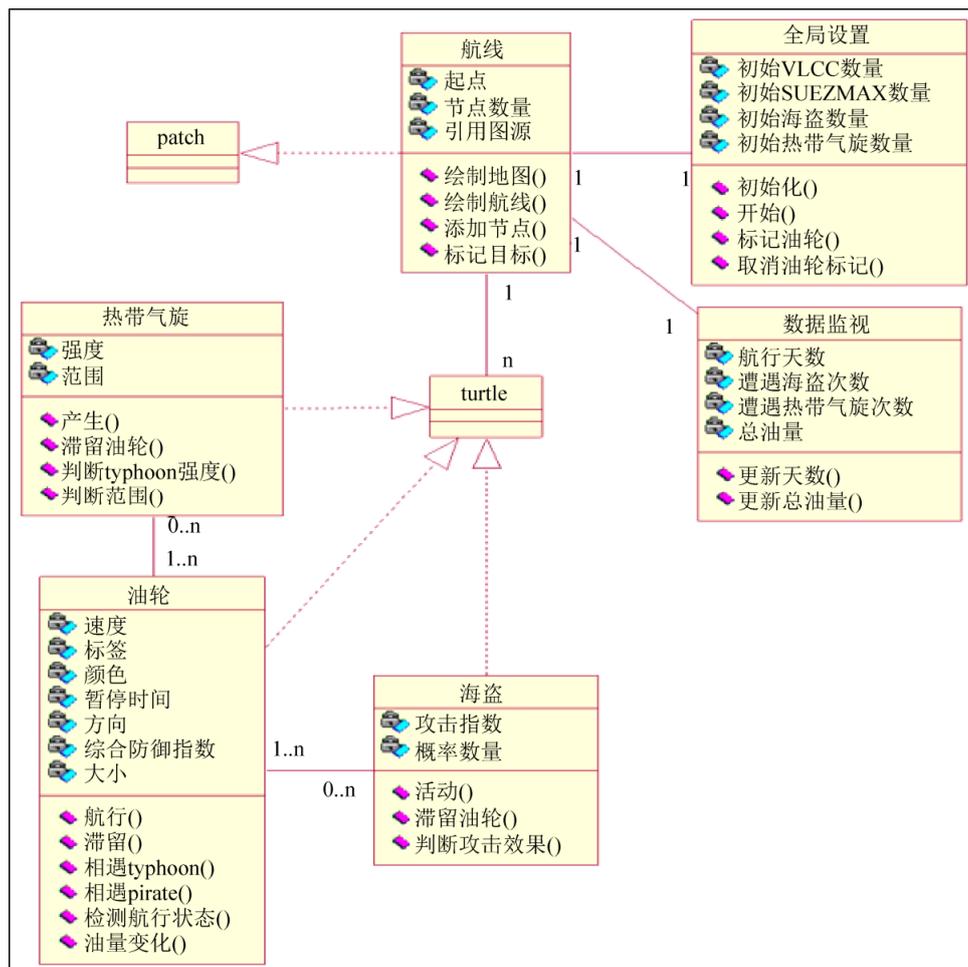


图 1 中国海上石油运输仿真系统类图模型

Fig. 1 Class diagram model of China's sea oil transport simulation system

<http://www.china-simulation.com>

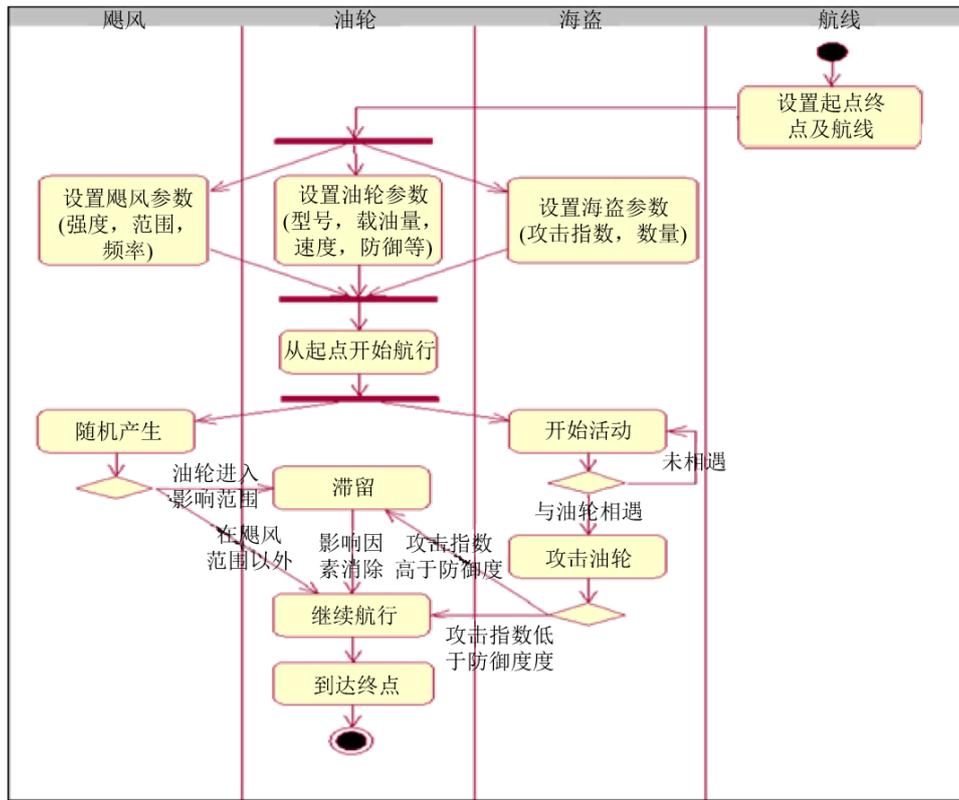


图 2 中国海上石油运输仿真系统活动图

Fig. 2 Activity diagram of China's sea oil transport simulation system

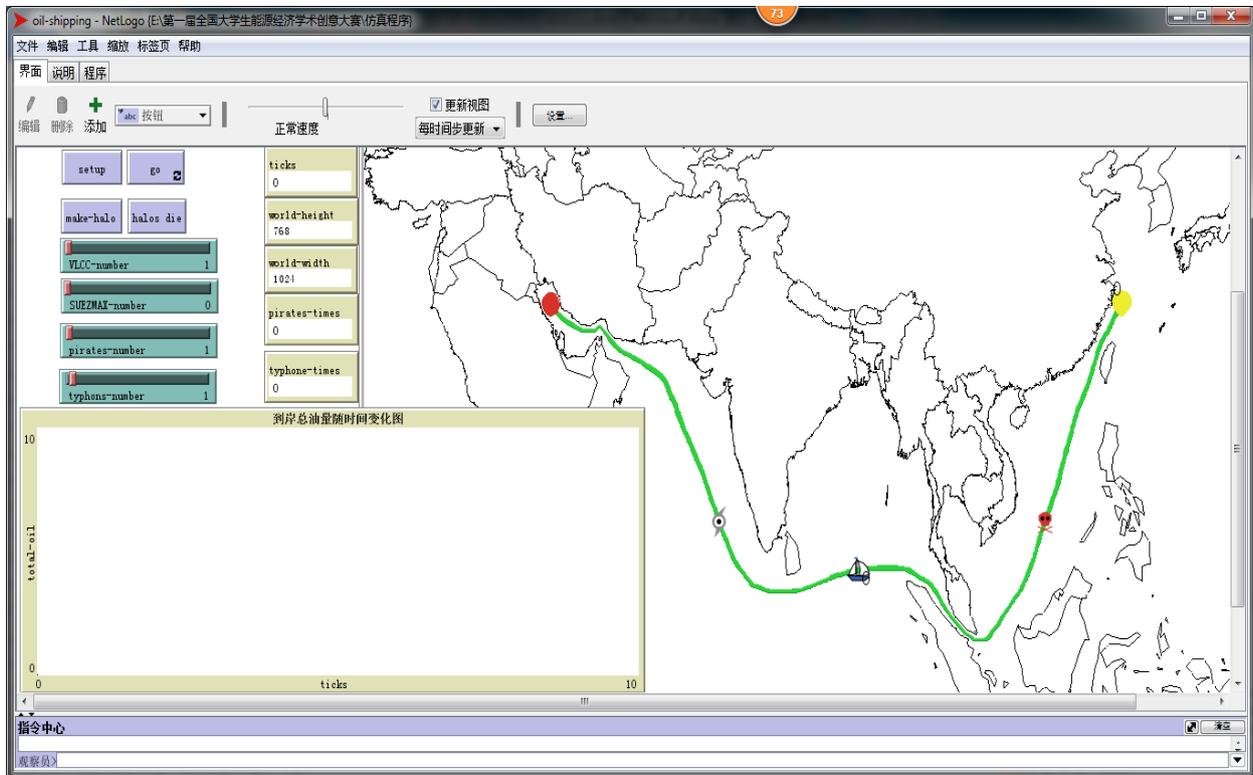


图 3 中国石油进口海上运输通道仿真实验平台(中东航线)

Fig. 3 Simulation experiment platform of China's oil imports maritime transport channel (Middle East routes)

<http://www.china-simulation.com>

仿真环境由 4 个按钮、4 个滑动条、1 个绘图、5 个数据监视器和 1 个“世界”组成，“世界”由 1024*768 块 patch (瓦片)组成，以黑白色的南海-印度洋地图为主，其中，红色的 patch 代表沙特 RASTANURA 港，用来装油；黄色的 patch 代表宁波港，用来卸油，其标签 total-oil 代表总计到岸油量；绿色线条代表航线，该航线由 3 种绿色组成，pcolor 值分别为：64, 65, 66。具体含义如表 4 所示。

对 3 种主体的属性、行为、交互规则进行设计：

tankers 主体表示油轮，有 VLCC 和 SUEZMAX 两种船型，两种油轮的移动和交互规则相同，不同的是载油量、速度和综合防御指数，tankers 主体在航线上移动，红色和黄色 patches 为航线两段，在这些 patches 上进行装油和卸油的活动，tankers 主体的标签 label 为载油量，综合防御指数在经历海盗事件后会因为经验增加而增加；

pirates 主体表示海盗，在航线上随机出现，根据表 3 统计结果，在 6, 7, 10, 12 这 4 个月份中出现海盗概率较大，在 pirates 主体出现时，如果在同一坐标位置存在 tankers 主体，并且 tankers 主体的综合防御指数小于 pirates 攻击指数，则 tankers 主体被劫持，被劫持的 tankers 主体颜色改变，停止运行一段时间，设定时间在 7~30 天随机生成，时间过了则 tankers 主体恢复原来颜色，继续按照被劫持前航行方向航行；typhoons 主体表示热带气旋，有自己的运动路径，运动过程中风力强度逐渐减弱直到消失，仿真中只考虑对航线有影响的，即运动路径与航线交叉的 typhoons 主体，现实中一般会提前得到天气预报，此时处于交叉位置附近的油轮需要停止航行来等待气旋离开，油轮会就近停靠港口避风，设定等待时间在 3~10 天随机生成。

3 种主体具体参数及设置如表 5 所示。

表 4 中国石油进口海上运输通道仿真平台(中东航线)信息表

Tab. 4 Information of simulation platform of China's oil imports maritime transport channel (Middle East routes)

种类	名称	含义	取值范围
按钮	setup	初始化世界	一次性执行
	go	开始运行程序	循环执行 365 次
	make-halo	标记某油轮，便于观察	每次一个
	halos die	取消油轮标记	每次一个
滑动条	VLCC-number	初始时 VLCC 数量	[0,100],步长为 1
	SUEZMAX-number	初始时 SUEZMAX 数量	[0,20],步长为 1
	pirates-number	初始时海盗数量	[0,50],步长为 1
	typhoons-number	初始时热带气旋数量	[0,50],步长为 1
绘图	到岸总油量随时间变化图	X 轴标题 ticks, 代表时间; Y 轴 total-oil, 代表到宁波的石油总量; 画笔命令: plot total-oil	ticks[0,365] total-oil[0,16 000] pxcor ∈ [0, 1 023] pycor ∈ [0,767]
	数据监视器	ticks world-height world-width pirates-times typhoons-times	时间, 1 个 tick 代表一天 世界高度 世界宽度 遭遇海盗次数 遭遇热带气旋次数
世界	地图	黑色代表海陆边界和国界 白色代表海洋或陆地 红色代表装油港口 黄色代表卸油港口 其标签代表到岸总油量	pcolor=0 pcolor=9.9 pcolor=15 pcolor=45 total-oil ∈ [0,16 000]
	航线	去宁波 海盗或热带气旋出现 去中东	pcolor=64, pxcor ∈ [209,823], 共 615 个瓦片 pcolor=65 pcolor=66, pxcor ∈ [212,819], 共 608 个瓦片

<http://www.china-simulation.com>

表 5 主体设置信息表
Tab. 5 Information of agents setting

主体名称	图标	属性名称	取值范围	含义
tankers		速度	[25, 30]	移动时 pxcor 变化量
		标签	[26, 28]	载油量, 取整数
		颜色	105or125	油轮颜色取 105 时表示正常航行, 取 125 时表示遇到海盗或者热带气旋, 暂停航行
		暂停时间	[7, 30] [3, 10]	[7, 30]表示遇到海盗暂停时间, [3, 10]表示遇到热带气旋暂停时间, 均取整数
		方向	64or66	pxcor=64, 表示去往宁波方向 pxcor=66, 表示去往中东方向
		数量	[0, 100]	参与航行的油轮数量, 取整数
		综合防御指数	[60, 100]	油轮抵御危险的指数, 随机得到, 每经历一次海盗事件则随机增加, 增加范围在[0, 10]
pirates		大小	25or20	25 表示 VLCC 船型, 20 表示 SUEZMAX 船型
		攻击指数	[60, 100]	与同一时刻、处于同一 X 坐标处的油轮综合防御指数进行比较, 如果大于防御指数则劫持
typhoons		数量	[0, 50]	某时刻同时出现的海盗数量, 即海盗出现概率, 不同时间段在航线不同位置处
		强度	[60, 100]	范围内随机取值, 随时间递减, 递减范围[0, 10]
		范围	30	X 轴取值±30 范围内的油轮停止航行

3.3 基于 NetLogo 的仿真程序设计与开发

仿真程序主要包括 3 个部分, 第 1 部分是全局变量声明和主体基本设置, 第 2 部分是 setup 按钮进行程序初始化, 第 3 部分是 go 按钮进行程序运行和绘图等其他功能。

首先使用 globals 命令进行全局变量的声明, 全局变量包括: now-px、total-oil、pirates-pxcor、pirates-times、typhoons-times 等, 这些变量分别表示油轮当前位置、到岸总油量、海盗位置、遇到海盗的次数、遇到台风的次数等, 全局变量还包括一些局部参数变量 i、j、k 等; 接下来采用 breed 命令声明主体种类, 主要包括油轮、海盗、台风和用来标识油轮的标记圆圈, 主体名称分别为: tankers-VLCC、tankers-suezmax、pirates、typhoons、halos。最后对油轮主体采用 own 命令进行属性声明, 主要有 loadoil-VLCC、VLCC-stop、VLCC-start, 分别表示载油量、油轮暂停航行和油轮开始航行。

接下来对 setup 按钮进行程序初始化时, 采用主程序调用子程序的模式, 主程序为 to setup, 主

要功能包括: 仿真环境初始化、变量和参数初始化、调用世界、油轮、海盗、台风等主体的初始化子程序。子程序包括: setup-patches、setup-tankers-VLCC、setup-tankers-suezmax、setup-pirates、setup-typhoons 等, 主要对仿真网格、油轮、海盗和台风等进行具体的初始化设计。4 个子程序的功能分别为:

①setup-patches 子程序中, 首先采用 import-pcolors 命令导入图片 oil-shipping view4.png, 该图片为 1 024×768 大小的 png 格式位图, 经过加工后作为仿真环境的背景图, 主要为世界地图的一部分, 接下来用命令语句绘制航线, 航线包括红色和黄色的两个端点以及绿色部分的线路; 最后对代表宁波港口的黄色端点进行总油量 total-oil 进行显示设置, 具体方法是选取黄色端点的任一网格, 用 set plabel 命令设置该网格的标签为 total-oil 值, 同时采用 set plabel-color 命令设置标签颜色为黑色以便观察;

②setup-tankers-VLCC 子程序用来初始化 VLCC 在仿真过程中的具体参数。首先采用 create 命令创造以滑动条 VLCC-number 中显示的数值为

个数的 VLCC 主体，用 `set-default-shape` 命令设置该主体的形状为 `sailboat side`，接下来调用 `move-to-line` 子程序使 VLCC 主体移动到航线上，`move-to-line` 子程序用来随机分布油船在航线上的位置和方向，其中方向有两种：去中东方向和去宁波方向，方向的随机概率为 0.5，随机结果为去中东方向的 VLCC 位于 `pcolor` 值为 66、`pxcor` 属于 [242, 819] 范围的网格上，随机结果为去宁波防线的 VLCC 位于 `pcolor` 值为 64、`pxcor` 属于 [209, 793] 范围的网格上，VLCC 的位置随机均匀分布；最后对于去宁波方向的 VLCC 设置 `loadoil-VLCC` 值为 [26, 28] 范围的整数，去中东方向的 VLCC 的 `loadoil-VLCC` 值为零，并采用 `set` 命令设置 VLCC 的颜色、大小、标签为 `loadoil-VLCC` 值、标签颜色为黑色；`setup-tankers-suezmax` 子程序功能与 `setup-tankers-VLCC` 子程序相同，区别在于 `loadoil-VLCC` 值的范围不同；

③ `setup-pirates` 子程序用来初始化海盗主体的设置。根据 `pirates-number` 滑动条的数值，创建 `pirates` 主体，采用 `set-default-shape` 命令设置其形状为 `pirates`，通过 `set` 命令设置 `pirates` 主体的大小和颜色，通过 `move-to` 命令将 `pirates` 主体移动到相应的网格上，根据前面的分析，考虑到仿真程序的易观察性，本仿真程序将 `pirates` 主体的活动范围限定在马六甲海峡和南海海域，具体的 `pxcor` 取值范围是 [627, 778]，`pirates` 主体所处的瓦片 `pcolor` 值为 65；

④ `setup-typhoons` 子程序和 `setup-pirates` 子程序相似，用来初始化热带气旋 `typhoons` 主体的参数，不同之处在于形状和活动范围不一样。考虑到南海海域已经有 `pirates` 主体且绘画出来的航线狭窄，为了便于观察又不影响仿真结果，`typhoons` 主体主要位于印度洋海域，其 `pxcor` 的取值范围是 [400, 500]，`typhoons` 主体所处的瓦片 `pcolor` 值为 65。

在 `setup` 按钮完成初始化仿真环境后，仿真程序的第 3 部分是 `go` 按钮的程序设计和实现。在这一部分中，`go` 按钮的程序用来运行仿真，`go` 按钮

中的主程序包括多个子程序，分别是：用来移动油轮的 `shipping` 子程序，用来移动海盗的 `preates-moving` 子程序，用来移动气旋的 `typhoons-moving` 子程序，用来装载石油的 `loadoil-vlcc` 子程序，用来卸载石油的 `oil-discharge` 子程序，油轮遇到海盗和气旋时候停止航行和继续航行的 `VLCC-stop` 和 `VLCC-start` 子程序，除此之外还有用来标记油轮的 `make-halo` 子程序等。`go` 命令按钮的程序流程图如图 4 所示。

3.4 仿真实验方案设计

以上仿真程序经过调试运行无误后，设计 6 套实验方案，方案 1 和方案 2 用来验证仿真模型有效性，方案 3 用来观察无安全影响因素下的运输情况，其余 3 个方案则用来观察不同安全因素对运输过程的影响，具体方案如下：

方案 1：初始化时，`VLCC-number` 取值为 1，其余滑动条取值为 0，进行 5 次实验，观察并计算在 1 个周期内，单艘油轮在无安全因素影响下的航行时间，如果符合 45~50 天，则说明该仿真基本过程符合实际情况；

方案 2：初始化时，`VLCC-number` 分别取值为 30、40，其余滑动条取值为 0，各进行 5 次实验，观察并计算在 1 个周期内，这些数量的油轮在无安全因素影响下的油运总量是否接近总量的 5 成左右，如果是，则说明该仿真基本过程符合实际情况；

方案 3：初始化时，`VLCC-number` 分别取值为 20、50、80，其余滑动条取值为 0，每个取值进行 5 次仿真实验，观察每次实验 `total-oil` 数值，该方案用来考虑不同数量的 VLCC 在没有安全问题影响下，在 1 个周期内运输的石油总量变化情况；

方案 4：初始化时，`VLCC-number` 取值为 80，`pirates-number` 取值 30, 40, 50，其余滑动条取值为 0，每个取值进行 5 次仿真实验，观察每次实验 `total-oil` 数值，该方案用来研究海盗对航行安全的影响程度；

方案 5：初始化时，`VLCC-number` 取值为 80，

typhoons-number 取值 10, 20, 30, 其余滑动条取值为 0, 每个取值进行五次仿真实验, 观察每次实验 total-oil 数值, 该方案用来研究热带气旋对航行安全的影响程度;

方案 6: 初始化时, VLCC-number 取值为 20, pirates-number 取值 30, 40, 50, 同时 typhoons-number 取值 10, 20, 30, 每组取值进行五次仿真实验, 观察每次实验 total-oil 数值, 该方案用来考虑固定数量的 VLCC 在海盗和台风出现概率增加的情况下, 在 1 个周期内运输的石油总量的变化情况。

4 仿真实验结果及分析

4.1 方案 1 实验结果及分析

依照实验方案 1 进行 5 次仿真实验, 结果统计如表 6 所示。

从列表中不难看出, 5 次实验中, 3 次卸油 8

回, 两次卸油 7 回, 这是因为初始化的时候油轮处于航线的位置和方向是随机的, 所以第 1 次到卸油港口距离不一样而导致的; 根据卸油的时间点, 计算时间间隔, 可以得到每个航次的耗时数据, 对耗时数据求平均值发现, 5 次实验的航次耗时平均值均属于 45~50 天范围内, 仿真结果符合现实情况。

4.2 方案 2 实验结果及分析

依照方案 2 进行实验, VLCC-number 取值为 30, 40 时, 典型的到岸总油量随时间变化图见图 5。

方案 2 实验结果见表 7, 可见每次实验所得到的总到岸油量数值有一定的波动, 这是因为初始化时已经有油轮处于运输过程中, 当 ticks 数值到 365 的时候仿真结束, 此时航线上也有油轮。用平均值除以年进口总量 1.6 亿吨, 得到占比分别为 39.25% 和 51.25%, 此数值基本符合调研实际情况。

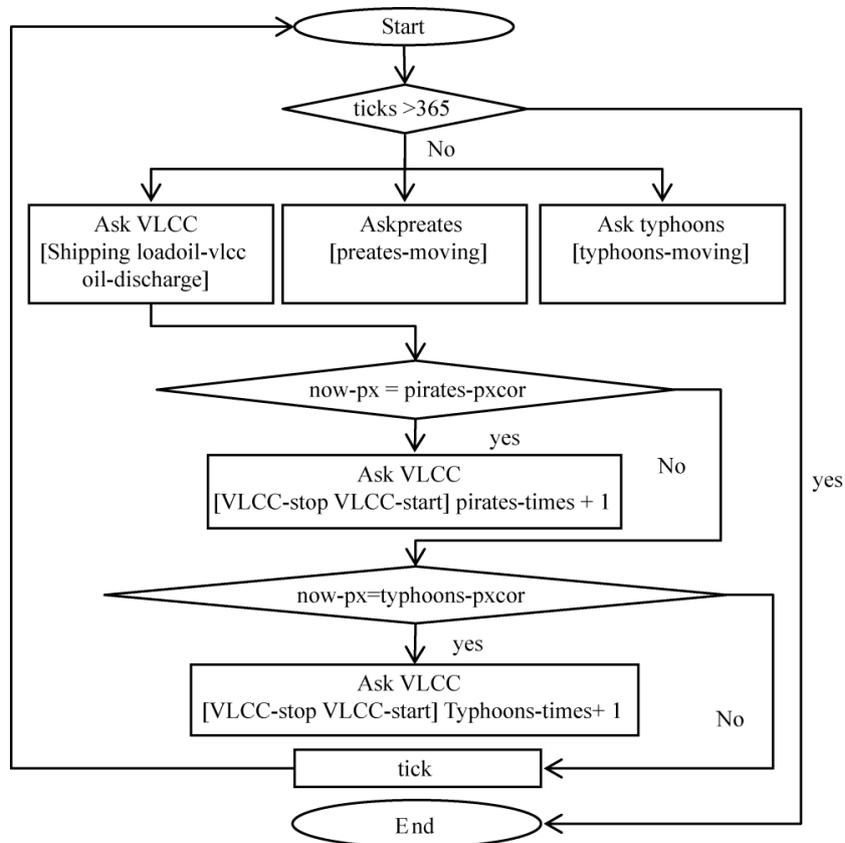
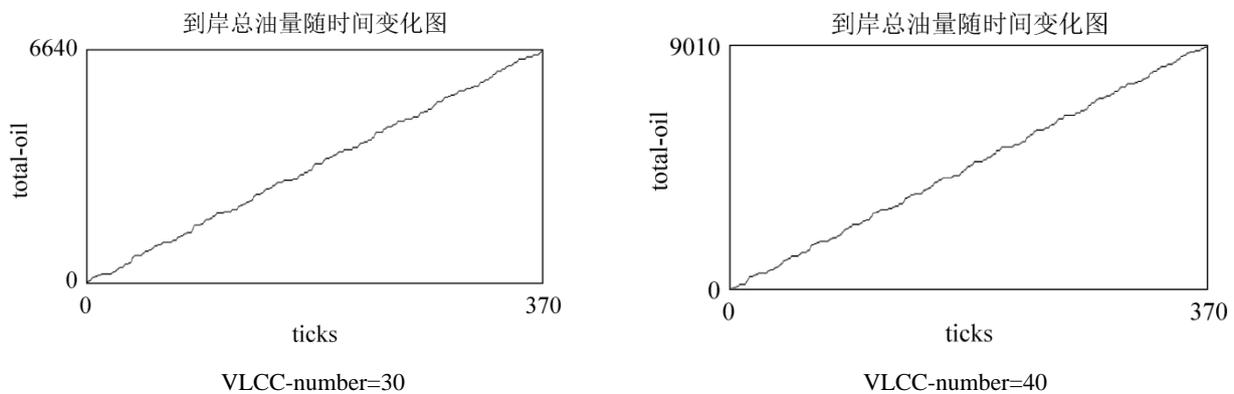


图 4 “go”按钮程序流程图
Fig. 4 Program flow chart of button “go”

表 6 方案 1 实验结果列表
Tab. 6 Result list of experiment scheme one

项目		结果								/ticks
第 1 次实验	卸油时间点	29	77	124	172	218	264	311	359	47.1
	航次耗时	-	48	47	48	46	46	47	48	
第 2 次实验	卸油时间点	19	67	115	162	208	256	303	351	47.4
	航次耗时	-	48	48	47	46	48	47	48	
第 3 次实验	卸油时间点	28	76	123	171	219	266	314	362	47.7
	航次耗时	-	48	47	48	48	47	48	48	
第 4 次实验	卸油时间点	35	83	130	177	224	271	319	-	47.3
	航次耗时	-	48	47	47	47	47	48	-	
第 5 次实验	卸油时间点	40	88	136	184	231	279	325	-	47.5
	航次耗时	-	48	48	48	47	48	46	-	

图 5 方案 2 典型到岸总油量随时间变化图
Fig. 5 Total oil change over time by experiment scheme two表 7 方案 2 实验结果列表
Tab. 7 Result list of experiment scheme two

VLCC 数量	第 1 次实验 total-oil	第 2 次实验 total-oil	第 3 次实验 total-oil	第 4 次实验 total-oil	第 5 次实验 total-oil	平均 total-oil
30	6 180	6 312	6 244	6 421	6 246	6 280.6
40	8 230	8 141	8 041	8 278	8 312	8 200.4

4.3 方案 3 实验结果及分析

依照方案 3 进行实验, VLCC-number 取值为 20、50、80 时, 典型的到岸总油量随时间变化图如图 6 所示。

从图 6 中可以看出, 在没有安全因素影响时, 到岸总油量随时间增加而增加, 几乎为一条直线, 斜率稳定, 船只数量越多, 斜率越大, 实验数据统计如表 8 所示。

对方案 3 的实验结果进行计算, 当 VLCC 数量增长率为 150% 时(VLCC 数量由 20~50), 到岸总油量增长率为 155%, 大于 VLCC 增长率; 当 VLCC 数量增长率为 60% 时(VLCC 数量由 50~80), 到岸总油量增长率为 61.6%, 也大于 VLCC 增长率。这个结果说明了, 油船数量的增长和到岸石油总量的增长不是同比例的, 到岸石油总量增长率高于油轮数量增长率。

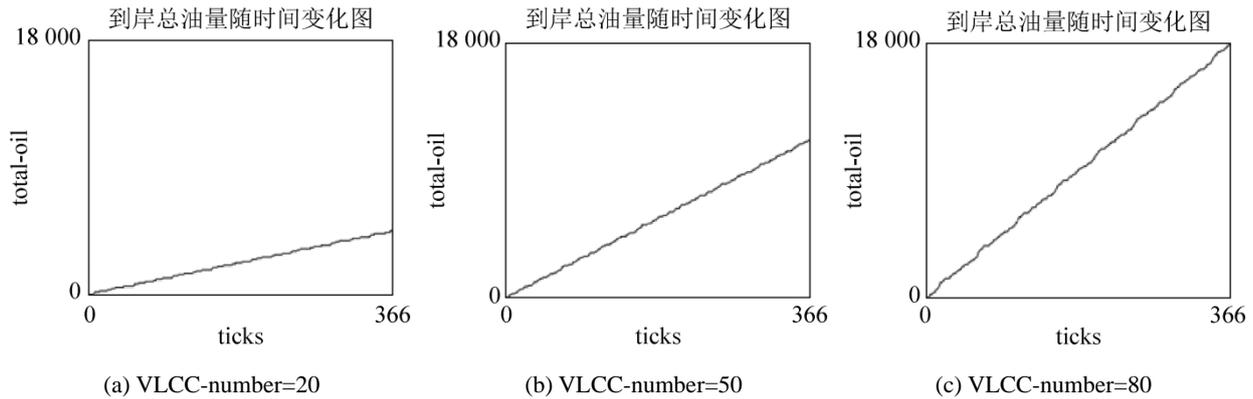


图 6 方案 3 典型到岸总油量随时间变化图
Fig. 6 Total oil change over time by experiment scheme three

表 8 方案 3 实验结果列表
Tab. 8 Result list of experiment scheme three

VLCC 数量	第 1 次实验 total-oil	第 2 次实验 total-oil	第 3 次实验 total-oil	第 4 次实验 total-oil	第 5 次实验 total-oil	平均 total-oil
20	4 232	4 126	4 078	4 289	4 157	4 176.4
50	10 791	10 633	10 582	10 692	10 511	10 649.8
80	16 728	16 964	17 438	17 295	17 623	17 209.6

4.4 方案 4 实验结果及分析

依据实验方案 4, 仿真初始化时, VLCC-number 取值为 80, pirates-number 取值 30, 40, 50, 其余滑动条取值为 0, 每个取值进行五次仿真实验, 观察每次实验 total-oil 数值和 pirates-times 的值, 该方案实验数据统计如表 9 所示。

由表 9 可见, 随着 pirates-number 的增加, 遭遇海盗的次数 pirates-times 的值也在增加, 到岸总油量 total-oil 在减少; 海盗数目的增长率为 33.3% 和 25%, 遭遇海盗次数的增长率为 22.5% 和 29.5%, 到岸总油量的减少率为 3.98% 和 3.61%。对比表 8 中, VLCC-number 取值为 80 时候的平均 total-oil 数值 17 209.6, 可以发现, 遭遇海盗次数为 33.8 时, total-oil 减少 672.6; 遭遇海盗次数为 41.4 时, total-oil 减少 1331; 遭遇海盗次数为 53.6 时, total-oil 减少 1904; 平均每遇到一次海盗, total-oil 减少 29.19。这个结果说明, 在一年内, 如果想要保持总的石油进口量不变, 那么每遭遇一次海盗袭击, 就需要增加一次油轮运输来弥补因为受到袭击而损失的总油量。

4.5 方案 5 实验结果及分析

依据实验方案 5, 仿真初始化时, VLCC-number 取值为 80, typhoons-number 取值 10、20、30, 其余滑动条取值为 0, 每个取值进行 5 次仿真实验, 每个取值进行 5 次仿真实验, 观察每次实验 total-oil 数值和 typhoons-times 的值, 该方案实验数据统计如表 10 所示。

由表 10 可见, 随着 typhoons-number 的增加, 遭遇热带气旋的次数 typhoons-times 的值也在增加, 到岸总油量 total-oil 在减少; 热带气旋数目的增长率为 100% 和 50%, 遭遇热带气旋次数的增长率为 95.5% 和 43%, 到岸总油量的减少率为 0.6% 和 1.2%。对比表 8 中, VLCC-number 取值为 80 时候的平均 total-oil 数值 17 209.6, 可以发现, 遭遇热带气旋次数为 8.8 时, total-oil 减少 200; 遭遇热带气旋次数为 17.2 时, total-oil 减少 297.8; 遭遇热带气旋次数为 24.6 时, total-oil 减少 497.2; 平均每遇到一次热带气旋, total-oil 减少 60.3。这个结果说明, 热带气旋给海上能源通道带来的安全影响较海盗还要严重, 从实际情况来讲, 遭遇海盗

袭击在同一时期内一般只有受到袭击的一条油轮受到影响, 而如果航线上发生热带气旋, 油轮一般会选择进港避险, 在热带气旋发生的这个时期, 受

影响的船只数目不止一条, 因此热带气旋对一定时期内石油总进口量影响更大。

表 9 方案 4 实验数据统计表
Tab. 9 Result list of experiment scheme four

实验次序	项目	pirates-number=30	pirates-number=40	pirates-number=50
第 1 次	pirates-times	45	38	48
	total-oil	16 100	16 210	16 030
第 2 次	pirates-times	24	44	59
	total-oil	16 892	15 767	15 001
第 3 次	pirates-times	31	46	51
	total-oil	16 626	15 570	15 206
第 4 次	pirates-times	33	42	53
	total-oil	16 589	15 824	15 185
第 5 次	pirates-times	36	37	57
	total-oil	16 478	16 022	15 106
平均值	pirates-times	33.8	41.4	53.6
	total-oil	16 537	15 878.6	15 305.6

表 10 方案 5 实验数据统计表
Tab. 10 Result list of experiment scheme five

实验次序	项目	typhoons-number=10	typhoons-number=20	typhoons-number=30
第 1 次	typhoons -times	11	22	19
	total-oil	16 989	16 801	16 885
第 2 次	typhoons -times	6	18	23
	total-oil	17 046	16 894	16 797
第 3 次	typhoons -times	9	13	28
	total-oil	17 002	16 992	16 580
第 4 次	typhoons -times	4	16	25
	total-oil	17 189	16 907	16 702
第 5 次	typhoons -times	14	17	28
	total-oil	16 822	16 965	16 598
平均值	typhoons -times	8.8	17.2	24.6
	total-oil	17 009.6	16 911.8	16 712.4

4.6 方案 6 实验结果及分析

依照方案 6 进行实验, VLCC-number 取值为 20, pirates-number 取值 30, 40, 50, 同时 typhoons-number 取值 10, 20, 30, 3 种取值情况每种进行 5 次仿真实验, 典型的到岸总油量随时间变化图如图 7 所示。从图 7 中可看出, 曲线中出现了很多与 X 轴平行的线段, 这些线段说明了在相关时间段内没有油轮到港, 这是海盗和热带气旋对正常航行带来的影响, 最终的到岸总油量见表 11。

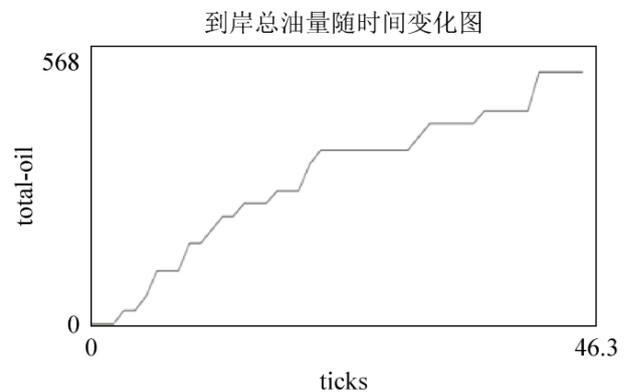


图 7 方案 6 典型到岸总油量随时间变化图
Fig. 7 Total oil change over time by experiment scheme six

表 11 方案 6 实验数据统计表
Tab. 11 Result list of experiment scheme six

VLCC20 时 海盗, 气旋	第 1 次实验 total-oil	第 2 次实验 total-oil	第 3 次实验 total-oil	第 4 次实验 total-oil	第 5 次实验 total-oil	平均 total-oil
30, 10	3 869	3 775	3 910	3 852	3 995	3 880.2
40, 20	3 510	3 622	3 641	3 680	3 895	3 669.6
50, 30	3 430	3 419	3 453	3 389	3 391	3 416.4

结合方案 3 中 VLCC 数量为 20 时, total-oil 平均值为 4 176.1, 该值分别与方案六中的 3 个平均 total-oil 值进行计算, 减少比例分别为 7.1%, 12.1%, 18.2%, 由此可见海盗和气旋数量的增加会加速提高油运总量的减少比率。

5 结论

本文首先分析了影响中国海上能源通道安全的因素, 描述了中国石油进口运输的实际情况, 接下来选取具有代表性的中东航线, 在一定假设条件下, 设立油轮、海盗、热带气旋为主体, 设置了主体属性、运动规律和交互规则, 以此为基础, 在 NetLogo 仿真平台实现了中国海上石油运输(中东航线)多主体仿真模型与程序, 通过仿真实验得到以下结论:

(1) 本次仿真设计符合现实情况, 为研究中国海上能源通道搭建了实验平台, 后续可在此基础上不断丰富研究内容进行更深入的研究;

(2) 我国拥有的 VLCC 数量远远不够, 仅中东航线就需要 80 艘左右的 VLCC 才能满足石油进口的需求, 我国需要尽快增加自己的 VLCC 数量;

(3) 正常情况下, 油轮数量的增加比例会低于石油运输总量的增加比例, 这为我国确定未来油轮需求量具有一定参考价值;

(4) 每遭遇一次海盗袭击, 就需要增加一个航次的油轮运输来弥补因为受到袭击而损失的当年总油量;

(5) 热带气旋给海上能源通道带来的安全影响较海盗还要严重, 这在以往的研究中并未明确指出, 也没有研究将二者进行比较, 这说明油运企业应该更重视以热带气旋为代表的固有安全因素对

海上石油运输带来的影响;

(6) 以海盗为代表的现实安全因素和以热带气旋为代表的固有安全因素会对海上能源通道安全性带来非常明显的影响, 海盗和热带气旋数量增加比例越大, 带来的油运总量的变化比率会加速增大。

参考文献:

- [1] Yao L, Chang Y. Shaping China's energy security: The impact of domestic reforms[J]. Energy Policy, 2015, 77(2): 131-139.
- [2] IEA. World Energy Outlook 2011[R]. 2011.
- [3] Zhang H, Pan C. The Analysis of Status and Volume of Crude Oil Shipping Import in China[C]. Multimedia Technology (ICMT), 2010 International Conference on. IEEE, 2010: 1-3.
- [4] 彭丽. 我国进口石油海上运输安全的灰色模糊综合评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009: 12-17.
Peng Li. The Grey Fuzzy Comprehensive Evaluation of China's Importing Petroleum Marine Transportation Safety[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009: 12-17.
- [5] 张罕育. 我国进口原油海上运输安全系统评价及预警研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013: 36-44.
Zhang Hanyu. Study on the Evaluation and Early Warning of China's Seaborne Crude Oil Imports Security System[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013: 36-44.
- [6] 明平军. 基于可拓学的新加坡海峡航行环境安全评估 [D]. 大连: 大连海事大学, 2013: 42-55.
Ming Pingjun. Extenics-based Safety Assessment of Navigation Environment in Singapore Straits[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013: 42-55.
- [7] 何剑彤, 李振福, 李娜, 等. 我国海上战略通道安全影响因素的 ISM 分析[J]. 上海海事大学学报, 2012, 33(4): 64-69.
He Jiantong, Li Zhenfu, Li Na, et al. Analysis on influencing factors for China's strategic sea lane security

- based on ISM[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2012, 33(4): 64-69.
- [8] 巫蓓. 我国南海海域的海运安全评价[D]. 大连: 大连海事大学, 2013: 22-24.
Wu Bei. Assessment of Shipping Traffic Safety of the South China Sea[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013: 22-24.
- [9] 杨理智, 张韧, 白承祖, 等. 基于贝叶斯网络的我国海上能源通道海盗袭击风险分析与实验评估[J]. 指挥控制与仿真, 2014, 36(2): 51-57.
Yang Lizhi, Zhang Ren, Bai Chengzu, et al. The Risk Analysis and Evaluation about Pirate Attacks on Marine Energy Channel of China Based on Bayes Net[J]. Command Control and Simulation, 2014, 36(2): 51-57.
- [10] 杨理智, 张韧. 基于云模型的我国海上能源战略通道安全风险评估[J]. 军事运筹与系统工程, 2014, 28(1): 74-80.
Yang Lizhi, Zhang Ren. Security risk assessment of China's offshore energy strategic channel based on cloud model[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2014, 28(1): 74-80.
- [11] 王尧, 吕靖. 中国原油进口运输通道安全研究[J]. 大连海事大学学报, 2014, 40(1): 109-116.
Wang Yao, Lü Jing. Transportation safety of China crude oil import[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2014, 40(1): 109-116.
- [12] 范英, 姬强, 朱磊, 等. 中国能源安全研究——基于管理科学的视角[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 112-140.
Fan Ying, Ji Qiang, Zhu Lei, et al. Research on energy security in China -- from the perspective of management science [M]. Beijing: Science Press, 2013: 112-140.
- [13] 中石油经济技术研究院. 2014年国内外油气行业发展报告[R]. 2015: 1.
Institute of Petroleum Economics and technology. Domestic and foreign oil and gas industry development report 2014[R]. 2015: 1.
- [14] 张韧, 洪梅, 黎鑫, 等. 南海-印度洋海洋环境风险评估与应急响应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
Zhang Ren, Hong Mei, Li Xin, et al. Marine environmental risk assessment and emergency response in the South China Sea and India sea[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [15] 张军. 多主体系统——概念、方法与探索[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2013.
Zhang Jun. Multi Agent System——Concepts, Methods and Exploration[M]. Beijing: The capital economics and trade university press, 2013.
- [16] 沈洋. 多主体系统仿真调度与贝叶斯网络决策建模问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
Shen Yang. Research on the Modeling and Simulation of Multi-Agent System with Complex Event Scheduling Logic and Bayesian Network Decision-Making[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.