

基于系统动力学的煤炭“公转铁”运输碳排放仿真分析

王博楷, 刘玲丽*

武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年9月23日; 录用日期: 2024年10月22日; 发布日期: 2024年10月31日

摘要

根据碳达峰、碳中和目标要求以及优化调整运输结构, 推动大宗物资“公转铁”工作方案, 综合考虑煤炭“公转铁”过程中运输、转运、装卸、存储子系统以及转运率、装卸能力、采购与消耗速率等因素对煤炭运输全过程碳排放量的影响, 构建了基于碳排放的煤炭“公转铁”运输方案的系统动力学模型。从系统角度出发, 定量地研究不同变量变动后, 煤炭“公转铁”运输所产生的碳排放量, 同时以陕西省2024年政府工作报告等文件为基础, 设计优化情景并进行仿真模拟。根据仿真结果, 对转运率进行优化后减碳率达40.67%, 是减碳效率最高的因素, 同时对全因素优化后减碳率达52.95%。研究表明, 运输环节在煤炭运输减碳过程中有较大优化空间, 增加转运率与投资额对于减碳量的影响具有边际效应, 过度追求缩短发货时间会导致碳排放总量的增加。因此, 各地区应当权衡经济效益、运输能力与各因素减少碳排放的效果, 根据本地实际情况进行统筹考虑, 以确定降低煤炭运输碳排放量的有效方针。

关键词

煤炭运输, “公转铁”, 碳排放, 系统动力学

Simulation Analysis of Carbon Emission of Coal “Road to Rail” Transportation Based on System Dynamics

Bokai Wang, Lingli Liu*

School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Sep. 23rd, 2024; accepted: Oct. 22nd, 2024; published: Oct. 31st, 2024

*通讯作者。

文章引用: 王博楷, 刘玲丽. 基于系统动力学的煤炭“公转铁”运输碳排放仿真分析[J]. 软件工程与应用, 2024, 13(5): 738-748. DOI: 10.12677/sea.2024.135075

Abstract

In accordance with the goals of carbon peaking and carbon neutrality, as well as the need to optimize and adjust the transportation structure, we have developed a work plan to promote the “road to rail” transport of bulk materials. This plan comprehensively considers various factors affecting carbon emissions throughout the entire coal transportation process, including transportation, transshipment, loading and unloading, and storage subsystems, as well as transfer rates, loading and unloading capacities, and procurement and consumption rates. A system dynamics model for coal “road to rail” transportation based on carbon emissions has been constructed. From a systemic perspective, we quantitatively examined the carbon emissions generated by coal “road to rail” transportation following changes in different variables. Based on documents such as the Shaanxi Province 2024 Government Work Report, we designed optimized scenarios and conducted simulation modeling. According to the simulation results, optimizing the transfer rate achieved a carbon reduction rate of 40.67%, making it the most effective factor for reducing emissions. Furthermore, after a comprehensive optimization of all factors, the reduction rate reached 52.95%. The research shows that the transportation link has a large space for optimization in the process of carbon reduction in coal transportation. Increasing the transfer rate and investment has a marginal effect on the impact of carbon reduction, and excessive pursuit of shortening the delivery time will lead to an increase in the total carbon emission. Therefore, all regions should weigh the effect of economic benefits, transportation capacity and various factors to reduce carbon emissions, and make overall considerations according to the local actual situation to determine the effective policy to reduce carbon emissions of coal transportation.

Keywords

Coal Transportation, “Road to Rail”, Carbon Emissions, System Dynamics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当前全球变暖的背景下, 温室气体的排放问题紧密关联着能源消耗模式。中国作为世界上最大的煤炭生产和消费国之一, 其庞大的煤炭需求直接影响了国家的碳排放水平。根据《2022年度煤炭行业发展年度报告》[1], 2022年, 全国原煤产量45.6亿吨, 同比增长10.5%; 全国铁路累计发运煤炭26.8亿吨, 同比增长3.9%, 仍需加快构建新型煤炭工业体系。目前铁路运输已是煤炭运输的主要运输方式, 但由于我国煤炭使用基数庞大, 且部分内陆地区仍以公路运输为主, 煤炭公路运输比例仍有很大降低空间, 因此促进煤炭多式联运、“公转铁”、“公转水”仍是解决煤炭运输效率和减碳问题的重要手段, 也是煤炭物流绕不开的门槛。同时, 探索煤炭运输业的低碳发展对于实现我国“双碳”目标具有重要推动作用。

对于煤炭运输碳排放相关问题, 国内外学者已经进行了大量的研究, 范志强[2]建立了复杂需求四级煤炭供应链网络设计数学规划模型, 并设计了一种遗传算法, 采用优先权规则对染色体进行了编码与解码, 结合贪婪启发式算法生成了初始种群, 并通过随机算例集合对其进行验证; 李悦[3]将煤炭供应链分为了生产、运输、存储和消费四个子系统, 对各子系统的碳排放源及排放量进行了详细分析, 并通过应用系统动力学的方法, 揭示了各子系统之间、子系统内部各影响因素间的因果关系; 刘仕强等[4]研究建

立了混合整数线性规划模型, 确定网络结构决策以及产能、库存量、流量决策, 以最小化供应链网络总成本, 减少碳排放, 满足最低客户服务水平; Yufang Liu [5]等发现支撑裂缝导流率的损伤率随行驶速度的增加而增加, 而煤粉的产量随行驶速度的增加呈先增加后降低的趋势, 强调了颗粒大小和行驶速度在煤粉运输动力学中的重要性。在“公转铁”问题上, Jiixin Zhang [6]等建立了中国煤-铁-水联合运输网络的静态拓扑结构并仿真, 发现煤炭运输网络关键节点得到很好的保护, 网络就会表现出一定的抗破坏能力; Dong Min [7]等基于引力模型建立了实用的可达性评价模型, 包括环境因素, 运输排放和粉尘污染, 该评估系统能够确定煤炭海运网络中的薄弱环节, 并为托运人和港口所有者提供决策依据; 包兴[8]以“三西”地区为案例, 提出了促进煤炭“公转铁”政策实施、优化煤炭铁路直达运输通道、加强煤炭运输管理水平等政策建议。在系统动力学方法研究上, 高太光[9]等构建了包括信息共享程度、新技术开发率、煤炭交易价格 3 个因素的系统动力学模型, 并分析了各变量对煤炭供应链不同阶段及总体污染排放的影响; Xin Li [10]等开发了一个分析模型, 用于对混合互联和自动驾驶汽车、人类驾驶车辆和自动驾驶公交车的系统动力学进行建模, 仿真结果可以用作在部分连接环境中规划和操作自动驾驶公交车的基础。

通过梳理相关文献发现, 目前学者从煤炭供应链网络、多式联运以及经济背景等方面对煤炭运输进行研究, 对于运用系统动力学的方法研究煤炭运输“公转铁”策略以及其对碳排放量的影响研究较少。因此本文以煤炭“公转铁”运输各环节的碳排放为研究对象, 运用系统动力学建立包括运输、转运、装卸、仓储四个子系统的煤炭“公转铁”运输方案模型, 评估各因素对整体碳排放的影响, 并提出相应减排建议。

2. 煤炭“公转铁”运输碳排放分析

2.1. 模型总体结构与系统边界确定

从宏观上, 可以将煤炭“公转铁”运输碳排放过程划分为: 运输环节碳排放, 包括煤炭公路与铁路运输单位所产生的碳排放; 转运环节碳排放, 包括转运时机械设备所产生的碳排放; 装卸环节碳排放, 包括装卸机械以及场内皮带运输所产生的碳排放; 仓储环节碳排放, 指煤炭运输到场后未被立即使用, 而暂存于仓库所产生的碳排放。

根据上述碳排放过程分析, 假设煤炭“公转铁”运输碳排放系统主要由运输环节碳排放子系统、转运环节碳排放子系统、装卸环节碳排放子系统以及仓储环节碳排放子系统四部分构成, 各子系统之间、子系统内部不同因素间存在因果关系。二氧化碳排放量为直接排放量, 不考虑其他间接排放。由于煤炭“公转铁”运输碳排放系统是一个动态复杂的系统, 本文深入分析和研究对碳排放水平产生关键影响的因素, 只考虑主要的能源消耗和碳排放, 不考虑系统之外因素的影响。

2.2. 因果关系分析

根据煤炭“公转铁”运输过程以及上述分析, 碳排放总量可分为四个阶段: 运输、转运、装卸和仓储所产生的碳排放。考虑各环节碳排放主要的影响因素, 主系统包括 4 条回路。

回路一: 煤炭运输量→公路(铁路)周转量→公路(铁路)运输碳排放量→运输环节碳排放量→全过程碳排放量→“公转铁”运输整体效益→煤炭运输量。

回路二: 转运量→转运增加里程碳排放量→转运环节碳排放量→全过程碳排放量→“公转铁”运输整体效益→转运量。

回路三: 装卸量→每次装卸碳排放量→装卸环节碳排放量→全过程碳排放量→“公转铁”运输整体效益→装卸量。

回路四: 发电量→订单量→采购量→每次采购碳排放量→存储环节碳排放量→全过程碳排放量→“公

转铁”运输整体效益→发电量。

2.2.1. 运输环节碳排放子系统

运输环节的碳排放主要来自公路和铁路交通工具的运行所产生的碳排放。交通工具的碳排放受到碳排放因子、周转量和运输单位油耗的影响,呈正向关系。周转量与煤炭消耗量、运距呈正向关系。运输单位油耗由运输平均油耗和运输投资决定,运输投资越大,运输单位油耗越低,呈负向关系。

2.2.2. 转运环节碳排放子系统

转运环节碳排放主要来自转运设备的运转和运输单位从公路转运至铁路所增加里程运输所产生的碳排放。其中,转运设备运转的碳排放与转运量呈正向关系,增加里程中运输单位所产生的碳排放与转运周转量相关,亦呈正向关系。转运量与转运率相关,由公路和铁路的分担率计算得出。

2.2.3. 装卸环节碳排放子系统

装卸环节碳排放主要来源于装卸设备运转以及场内以皮带运输为主的设备运转所产生的碳排放,其中装卸设备碳排放由碳排放因子、装卸单位油耗、装卸量所决定,呈正向关系。装卸单位油耗由设备功率和运行速度决定,与装卸设备功率呈正向关系,与运行速度呈负向关系。场内运输碳排放与碳排放因子,单位距离消耗电能呈正向关系。单位距离消耗电能与运输设备功率,运输时间呈正向关系。

2.2.4. 仓储环节碳排放子系统

存储环节碳排放受每次采购碳排放量影响,每次采购碳排放量由采购量和单位采购碳排放量决定,呈正向关系。采购量与发货时间、消耗速率、订单量呈正向关系。消耗速率由采购周期和发电消耗量决定,与发电消耗量呈正向关系,与采购周期呈负向关系。订单量由最大库存、存储量、订购点和发电消耗量决定,与存储量呈负向关系,与其他影响因素呈正向关系。存储量由消耗和采购速率决定,与采购速率呈正向关系,与消耗速率呈负向关系。

3. 煤炭“公转铁”运输碳排放系统模型

3.1. 模型构建

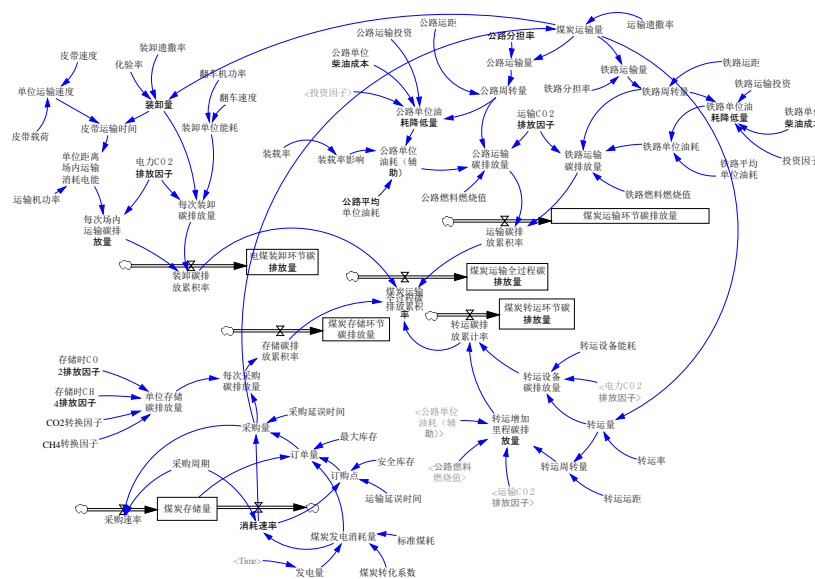


Figure 1. System dynamics flow diagram
图 1. 系统动力学流图

根据上述主要反馈分析以及子系统因果关系与文献[1]-[5][9], 结合煤炭运输系统的特点, 利用 Vensim PLE 软件构建煤炭“公转铁”运输碳排放系统动力学模型流图, 如图 1 所示。

3.2. 主要公式

煤炭“公转铁”运输碳排放计算方式与公路、铁路运输以及转运站转运过程的碳排放计算方式类似, 故模型中核心公式和数据依据文献[1][3]-[5][9]的方法做出适当调整并根据历史数据推算得来, 具体如表 1 所示。

Table 1. The main formula of system dynamics model

表 1. 系统动力学模型主要公式

序号	公式
1	煤炭运输环节碳排放量 = INTEG (运输碳排放积累率, 初始值)
2	公路运输碳排放量 = 公路周转量 × 公路单位油耗 × 公路燃料燃烧值 × 运输 CO ₂ 排放因子
3	公路运距 = RANDOM UNIFORM (最小值, 最大值)
4	铁路运输碳排放量 = 铁路周转量 × 铁路单位油耗 × 铁路燃料燃烧值 × CO ₂ 排放因子
5	铁路运距 = RANDOM UNIFORM (最小值, 最大值)
6	装载率影响 = WITH LOOK UP (装载率, 装载率影响)
7	煤炭转运环节碳排放量 = INTEG (转运碳排放积累率, 初始值)
8	转运设备碳排放量 = 电力 CO ₂ 排放因子 × 转运设备能耗 × 转运量
9	转运增加里程碳排放量 = 公路单位油耗 × 公路燃料燃烧值 × 转运周转量 × 运输 CO ₂ 排放因子
10	煤炭装卸环节碳排放量 = INTEG (装卸碳排放积累率, 初始值)
11	每次场内运输碳排放量 = 单位距离场内运输消耗电能 × 电力 CO ₂ 排放因子
12	每次装卸碳排放量 = 装卸量 × 装卸单位能耗 × 电力 CO ₂ 排放因子
13	煤炭存储环节碳排放量 = INTEG (存储碳排放积累率, 初始值)
14	单位存储碳排放量 = CH ₄ 转换因子 × 存储时 CH ₄ 排放因子 + CO ₂ 转换因子 × 存储时 CO ₂ 排放因子
15	煤炭存储量 = INTEG (采购速率 - 消耗速率, 煤炭存储量初始值)
16	订购点 = 安全库存 + 运输时间 × 消耗速率

3.3. 部分参数设定

基于上述公式以及《中国统计年鉴》《中国交通年鉴》《中国能源统计年鉴》《煤炭行业发展年度报告》等统计资料, 对模型中的常量和软件初始运行环境数据进行设定, 部分参数设定如表 2 所示。

Table 2. System dynamics model partial variable setting

表 2. 系统动力学模型部分变量设定

变量名称	数值	单位
INITIAL TIME	0	月
TIME STEP	1	月
FINAL	12	月
公路燃料燃烧值	42,652	KJ/kg
铁路燃料燃烧值	42,652	KJ/kg
运输 CO ₂ 排放因子	7.41×10^{-5}	kg/KJ
运输遗撒率	1%	无量纲
转运遗撒率	1%	无量纲

根据检验结果可分析得出, 保持其他参数不变, 发电量的变化影响着煤炭“公转铁”运输全过程碳排放的变化, 并且呈同方向变化, 依据文献[1]-[5] [9]与实际运输经验, 仿真结果与实际情况一致, 证明了该模型的可靠性, 模型总体上通过检验。

4.2. 系统仿真

根据上文构建的煤炭“公转铁”运输碳排放系统动力学模型对陕西省关中地区某发电厂煤炭运输碳排放进行仿真, 如图 3 所示。

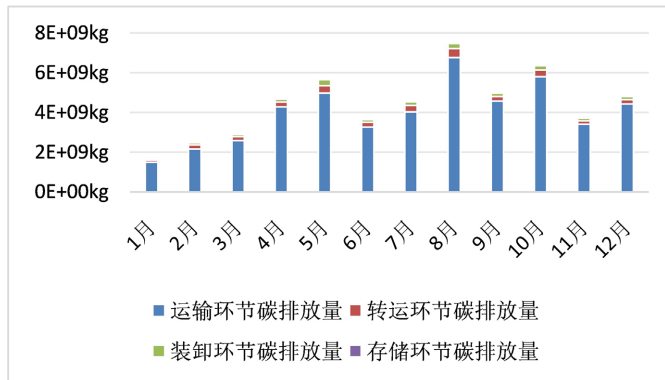


Figure 3. Carbon emissions of each subsystem
图 3. 各环节子系统碳排放量

由图可知, 在陕西省关中地区某电厂的煤炭运输碳排放总量中, 运输环节的碳排放量远远高于转运、装卸和存储环节的碳排放量, 占总碳排放量的 89.94%。因此, 运输环节碳排放量较高是煤炭运输碳排放总量较大的重要原因。转运、装卸和存储环节的碳排放量分别占总碳排放量的 5.93%、4.08%和 0.05%。在煤炭运输减碳过程中, 这些环节仍有优化空间。

4.3. 单变量模型仿真分析

根据上述变量设置和基础仿真结果, 选取公路与铁路运输投资、分担率、发货时间和运输时间作为关键变量, 在一年的模拟周期内, 分别分析各变量单独变动对煤炭“公转铁”运输过程各阶段及碳排放总量的影响, 旨在找到有效减少碳排放的路径。

4.3.1. 公路与铁路运输投资额仿真分析

保持其他变量不变, 模拟公路与铁路运输投资额分别由 0 元/月逐步增加至 40 亿元/月时(步长为 10 亿元/月), 运输环节子系统碳排放量和单位投资所能带来的减碳量变化情况如表 3、表 4 所示, 其中表中数据分别为碳排放量与减碳量。

Table 3. Sub-system carbon emissions of transport links with different investment amounts
表 3. 不同投资额运输环节子系统碳排放量

公路投资/铁路投资	0	10 亿元	20 亿元	30 亿元	40 亿元
0	4.52	4.50	4.47	4.44	4.42
10 亿元	4.50	4.47	4.45	4.42	4.39
20 亿元	4.48	4.45	4.42	4.40	4.37
30 亿元	4.45	4.43	4.40	4.37	4.34
40 亿元	4.43	4.40	4.38	4.35	4.32

Table 4. The amount of carbon reduction per unit investment
表 4. 单位投资所导致的减碳量

公路投资/铁路投资	0	10 亿元	20 亿元	30 亿元	40 亿元
0		0.271	0.271	0.271	0.271
10 亿元	0.237	0.254	0.260	0.262	0.264
20 亿元	0.237	0.248	0.254	0.257	0.260
30 亿元	0.237	0.246	0.251	0.254	0.256
40 亿元	0.237	0.244	0.248	0.252	0.216

由图可知,碳排放总量与投资额呈负相关,当公路与铁路运输从无投资增至投资额均为 40 亿元每月时,运输环节平均碳排放量从 4.52×10^{10} kg 减少至 4.35×10^{10} kg,下降率约为 3.83%,同时,根据表 3 可以看出,当总投资额逐渐增大时,每单位投资所能带来的减碳量也在逐渐减少,说明投资额对于煤炭“公转铁”运输减碳量的影响具有边际效应。在此模拟情景下,当每月公路投资额为 10 亿元,每月铁路投资额为 40 亿元时,单位投资的减碳率相对最好。

4.3.2. 分担率仿真分析

保持其他变量不变,将铁路分担比例从 70% 逐步增加至 90% (步长为 5%),同时将公路分担比例从 30% 逐步减少至 10% (步长为 5%),模拟后煤炭运输全过程碳排放量如图 4、表 5 所示。

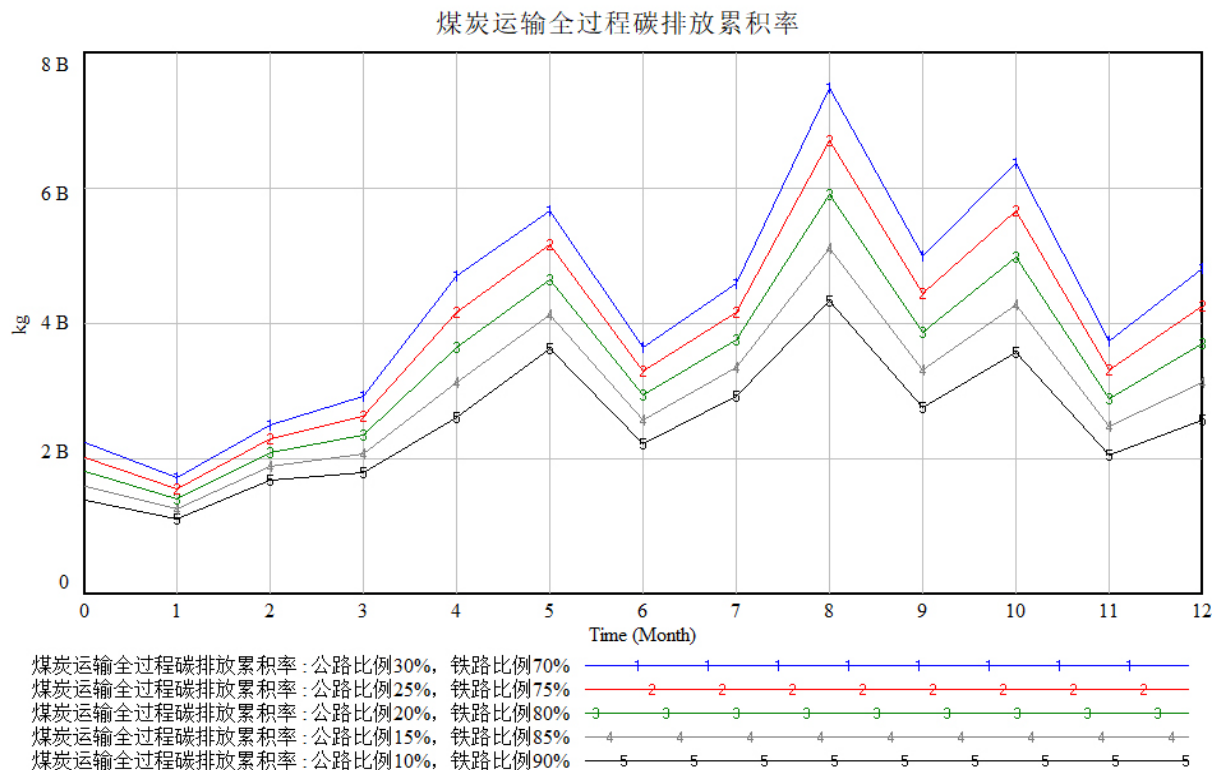


Figure 4. Carbon emissions of different railway and railway sharing rates
图 4. 不同公铁分担率碳排放量

由图可知,当公路运输分担率与铁路运输分担率分别调整至 20%、80%时,月均碳排放量由最初的

4.21×10^9 kg 时下降至 3.35×10^9 kg, 下降率约为 20.7%; 当公路运输分担率与铁路运输分担率分别调整至 10%、90% 时, 月均碳排放量下降至 2.49×10^9 kg, 下降率约为 41.3%。同时, 当铁路分担比例逐步上升时, 每单位转运量所能带来的减碳量在快速减少, 说明调整运输比例对于煤炭“公转铁”运输减碳量的影响具有强烈的边际效应。因此, 根据不同地区情况, 通过适度降低公路运输比重并增加铁路运输比重, 可以有效减少煤炭运输的碳排放量, 具有显著的环境效益和减排潜力。

Table 5. Carbon emissions of the whole process under different sharing ratio of railway and railway

表 5. 不同公铁分担率下全过程碳排放量

公铁分担比	3:7	2.5:7.5	2:8	1.5:8.5	1:9
月均排放量($\times 10^{10}$)	0.42	0.38	0.34	0.29	0.25
转运量($\times 10^7$)	2.16	3.24	4.32	5.40	6.48
单位转运量导致减碳量	194.89	116.72	77.63	54.18	38.55

4.3.3. 发货时间仿真分析

将发货时间分布函数分别设定为 RANDOM NORMAL (1, 7, 4)、RANDOM NORMAL (1, 6, 3.5)、RANDOM NORMAL (1, 5, 3)、RANDOM NORMAL (1, 4, 2.5)、RANDOM NORMAL (1, 3, 2)。全过程碳排放量如表 6 所示。

Table 6. Different delivery time under the whole process carbon emissions

表 6. 不同发货时间下全过程碳排放量

发货时间	1~7 天	1~6 天	1~5 天	1~4 天	1~3 天
年排放量($\times 10^{10}$)	5.05	4.37	3.69	2.78	2.84
月均排放量($\times 10^{10}$)	0.42	0.36	0.31	0.23	0.24

由仿真结果可知, 碳排放总量随着发货时间的增加而呈正向变动。当发货时间缩短, 碳排放量总体呈现下降趋势, 当发货时间从 1~4 天缩短至 1~3 天时, 碳排放总量出现小幅上升情况。具体而言, 当发货时间从 1~7 天缩短至 1~4 天时, 碳排放量从 5.05×10^{10} kg 下降至 2.78×10^{10} kg, 下降率约为 44.94%。当发货时间从 1~7 天缩短至 1~3 天时, 存储环节碳排放量下降至 2.84×10^{10} kg, 下降率约为 43.74%, 较发货时间为 1~4 天的碳排放量上涨 1.2%。因此, 采取优化处理长发货时间订单的方式, 可有效减少煤炭存储过程中的碳排放。同时, 对于发货时间本身较短的订单, 过度追求进一步缩短发货时间并不明智, 这种做法可能会导致运输成本与碳排放量的增加。

4.3.4. 运输时间仿真分析

将运输时间分布函数分别设定为 RANDOM NORMAL (2, 6, 4)、RANDOM NORMAL (2, 5, 3)、RANDOM NORMAL (2, 4, 3)、RANDOM NORMAL (1, 3, 1.5)。存储环节子系统碳排放量如图 5、表 7 所示。

Table 7. Carbon emissions of storage subsystem under different transport times

表 7. 不同运输时间下存储环节子系统碳排放量

运输时间	2~6 天	2~5 天	2~4 天	1~3 天
存储环节年排放量($\times 10^7$)	2.72	3.00	2.99	2.86
月均排放量	0.23	0.25	0.25	0.24

由仿真结果可知, 当运输时间发生变化, 存储环节碳排放量无规律性变化。由于煤炭属于大宗货物,

运输时间通常较为稳定, 因此缩短运输时间对降低煤炭存储碳排放量影响不大。

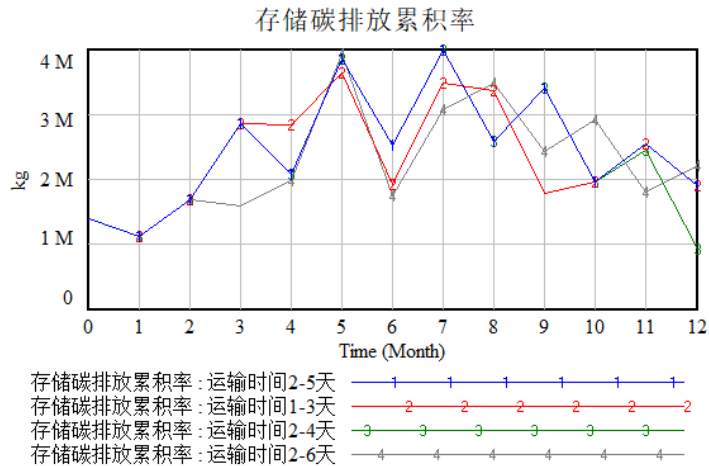


Figure 5. Carbon emissions of storage subsystem under different transport time
图 5. 不同运输时间下存储环节子系统碳排放量

4.4. 情景分析

基于模型仿真与单变量模型仿真分析结果, 提高煤炭铁路运输分担率, 加大运输投资是实现煤炭运输低碳发展的有效举措。同时, 根据陕西省 2024 年政府工作报告, 陕西省“十四五”综合交通运输发展规划等文件以及市场行情, 可设计以下煤炭运输业低碳发展情景。

(1) 基准情景: 不实施任何措施, 此情景下各个指标的数据不变, 作为情景 2 对比的依据;

(2) 优化情景: 煤炭运输铁路比例达到 90%, 公转铁转运率达到 30%, 运输时间控制为 2~5 天, 发货时间控制为 1~6 天, 安全库存为 15 天煤耗约 100,000 吨, 公路运输投资约为 26.98 亿元每月, 铁路运输投资约为 42.96 亿元每月。情景仿真后煤炭全过程碳排放量如图 6、表 8 所示。

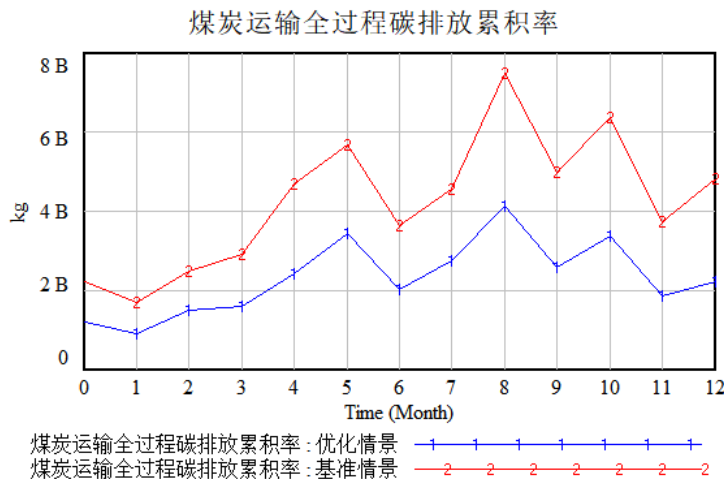


Figure 6. Carbon emissions in the whole process of transportation under different scenarios
图 6. 不同情景下运输全过程碳排放量

由仿真结果可知, 仅对转运率进行优化后减碳率达 40.67%, 仅加大投资额后减碳率达 3.66%, 仅对

发货时间进行优化后减碳率达 13.44%，对各因素均优化后月均全过程碳排放量由基准情景的 4.21×10^9 kg 下降至 19.8×10^9 kg，下降率达 52.95%。因此，提高煤炭运输“公转铁”转运比例是减少煤炭运输碳排放量较为直观的措施，同时可看出各优化因素之间存在一定的联系，对所有因素均优化后的减碳量与分别优化单一因素后的减碳量的总和存在一定的差异。

Table 8. Carbon emissions in the whole process of transportation under different scenarios
表 8. 不同情景条件下运输全过程碳排放量

优化情景	基准情景	转运率	投资额	发货时间	运输时间	优化情景
年排放量($\times 10^{10}$)	5.05	3.00	4.86	4.37	5.05	2.37
月均排放量($\times 10^{10}$)	0.42	0.25	0.41	0.36	0.42	0.20

5. 结论与建议

本文将煤炭“公转铁”运输全过程分为四个子系统，并根据各子系统构建煤炭“公转铁”运输系统动力学模型，系统分析各变量变化对煤炭“公转铁”运输全过程碳排放量的影响，并以陕西省 2024 年政府工作报告等一系列文件为基础，设计优化情景。模拟结果表明：运输环节所产生的碳排放量是碳排放总量较大的重要原因。转运、装卸、存储环节在煤炭运输减碳过程中仍有优化空间。根据单变量仿真分析，促进煤炭运输“公转铁”比例对减少煤炭运输碳排放量具有显著影响，加大公路与铁路运输投资金额、缩短发货时间可对减少碳排放量起到一定作用，而缩短运输时间对减少碳排放量的影响不大。同时，各优化因素之间存在一定的联系，多因素优化后的减碳量与分别优化单一因素后的减碳量的总和存在一定差异。促进煤炭运输“公转铁”比例与加大投资额对煤炭“公转铁”运输减碳量的影响具有边际效应，对于发货时间本身较短的订单，过度追求缩短发货时间会导致碳排放总量的增加。因此，各地区应当权衡经济效益、运输能力与各因素减少碳排放的效果，根据本地实际情况进行统筹考虑，以确定降低煤炭运输碳排放量的有效方针。

参考文献

- [1] 中国煤炭工业协会. 中国煤炭工业改革发展情况通报(2022 年度报告) [R]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2023.
- [2] 范志强. 考虑复杂需求特性的多级煤炭供应链网络优化[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(5): 21-28.
- [3] 李悦. 基于碳排放的煤炭供应链系统优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [4] 刘仕强, 曾蓝雁, 李贤功. 考虑碳排放的弹性煤炭供应链网络设计模型[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2023, 40(1): 34-43.
- [5] Liu, Y., Yang, L., Song, J., Shi, J. and Wang, Q. (2024) Physical Simulation Experiment for Visualizing Pulverized Coal Transport in Propped Fractures. *Applied Sciences*, **14**, Article No. 6114. <https://doi.org/10.3390/app14146114>
- [6] Zhang, J., Chen, J., Ma, Y. and Wei, Z. (2023) Gray Correlation Entropy-Based Influential Nodes Identification and Destruction Resistance of Rail-Water Intermodal Coal Transportation Network. *Applied Sciences*, **14**, Article No. 77. <https://doi.org/10.3390/app14010077>
- [7] Dong, M., Li, Y., Xu, X. and Zha, Y. (2022) A Practical Accessibility Evaluation Method for Port-Centric Coal Transportation Chains: Considering the Environment and Operational Adaptability. *Sustainability*, **14**, Article No. 11619. <https://doi.org/10.3390/su141811619>
- [8] 包兴. 我国煤炭运输成本降低潜力研究[J]. 煤炭经济研究, 2022, 42(3): 22-27.
- [9] 高太光, 王奎, 梅亚丽, 等. 基于系统动力学的煤炭供应链碳减排研究[J]. 科技与经济, 2022, 35(4): 86-90.
- [10] Li, X., Wang, T., Xu, W., Li, H. and Yuan, Y. (2024) Modelling Connected and Autonomous Bus on Dynamics of Mixed Traffic in Partially Connected and Automated Traffic Environment. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **191**, Article 103725. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103725>