

重大突发公共卫生事件下传染性医疗废物应急处置物流网络优化

张梦佳¹, 方春旗², 张小宁¹

¹同济大学经济与管理学院, 上海

²上海随易网络有限公司, 上海

收稿日期: 2022年8月23日; 录用日期: 2022年9月3日; 发布日期: 2022年9月15日

摘要

新冠疫情的爆发暴露出我国医疗废物应急处置能力薄弱这一问题, 完善应急管理预案和医废应急处置设施体系, 是我国传染性疾病爆发期间应急体系完善的重要方向。基于传染性医废逆向物流网络相关理论, 本研究一方面考虑新建临时处理中心来缓冲急剧增加的传染性医废处置压力, 另一方面考虑疫情中心城市与周边进行末端协同, 由此建立了同时考虑成本和风险的传染性医疗废物应急处置优化物流网络模型, 为进一步分析不确定医废产量对优化结果的影响, 在上述模型基础上建立鲁棒优化模型, 并以武汉市疫情爆发初期实际参数作为算例进行验证, 结果表明临时处理中心能够在很大程度上缓解急剧增加的医废造成的风险水平, 决策者需要在预算和成本之间进行权衡, 医废产量的不确定性对风险水平的影响明显, 增加预算有助于降低不确定性对于风险水平的影响。

关键词

传染性医疗废物应急处置, 逆向物流网络优化, 多目标优化, 鲁棒优化, 应急物流, 跨域协同

Optimization of Logistics Network for Emergency Disposal of Infectious Medical Waste during Outbreak

Mengjia Zhang¹, Chunqi Fang², Xiaoning Zhang¹

¹School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

²Shanghai Suiyi Network Co., Ltd., Shanghai

Received: Aug. 23rd, 2022; accepted: Sep. 3rd, 2022; published: Sep. 15th, 2022

文章引用: 张梦佳, 方春旗, 张小宁. 重大突发公共卫生事件下传染性医疗废物应急处置物流网络优化[J]. 管理科学与工程, 2022, 11(3): 311-327. DOI: 10.12677/mse.2022.113039

Abstract

The outbreak of COVID-19 has exposed the problem that China's medical waste emergency disposal capacity is weak. Improving the emergency management plan and the medical waste emergency disposal facility system is an important direction to improve the emergency system during the outbreak of infectious diseases in China. Based on the relevant theory of the reverse logistics network of infectious medical waste, this study, on the one hand, considers the construction of a new temporary treatment center to cushion the sharply increased pressure of the disposal of infectious medical waste, on the other hand, considers the end-to-end coordination between the epidemic center city and the surrounding areas, so as to establish an optimal logistics network model for the emergency disposal of infectious medical waste, which considers both cost and risk. In order to further analyze the impact of uncertain medical waste output on the optimization results, Based on the above model, a robust optimization model is established and verified by taking the actual parameters in the early outbreak of the epidemic in Wuhan as an example. The results show that the temporary treatment center can alleviate the risk level caused by the sharp increase in medical waste to a great extent. Decision makers need to weigh the budget and cost. The uncertainty of medical waste production has a significant impact on the risk level, Increasing the budget will help reduce the impact of uncertainty on the level of risk.

Keywords

Emergency Disposal of Infectious Medical Waste, Optimization of Reverse Logistics Network, Multi-Objective Optimization, Robust Optimization, Emergency Logistics, Cross Domain Collaboration

Copyright © 2022 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

在重大突发公共卫生事件中, 医疗废物一方面表现出短时间内大量增加、传染性更强、产生源集中、成分复杂等特点; 另一方面其的妥善收集、转运、安全处置作为防控疫情的最后一道防线, 在阻断病毒传播中占据重要地位[1], 因此需要医疗废物环境管理体系具备充足处置能力及快速应急响应能力。2003年“非典”爆发后, 我国在医废应急体系建设上的短板初现, 为此颁布了《医疗废物管理条例》(2003年)和《全国危险废物和医疗废物处置设施建设规划》(2004年), 对医废的处置原则(集中无害化)和处置设施布局做出了规定和建议[2][3]。

然而在这次新冠疫情爆发初期, 我国各地区医疗废物产量显著增加。根据生态环境部通报的数据, 截至2020年4月18日, 全国医疗废物处置能力达到6100.0吨/天, 相比疫情前增加了1197.2吨/天。2020年1月20日到2020年9月1日, 全国累计处理医废28.0万吨。疫情前, 湖北省医废处置能力是180吨/天, 武汉市不足50吨/天, 疫情期间达到247吨/天, 原有处置能力并不能负荷。在这种情况下, 国家环境总局紧急颁布《新型冠状病毒感染的肺炎疫情医疗废物应急处置管理与技术指南(试行)》, 对疫情期间剧增的传染性医疗废物的处置, 给出了应急方案和建议, 与此同时全国各地纷纷支援武汉, 几乎举全国之力, 将这次对抗疫情的战役打赢。

事实上,我国大部分区域医疗废物处理能力的冗余水平均不能承受此期间的冲击负荷,必然需要采用应急处理方法及时处置疫情期间产生的医疗废物[4]。新冠疫情的爆发暴露出我国的医疗废物处置能力薄弱这一问题,具体体现在应急体系不完善、应急备份(医废处置单位)不足、跨域协同存在壁垒、协同处置能力有限和处置设施负荷率高(能力不足)五个问题[5]。针对以上问题,我国传染性疾病预防期间应急体系完善的方向应该包含以下五点:完善应急管理预案、完善医废应急处置设施体系、合理采用应急处理技术、建立医废应急联防联控机制、健全医废应急储备体系[6]。针对完善应急管理预案以及完善医废处置设施体系,结合新冠的经验,又可以具体细化为为疫情期间的传染性医废设立储存缓冲区域,医废处置上区域协同、与工业危险废物处置设施协同、医废消毒设施扩容、与生活垃圾焚烧设施协同[7]。

自2020年2月新冠肺炎疫情发生以来,由10个国家行政部门针对医疗废物发布工作方案,这在我国固体废物处置管理中尚属首次。《方案》明确了医疗机构、医疗废物处理机构以及各省、市行政机关如何进一步加强管理、进一步保障人民群众身体健康和环境安全。《方案》指出,在2020年每个地级以上城市及2022年6月底前每个县(市)要建设医疗废物收集、转运处置体系。

2. 研究问题

2.1. 研究综述

在废物处置物理网络优化问题上,Budak等人[8]以总成本最小为目标建立了一个医疗废物回收网络的混合整数规划数学模型以解决土耳其医疗机构的废物处置问题。Mantzaras等人[9]建立了一个最小化传染病废物管理网络成本的优化模型。该模型的解决的主要问题是确定转运站和处理中心的最佳位置、相关容量以及收集车辆的最佳数量、容量和运输路线。Kargar等人[10]建立了考虑可持续选择处理技术医疗废物逆向物流的数学模型。Yu等人[11]评估了不确定性对目标函数值和设置选址的影响,建立流行病爆发条件下传染性医疗废物管理网络的混合整数数学模型以实现风险与经济效益之间的平衡,并用新冠案例来验证了模型的有效性。

在此之前,我国关于废物处理的物流网络优化设计的研究虽然起步较晚,但是也有不少成果。何波等人[12]针对城市固体废弃物中转站和处理站的两级选址问题,同时考虑了总的建设成本最小和尽可能满足居民的意愿,建立了一个多目标规划模型来确定中转站和处理站的位置;黄铮[13]针对多级废弃物回收网络建立了成本最优化的最优路径和选址问题的整数规划模型,并设计算法通过实例验证了模型的有效性;付小勇等人[14]考虑垃圾回收数量的不确定性,建立了模糊环境下的城市垃圾回收物流网络的模糊约束机会规划模型,并通过算例验证了模型的有效性;贺政纲等人[15]分析了危险废弃物物流网络构建的各个不确定因素,构建了基于成本和风险最优的危险废弃物物流网络多目标多周期优化模型,并通过算例验证了模型及算法的有效性。

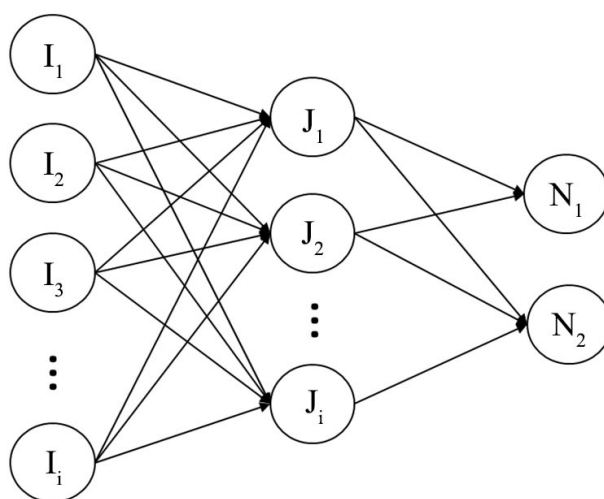
国内外虽然针对危险废物网络优化问题已经陆续开展了研究,但国内关于新冠疫情期间医疗废物管理优化的研究为数不多。总体来说所描述的网络是简化的医疗废物逆向物流网络,具体表现为以下三个方面的:一是大部分只考虑了某一类设施的选址,比如处理中心或者回收中心;二是在选址、分配、运输路径三者往往不会兼顾;三是鲜有文献从应急的角度去建立网络优化模型,尤其在境内,只有少数研究从管理体系的角度阐述了建立医疗废物应急管理体系的必要性和紧急性。从新冠疫情的爆发来看,本文认为进行医疗废物应急网络优化是必要且意义重大的。

2.2. 问题描述

疫情期间传染性医疗废物的处置流程包括分类、隔离、最小化、集装化、颜色编码、标签标牌、交接、运输、存储、处理、最终处置[16]。

以传染性医废处置流程的收集、运输、存储和处置过程构成的物流网络(如下图 1 所示)中的总成本和总风险最小为目标,在医废由产生中心运输到最终处置之间设置临时处理中心,以期达到为传染性医废提供缓冲区域和消毒设施扩容的目的,同时在末端处置设施上考虑区域协同处置,解决传染性疾病爆发初期传染性医疗废物的应急处置问题,为完善应急预案进行探索。所以本研究要解决的问题包含以下方面:

- 1) 临时处理中心的选址。
- 2) 医废收集点到临时处理中心、临时处理中心到最终处置设施之间的废物量的分配。
- 3) 末端处置设施主体间跨域协同。
- 4) 成本和风险的同时优化。



I: 医废产生中心 J: 临时处理中心 N: 焚烧中心

Figure 1. Network structure of infectious medical waste emergency disposal

图 1. 传染性医废应急处置网络结构

3. 模型设计

3.1. 传染性医疗废物应急物流网络优化模型

3.1.1. 模型假设

针对以上处置过程的描述以及本研究要解决的问题,现提出如下假设:

- 1) 传染性医疗废物的产量是基于已有的预测数据。
- 2) 风险来自于三个过程:感染性废物产生中心向处理中心运输过程、在处理中心处理进行处理的过程、处理中心到处置设施的运输过程。第一项和第三项与运输距离、人口暴露(人口密度)以及传染概率呈正相关,同时第三项的传染概率低于第一项;第二项与处理中心周围的人口暴露以及传播概率呈正相关。
- 3) 已知 n 个地级市之间已经协定协同处置废物,且各自处置能力已知且有限。
- 4) 模型考虑的是 n 个协同主体中的其中一个疫情严重的地级市的传染性医疗废物的处置网络优化。

3.1.2. 符号说明

模型涉及到的指代符号、参数及决策变量如下表 1:

Table 1. Description table of relevant parameters and variables of the model**表 1.** 模型相关参数及变量说明表

I	传染性医废产生集合, $i \in I$, $I = \{1, 2, 3, \dots, i, \dots\}$
J	临时处理中心候选点集合, $j \in J$, $J = \{1, 2, 3, \dots, j, \dots\}$
N	(焚烧)处置设施集合, $n \in N$, $N = \{1, 2, 3, \dots, n, \dots\}$
T	时期, $t \in T$, $T = \{1, 2, 3, \dots, t, \dots\}$
PI_{ij}	第 i 个传染性医废产生中心向第 j 个临时处理中心运输过程中发生意外风险的概率
PJ_{jn}	第 j 个临时处理中心向第 n 个焚烧设施运输过程中发生意外风险的概率
R_i	第 i 个传染性医废中心发生意外风险的概率
R_j	第 j 个临时处理中心发生意外风险的概率
ρ'_{ij}	第 i 个传染性医废向第 j 个临时处理中心之间运输路径上的人群暴露水平
ρ''_{jn}	第 j 个临时处理中心向第 n 个焚烧设施之间运输路径上的人群暴露水平
ρ_i	第 i 个传染性医废产生中心周围的人群暴露水平
ρ_j	第 j 个临时处理中心周围的人群暴露水平
CJ_j	第 j 个临时处理中心的容量(最大处理能力)
λ_j	第 j 个临时处理中心的最低利用率
CN_n	第 n 个焚烧设施的最大处置能力
D_{ij}	第 i 个传染性医废与第 j 个临时处理中心之间的距离(米)
S_{jn}	第 j 个临时处理中心与第 n 个焚烧设施之间的距离(米)
W_{it}	第 i 个传染性医废在 t 时期的废物产量
C_1	传染性医废的单位废物收集成本
C_2	传染性医废与临时处理中心之间的单位运输成本
C_3	临时处理中心与焚烧设施之间的单位运输成本
C_4	临时处理中心的建设成本
C_5	临时处理中心的固定运营成本
C_6	临时处理中心的单位处理成本
C_7	焚烧设施的单位焚烧成本
X_j	决策变量, 如果第 j 个临时处理中心被建立则为 1, 否则为 0
X_{jt}	决策变量, 在 t 时期第 j 个临时处理中心被使用则为 1, 否则为 0
UI_{it}	决策变量, 在 t 时期第 i 个医废产生中心未被收运的医废量
UI_{jt}	决策变量, 在 t 时期第 j 个临时处理中心未被运往焚烧设施的医废量
ZI_{ijt}	决策变量, 在 t 时期第 i 个传染性医废向第 j 个临时处理中心的运量
Z_j	决策变量, 在 t 时期第 j 个临时处理中心的处理量
ZJ_{jnt}	决策变量, 在 t 时期第 j 个临时处理中心向第 n 个焚烧设施的运量

3.1.3. 数学模型

$$\begin{aligned} \min f_1 = & \sum_t \sum_i R_i \times \rho_i \times UI_{it} + \sum_i \sum_t \sum_j PI_{ij} \times \rho'_{ij} \times ZI_{ijt} \\ & + \sum_t \sum_j R_j \times \rho_j \times UJ_{jt} + \sum_i \sum_t \sum_j PJ_{jn} \times \rho''_{jn} \times ZJ_{jnt} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)的目标是使传染性医疗废物回收网络的传染风险最小。第一项是医废产生中心的风险，第二项是从废物产生中心到临时处理中心的风险，第三项是临时处理中心的风险，第四项是从临时处理中心到焚烧设施的风险。

$$\begin{aligned} \min f_2 = & \sum_i \sum_t C_1 \times W_{ii} + \left(\sum_t \sum_j X_j \times C_4 + \sum_t \sum_j Y_{ij} \times C_5 + \sum_t \sum_j Z_{ij} \times C_6 \right) \\ & + C_2 \times \sum_i \sum_t \sum_j ZI_{ij} \times D_{ij} + C_3 \times \sum_n \sum_t \sum_j ZJ_{ijn} \times S_{jn} + \sum_n \sum_t \sum_j ZJ_{ijn} \times C_7 \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)目标是使传染性医疗废物回收网络的总成本最小。第一项是废物收集成本；第二项、第三项和第四项是临时处理中心的建设成本、运营成本和处理成本；第五项是废物产生中心向现临时处理中心运输的成本；第六项是临时处理中心向焚烧设施运输的成本；第七项是焚烧成本。

$$\text{s.t. } UI_{(t-1)i} + W_{ii} = \sum_t \sum_j ZI_{ij} + UI_{ii}, \quad \forall t, i \quad (3)$$

$$\sum_t W_{ii} = \sum_t \sum_j ZI_{ij}, \quad \forall i \quad (4)$$

$$UJ_{(t-1)j} + \sum_i ZI_{ij} = Z_{ij}, \quad \forall t, j \quad (5)$$

$$Z_{ij} = UJ_{ij} + \sum_n ZJ_{ijn}, \quad \forall t, n \quad (6)$$

$$\lambda_j \times CJ_j \times X_j \times Y_{ij} \leq Z_{ij} \leq CJ_j \times X_j \times Y_{ij}, \quad \forall t, j \quad (7)$$

$$\sum_j ZJ_{ijn} \leq CN_n, \quad \forall t, n \quad (8)$$

$$X_j, Y_{ij} \in [0, 1], \quad \forall t, j \quad (9)$$

$$UI_{ii}, UJ_{ij}, ZI_{ij}, Z_{ij}, ZJ_{ijn} \geq 0, \quad \forall t, i, j \quad (10)$$

式(3)至(8)为流量约束，式(9)和式(10)为变量约束。

3.2. 求解方法

多目标规划问题的解是一个含有 pareto 最优解的集合，因此很多研究会将其转化为单目标优化问题以得到唯一最优解，常见的转化方法有线性加权法、目标规划、TOPSIS (优劣解距离法)法和 epsilon-约束法。epsilon-约束法简单易行，能够保证次要目标取值在合理范围内的前提下，主要目标取尽可能好的值，考虑到本研究的两个目标的量纲不同以及应急属性，采用 epsilon-约束法将上述多目标问题转化为单目标规划问题。基本步骤如下：

第一步：确定主要目标： f_1 。

第二步：求最优值 f_2 ，将 $f_2 \geq \varepsilon$ 作为约束条件，其中 $\varepsilon \geq f_2^*$ ，得到如下模型：

$$F_1 = \min f_1 \quad (11)$$

$$\text{s.t. } f_2 \geq \varepsilon \quad (12)$$

式(3)-(10)。

3.3. 不确定医废产量的鲁棒优化模型

由于疫情控制受到多方因素的影响，突发疫情期间的传染性医废的产量具有不确定性，鲁棒优化不仅可以解决带有不确定参数的优化问题，还无需考虑参数的概率分布或者模糊隶属函数。不确定问题优

化的鲁棒优化解指的是在最快不情定情境下问题的最优解[17]。对于产量 W_{ii} ，利用基数不确定集合[18]描述其不确定性水平：

$$U = \left\{ W_{ii} : \left| \frac{W_{ii} - \hat{W}_{ii}}{\overline{W}_{ii} - \underline{W}_{ii}} \right| \leq \Gamma_{ii} \right\} \quad (13)$$

U 为医废产量 W_{ii} 的不确定集合， \hat{W}_{ii} 为预测值， \overline{W}_{ii} 和 \underline{W}_{ii} 分别为区间的上界和下界， Γ_{ii} 代表了其不确定水平， $\Gamma \in [0,1]$ ，从 0 到 1 不确定水平逐渐增大。由此得到约束条件式(4)变换后的鲁棒对等式：

$$\sum_i \sum_j ZI_{ij} = \sum_i \left[\hat{W}_{ii} + \Gamma_{ii} (\overline{W}_{ii} - \underline{W}_{ii}) \right] \quad (14)$$

于是上述模型变为：

$$F_1 = \min f_1 \quad (15)$$

s.t.式(3)、(5)-(11)、(14)。

4. 算例分析

4.1. 数据来源及参数设置

武汉市作为已知的首个官方公布数据的全球疫情爆发的中心点，是新冠疫情最严重的城市。本研究以武汉市为研究对象进行实证分析，对应的时间是 2020 年 1 月 1 日至 3 月 1 日期间传染性医废剧烈增长的场景，本研究的规划周期为 48 小时，根据我国防疫要求，与新冠相关的医废在医院的存储时间不得超过 24 小时，在此将 48 小时分为 4 个时期，每个时期 12 小时。

结合实际情况，在此期间的传染性医废产生中心包括武汉所有接收新冠病人的现有医院、临时医院、方舱医院、火神山和雷神山共计 40 所医院。传染性医废的产量按照用于诊治新冠患者的床位估算，相较于非疫情情况下武汉市每个床位 0.6 kg/天的产量，疫情期间需要消耗更多的医疗资源[19]，平均每个床位的医废产量为 2.5 kg/天，其单位收集成本为 0.8 元/kg。假设各时期传染性医废的变化率分别为 1.10, 0.95, 1.00 和 0.90，各传染性医废产生中心新冠病人开放床位数(见附录 A)由武汉市卫生委员会 2020 年 2 月 5 日公布的新型冠状病毒临床病床报告获取，各中心各时期的传染性医废产量见附录 B。

武汉的 13 个行政区中，包含 7 个中心城区和 6 个郊区，综合考虑运输风险、储存和转运风险，以及公平性因素，结合《医疗废物处理处置污染控制标准》[20]有关要求，本研究在 6 个郊区各设置一个临时处理中心候选点，6 个地点坐标分别是蔡甸区 J_1 (114.09, 30.54)、汉南区 J_2 (114.08, 30.15)、江夏区 J_3 (114.32, 30.32)、新洲区 J_4 (114.84, 30.85)、黄陂区 J_5 (114.38, 30.88)、东西湖区 J_6 (114.07, 30.67)，临时处理中心的各参数参考生活垃圾转运中心，其处理单位医废所需的成本参考消毒技术的成本。与武汉(N_0)协同处置医废的候选城市为孝感市 N_1 、咸宁市 N_2 、黄冈市 N_3 ，这四个城市具有资质的医疗废物处置中心均只有一个，设施地址分别是武汉市汉阳区永安堂锅顶山、孝感市孝南区交通路 385 号锦华苑小区、咸宁市咸安区贺胜桥镇 808 库和黄冈市黄州区陈策楼镇张家铺村，考虑到有本地医废处置需求，将其最大处理能力的一半作为用于协同处置武汉医废的上限，该部分数据由实际调研获取。临时处理中心及焚烧设施相关参数如下表 2 和表 3 所示。

Table 2. Parameters of temporary processing center

表 2. 临时处理中心参数

建设成本 C_4 (元)	运营成本 C_5 (元/时期)	处理成本 C_6 (元/千克)	容量(千克/时期)
465,000	4654	1.40	7500

Table 3. Parameters of incineration facilities
表 3. 焚烧设施参数

焚烧设施	N_0	N_1	N_2	N_3
能力(千克/时期)	15000	7500	2500	2500
焚烧成本 C_7 (元/千克)	1.12	1.12	1.12	1.12

上述三类节点构成了如下图 2 的传染性医废逆向物流优化网络，节点之间的运输距离

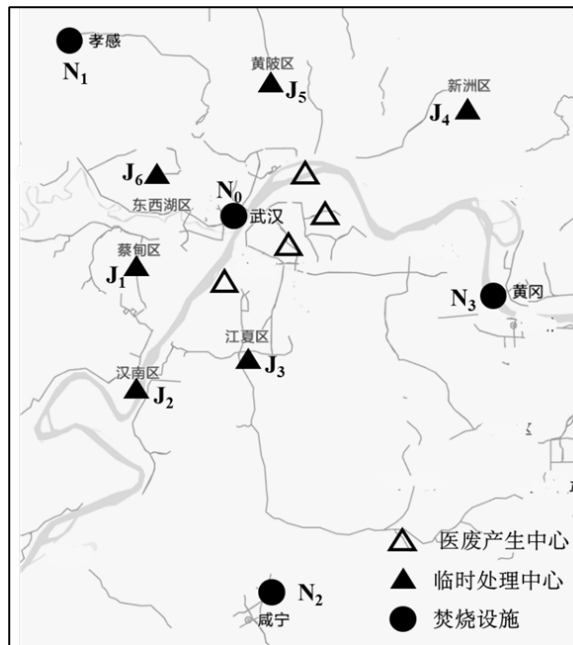


Figure 2. Layout diagram of infectious medical waste recycling network nodes

图 2. 传染性医废回收网络节点布局示意图

(见附录 C 和附录 D)通过高德地图开发者支持平台 Web 服务 API 的路径规划——货车路径规划接口获取，驾车选择策略设置为“避免拥堵”，车辆大小为“中型车”。单位运输费用为 0.000035 元每千克米[21]。

结合实际及专家意见，各医废产生中心发生风险的概率与医院等级相关，在此将三甲医院的风险概率设为 0.003，其余医院为 0.004，临时医院为 0.007，临时处理中心为 0.002 [22]。各节点的人群暴露水平由式(16) [22]计算得到：

$$\rho = 9\pi \times Pe \tag{16}$$

Pe : 每平方公里的人口数量。

各个运输路段的风险发生的概率的计算参考式(17) [22]：

$$P = 0.36 \times d \times 10^{-9} \tag{17}$$

P : 风险发生概率；

d : 行驶距离(米)。

由于本研究中的临时处理中心会对传染性医废进行消毒处理，其后续运输的风险会减小。因此在由

临时处理中心运往焚烧设施的路段上,将上述参数 0.36 设置为 0.15。各运输路段的人群暴露水平由式(18)计算得到:

$$\rho' = 2 \times Pe \times d \times 10^{-3} \quad (18)$$

上述各节点及运输路段涉及到的人口密度可参照国家统计局 2020 统计年鉴:2019 年年末武汉市总人口 906.40 万人,总面积 8569.15 平方公里,平均人口密度 1058 人/平方公里,在此将该数据设定为各个运输路段的人口密度。对于传染性医废产生中心,其周围的人口密度与该设施的医疗水平相关,因此需要在平均水平基础之上为其设定权重,按照医院分类,将三甲医院、普通医院、临时医院的权重分别设定为 2.0、1.5 和 1。对于临时处理中心,按照各区平均人口密度设定其周围人口密度, J_1 到 J_6 分别是(人每平方公里):618、449、419、588、404、1026。由以上数据得到各节点及节点间人群暴露水平见附录 E 和附录 F。

本研究在配置为 AMD Ryzen 7 处理器,频率 1.8 GHz,可用内存 7GB 的个人计算机上使用 Java 平台编码,并调用 CPLEX 进行求解,所有算例均可在 1min 内获取最优解。

4.2. 结果分析

4.2.1. 多目标分析

按照上述 epsilon-约束法,得到风险和成本的最优值分别为 282352.48、2461946.41 元。取 16 个具有代表性的不同 ε 值,得到如下表 4 所示的方案。可以看到风险水平整体随着预算的增大而减小的,但是变化趋势有以下特点:

Table 4. Solution results based on epsilon constraint method

表 4. 基于 epsilon-约束法的求解结果

序号	ε (万元)	f_1	选址个数	总成本 (万元)	U_{it}/U_{ij} (kg)			
					$t=1$	$t=2$	$t=3$	$t=4$
1	247.19	1845086.5	4	247.19	1751/1141	296/1343	936/4198	0/30,000
2	248.19	1238225.8	4	248.19	392/2500	0/1639	0/2564	0/27,429
3	249.19	951525.8	4	249.19	392/2500	0/1639	0/1784	0/22,744
4	251.19	588345.2	4	251.19	392/2500	0/1639	0/1768	0/11,176
5	255.19	341840.2	4	255.13	392/2500	0/1639	0/1768	0/0
6	260.19	341840.2	4	255.13	392/2500	0/1639	0/1768	0/0
7	270.19	341840.2	4	255.13	392/2500	0/1639	0/1768	0/0
8	285.19	341840.2	4	255.13	392/2500	0/1639	0/1768	0/0
9	300.19	341840.2	4	255.13	392/2500	0/1639	0/1768	0/0
10	301.19	324607.8	5	301.19	0/2892	0/1639	0/1768	0/1957
11	301.39	313219.0	5	301.39	0/2982	0/1639	0/1768	0/1434
12	301.59	303343.0	5	301.59	0/2982	0/1639	0/1768	0/965
13	301.79	293467.0	5	301.79	0/2982	0/1639	0/1768	0/495
14	301.99	283591.1	5	301.99	0/2982	0/1639	0/1768	0/26
15	302.20	282352.5	5	302.14	0/2982	0/1639	0/1768	0/0
16	302.30	282352.5	5	302.14	0/2982	0/1639	0/1768	0/0

1) 预算从 247.19 万元增加 8 万元, 风险降低了 81.47%, 这是由于在预算不足的情况下, 较多医废在医院和临时处理中心未被及时运送到下一个节点。随着预算的增加, 这些未及时被处理的医废能够尽快运送到临时处理中心和焚烧中心, 因而风险水平会大幅度降低。这也正是本研究建立临时处理中心和协同另外三个市进行医废处理的初衷, 及时有效的处理疫情下的传染性医废, 能够在很大程度上降低因其产生的风险水平。

2) 预算从 255.19 万元到 300.19 万元, 配送方案及风险水平未发生任何变化。这是由于在该 45 万元区间内, 模型的最优解实现一定的收敛性, 但是第一周期医院仍然存在未被及时运走的医废; 继续增大预算直至足够新建一个临时处理中心(成本为 46.5 万元)时, 医院的医废均被及时处理, 风险又开始降低, 预算从 301.19 万增加 1.01 万元到 302.20 万元, 风险降低了 13.02%, 达到最小值, 变化趋势明显。临时处理中心的医废也逐步实现清零。这说明建立新的临时处理中心对于降低风险有重要意义。

临时处理中心缓冲作用分析: 通过以上多目标分析可以看到, 在预算从低到高的整个变化过程中, 临时处理中心始终发挥着应急缓冲的作用, 在预算不充足的情况下, 临时处理中心的缓冲作用效果更加明显。这种缓冲作用一方面表现在及时运走医院产生的医废以降低风险水平, 另一方面体现在缓解焚烧设施能力不足引发的潜在风险

跨域协同效用分析: 首先, 武汉医废的天产量是 55 吨左右, 而自身的医废处理能力是远远不足的, 如不运送到其他城市, 那么必然在医院和临时处理中心堆积, 由上述求解结果的分析可知, 医废在各节点尤其医院的挤压, 会造成风险水平的大幅上升, 又或者为了降低风险水平, 需要大幅度提升预算建立更多的临时处理中心, 因此进行跨域协同是必要且具有重要意义的。

4.2.2. 不确定产量鲁棒分析

针对医废产量的不确定性, 结合以上分析数据, 设定 $\varepsilon = 303$ 万元, W_{i1} 分的波动范围依次增大 0.25% 至 2%, 模型的求解结果如下表 5 所示。

Table 5. Solution results under different robustness levels

表 5. 不同鲁棒水平下求解结果

	鲁棒水平								
	0%	0.25%	0.5%	0.75%	1%	1.25%	1.5%	1.75%	2%
f_1 (万)	28.25	29.30	30.37	31.43	34.69	37.74	40.08	44.13	46.98
总成本(万元)	302.1	302.4	302.7	302.9	303.0	303.0	303.0	303.0	303.0
选址个数	5	5	5	5	5	5	5	5	5
处理成本(万元)	16.16	16.26	16.36	16.45	16.54	16.65	16.75	16.83	16.95
运输成本 1 (万元)	9.58	9.60	9.63	9.65	9.68	9.91	9.93	9.92	10.12
运输成本 2 (万元)	15.04	15.13	15.21	15.30	15.23	14.55	14.44	14.37	13.69
焚烧成本(万元)	12.22	12.25	12.28	12.31	12.32	12.17	12.14	12.11	11.99

医废产量在 0% 到 2% 之间波动时, 选址方案始终不变, 这是预算有限有关; 风险水平增大了 66.3%, 主要是由产量的波动使得医院和临时处理中心未被及时处理的医废增大导致的; 处理成本缓慢增大, 运输成本 1 (医院到临时处理中心的运输成本) 逐渐增大, 运输成本 2 (临时处理中心到焚烧设施的运输成本) 逐渐减小, 均是由于医废在医院滞留的风险高于在临时处理中心的风险导致的; 焚烧成本先增大后减小是受处置能力限制所致。各指标的变化趋势见下图 3 所示。

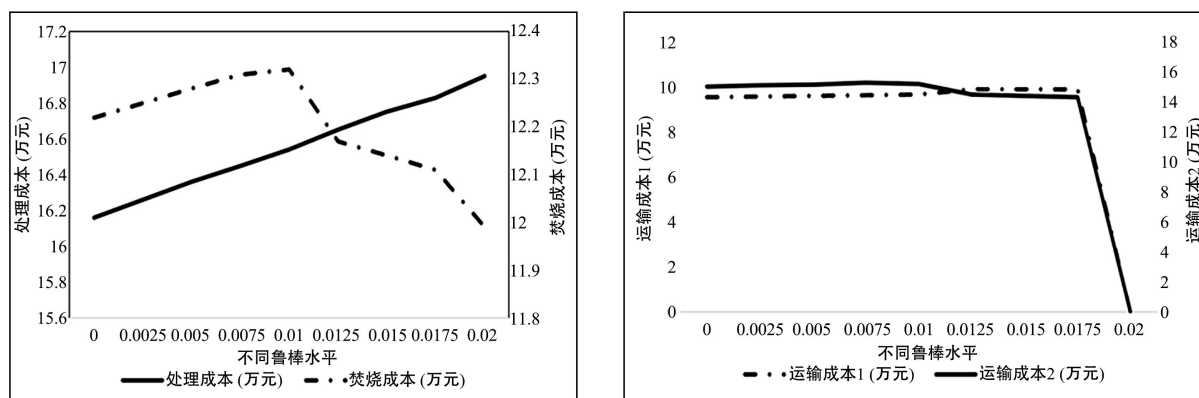


Figure 3. Variation trend of costs under different robustness levels

图 3. 不同鲁棒水平下各成本变化趋势

5. 结论

新冠疫情的爆发暴露出我国医疗废物应急处置能力的薄弱,为进一步完善重大突发公共卫生事件应急管理预案,解决短时间内剧增的医废处置需求,同时考虑经济性与风险性,本研究提出建立临时处理中心和跨域协同处置的医废应急处置物流网络优化模型。并以武汉作为算例进行实证分析,结果表明:建立临时处理中心对于应对传染性医疗废物的爆发式增加有显著作用。这种作用体现在缓冲转运和降低风险两个方面;适合提高预算,对于降低医废造成的风险作用巨大,由于应急考虑,应该尽可能提高预算以控制风险;跨域运输医废能够有效应对疫情严重地区的医废处理能力不足,因此如何打破区域间壁垒,进行协同处理是作为管理决策者需要解决和考虑的有效应急举措。

本研究还存在许多有待进一步优化的空间。首先医废的产量的估计过于简单,没有考虑其他不确定因素对于医废产量的影响。其次,跨域协同处置作为本研究的假设在一定程度上脱离实际,一方面在模型的建立中,没有考虑该假设实际成立的困难(法律等),另一方面只考虑武汉该主体的经济与风险目标,并未分析其对协同主体的经济与风险影响,虽然这在武汉作为疫情重灾区的背景下是合理的,但综合考虑各个主体的利益,才能使该方案更具有可持续性和实用性。以上两点均是本研究下一步工作需要考虑的重点。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(72021002、71901163)。

参考文献

- [1] 周小莉,郭春霞,时翔明,等.重大疫情期间医疗废物应急处置中的问题及建议[J].环境工程学报,2020,14(7):1705-1709.
- [2] 中华人民共和国国务院.医疗废物管理条例:第380号令[Z/OL].
http://www.gov.cn/banshi/2005-08/02/content_19238.htm,2020-03-16.
- [3] 国家环境保护总局.关于印发《全国危险废物和医疗废物处置设施建设规划》的通知:环发[2004]16号[Z/OL].
http://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172261.htm,2020-03-16.
- [4] 邵立明,吕凡,彭伟,章骅,何晶晶.重大传染病疫情期间生活源废物应急管理方法及技术探讨[J].环境卫生工程,2020,28(2):1-5.
- [5] 刘双柳,程亮,张箐,等.医疗废物环境应急管理现状研究[C]//中国环境科学学会.2020中国环境科学学会科学技术年会论文集(第二卷).2020:2547-2551.
- [6] 程亮等,张箐,陶亚,刘双柳.我国医疗废物应急处置管理讨论与建议[J].环境保护科学,2021,47(3):13-16,23.

- [7] 新型冠状病毒感染的肺炎疫情医疗废物应急处置管理与技术指南[试行] [Z/OL]. 生态环境部, 2020. http://www.gov.cn/xinwen/2020-01/29/content_5472997.htm
- [8] Budak, A. and Ustundag, A. (2017) Reverse Logistics Optimisation for Waste Collection and Disposal in Health Institutions: The Case of Turkey. *International Journal of Logistics Research and Applications*, **20**, 322-341. <https://doi.org/10.1080/13675567.2016.1234595>
- [9] Mantzaras, G. and Voudrias, E.A. (2017) An Optimization Model for Collection, Haul, Transfer, Treatment and Disposal of Infectious Medical Waste: Application to a Greek Region. *Waste Management*, **69**, 518-534. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.037>
- [10] Kargar, S., Paydar, M.M. and Safaei, A.S. (2020) A Reverse Supply Chain for Medical Waste: A Case Study in Babol Healthcare Sector. *Waste Management*, **113**, 197-209. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.052>
- [11] Yu, H., Sun, X., Solvang, W.D. and Zhao, X. (2013) Reverse Logistics Network Design for Effective Management of Medical Waste in Epidemic Outbreaks: Insights from the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Outbreak in Wuhan (China). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**, Article 1770. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051770>
- [12] 何波, 杨超, 杨珺. 废弃物逆向物流网络设计的多目标优化模型[J]. 工业工程与管理, 2007(5): 43-46.
- [13] 黄铮. 废弃物回收逆向物流网络优化设计[J]. 系统工程, 2009, 27(7): 49-53.
- [14] 付小勇, 刘诚, 黄玉兰. 模糊环境下的城市生活垃圾逆向物流网络设计[J]. 运筹与管理, 2009, 18(1): 30-33, 41.
- [15] 贺政纲, 邹晔, 叶立鹏. 不确定环境下危险废弃物物流网络优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(5): 114-119.
- [16] Samanlioglu, F. (2013) A Multi-Objective Mathematical Model for the Industrial Hazardous Waste Location Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, **226**, 332-340. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.019>
- [17] 张玲, 王晶, 黄钧. 不确定需求下应急资源配置的鲁棒优化方法[J]. 系统科学与数学, 2010, 30(10): 1283-1292.
- [18] Bertsimas, D. and Sim, M. (2004) The Price of Robustness. *Operations Research*, **52**, 35-53. <https://doi.org/10.1287/opre.1030.0065>
- [19] Xinhuanet. When the Shortage of Medical Supplies Can Be Relieved? 2020-02-05. http://www.xinhuanet.com/politics/2020-02/01/c_1125518527.htm
- [20] 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB39707-2020 医疗废物处理处置污染控制标准[S]. 2020. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/gthw/gtfwvrkzbz/202012/W020201218701792502812.pdf>
- [21] Zhao, J., Huang, L., Lee, D.-H. and Peng, Q. (2016) Improved Approaches to the Network Design Problem in Regional Hazardous Waste Management Systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **88**, 52-75.
- [22] Zhao, J. and Huang, L. (2019) Multi-Period Network Design Problem in Regional Hazardous Waste Management Systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**, 2042. <https://doi.org/10.3390/ijerph16112042>

附录

Appendix A. Number of open beds for Covid-19 patients in Wuhan infectious medical waste generation center

附录 A. 武汉市传染性医废产生中心新冠病人开放床位数(个)

医院	床位数	医院	床位数
武汉金银潭医院	720	武汉市第六医院	430
武汉市第五医院	420	黄陂区中医医院	394
武汉市第五医院西院区	319	江夏区中医院	260
武汉市中心医院(后湖分院)	515	武汉市新洲区中医院	200
武汉市第三医院(光谷分院)	300	武汉紫荆医院	288
武汉同济医院	536	武汉市汉南区中医医院	26
武汉协和医院西院区	360	蔡甸区妇幼保健院	242
武汉大学人民医院东院区	420	武汉火神山医院	1000
湖北省中西医结合医院	187	武汉雷神山医院	1500
武汉科技大学附属天佑医院	265	武汉体育馆(通口区)	305
武汉市中医院	100	武汉国际会展中心	1800
湖北六七二中西医结合骨科医院	273	武汉经济技术开发区武汉体育中心	1100
中国人民解放军中部战区总医院	282	武汉客厅	2000
武汉市肺科医院	122	洪山体育馆	800
武汉市汉口医院	304	大花山户外运动中心	1000
武汉市武昌医院	504	武汉市江岸区全民健身中心	1000
武汉市第七医院	220	中国光谷科技会展中心	1000
武汉市第九医院	405	武汉市石牌岭职业高中	800
武汉市红十字会医院	304	汉阳区武汉国际博览中心	1000
武钢第二职工医院	102	黄陂一中体育馆	300

Appendix B. Output of infectious medical waste (kg)

附录 B. 传染性医疗废物产量表(千克)

	传染性医废产生中心	t			
		1	2	3	4
I ₁	武汉金银潭医院	990	855	900	810
I ₂	武汉市第五医院	578	499	525	473
I ₃	武汉市第五医院西院区	439	379	399	359
I ₄	武汉市中心医院(后湖分院)	708	612	644	579
I ₅	武汉市第三医院(光谷分院)	413	356	375	338
I ₆	武汉同济医院	737	637	670	603

Continued

I ₇	武汉协和医院西校区	495	428	450	405
I ₈	武汉大学人民医院东院区	578	499	525	473
I ₉	湖北省中西医结合医院	257	222	234	210
I ₁₀	武汉科技大学附属天佑医院	364	315	331	298
I ₁₁	武汉市中医院	138	119	125	113
I ₁₂	湖北六七二中西医结合骨科医院	375	324	341	307
I ₁₃	中国人民解放军中部战区总医院	388	335	353	317
I ₁₄	武汉市肺科医院	168	145	153	137
I ₁₅	武汉市汉口医院	418	361	380	342
I ₁₆	武汉市武昌医院	693	599	630	567
I ₁₇	武汉市第七医院	303	261	275	248
I ₁₈	武汉市第九医院	557	481	506	456
I ₁₉	武汉市红十字会医院	418	361	380	342
I ₂₀	武钢第二职工医院	140	121	128	115
I ₂₁	武汉市第六医院	591	511	538	484
I ₂₂	黄陂区中医医院	542	468	493	443
I ₂₃	江夏区中医院	358	309	325	293
I ₂₄	武汉市新洲区中医院	275	238	250	225
I ₂₅	武汉紫荆医院	396	342	360	324
I ₂₆	武汉市汉南区中医医院	36	31	33	29
I ₂₇	蔡甸区妇幼保健院	333	287	303	272
I ₂₈	武汉火神山医院	1375	1188	1250	1125
I ₂₉	武汉雷神山医院	2063	1781	1875	1688
I ₃₀	武汉体育馆(通口区)	419	362	381	343
I ₃₁	武汉国际会展中心	2475	2138	2250	2025
I ₃₂	武汉经济技术开发区武汉体育中心	1513	1306	1375	1238
I ₃₃	武汉客厅	2750	2375	2500	2250
I ₃₄	洪山体育馆	1100	950	1000	900
I ₃₅	大花山户外运动中心	1375	1188	1250	1125
I ₃₆	武汉市江岸区全民健身中心	1375	1188	1250	1125
I ₃₇	中国光谷科技会展中心	1375	1188	1250	1125
I ₃₈	武汉市石牌岭职业高中	1100	950	1000	900
I ₃₉	汉阳区武汉国际博览中心	1375	1188	1250	1125
I ₄₀	黄陂一中体育馆	413	356	375	338

Appendix C. Distance between hospital and candidate points of temporary center (m)
附录 C. 医院与临时中心候选点之间距离(米)

	J ₁	J ₂	J ₃	J ₄	J ₅	J ₆
I ₁	32,571	95,966	67,313	72,743	32,655	37,257
I ₂	20,246	65,406	45,458	100,526	46,257	35,520
I ₃	21,797	58,334	41,190	86,219	48,044	33,820
I ₄	28,615	72,726	55,597	74,915	36,023	25,302
I ₅	37,438	68,283	23,850	74,679	56,967	50,699
I ₆	22,528	65,067	46,385	82,850	43,111	28,887
I ₇	14,007	54,188	41,704	89,540	52,682	30,913
I ₈	45,890	65,819	28,222	88,934	70,485	57,455
I ₉	27,615	72,501	55,045	77,212	38,662	27,151
I ₁₀	28,784	60,165	39,754	82,907	56,399	42,551
I ₁₁	28,090	69,324	40,523	73,155	37,743	31,560
I ₁₂	32,773	63,824	26,696	78,850	51,656	46,540
I ₁₃	31,135	61,923	27,571	81,270	47,301	40,799
I ₁₄	20,298	67,785	50,656	81,926	42,186	26,966
I ₁₅	31,168	76,054	43,566	68,021	34,441	30,704
I ₁₆	35,392	67,280	36,506	70,271	38,413	34,928
I ₁₇	29,263	60,758	40,347	79,795	45,378	39,520
I ₁₈	41,837	76,076	38,955	67,755	41,643	38,524
I ₁₉	26,759	71,645	54,516	69,434	34,139	26,295
I ₂₀	59,262	96,519	58,922	60,599	54,165	66,640
I ₂₁	26,400	67,709	47,298	76,886	35,454	29,394
I ₂₂	61,075	115,093	101,231	48,866	1609	43,187
I ₂₃	44,559	43,651	4345	106,443	97,786	61,733
I ₂₄	97,151	139,431	101,834	4915	44,852	88,860
I ₂₅	33,266	64,053	43,642	72,765	39,794	36,624
I ₂₆	30,453	54,212	41,109	134,734	93,137	51,332
I ₂₇	9056	64,428	51,325	108,917	58,496	21,379
I ₂₈	1360	61,207	48,104	102,737	61,140	22,217
I ₂₉	33,451	52,700	17,765	100,339	64,034	44,510
I ₃₀	22,311	62,551	45,758	84,555	45,662	28,288
I ₃₁	23,302	63,694	46,901	73,183	39,168	30,458
I ₃₂	13,540	54,861	40,999	112,590	70,993	30,227
I ₃₃	31,091	95,809	81,947	71,984	30,763	29,481
I ₃₄	30,685	61,647	41,236	78,876	60,275	42,469
I ₃₅	56,863	50,267	7993	99,039	99,110	71,388
I ₃₆	32,482	97,416	83,573	71,419	29,987	29,145
I ₃₇	46,274	74,144	36,547	67,162	67,233	79,708
I ₃₈	29,917	62,214	25,822	80,547	61,946	41,197
I ₃₉	23,339	58,358	37,837	95,601	53,468	34,981
I ₄₀	70,214	124,669	110,807	60,180	12,327	53,472

Appendix D. Distance between candidate point of temporary center and incineration center (m)
附录 D. 临时中心候选点与焚烧中心之间距离(米)

	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃
J ₁	12,769	62,184	85,186	119,981
J ₂	67,893	115,774	46,476	128,120
J ₃	53,551	101,473	42,615	89,716
J ₄	84,703	113,210	140,341	51,641
J ₅	57,019	62,281	134,425	85,966
J ₆	25,653	41,880	99,215	120,474

Appendix E. Hospital (I) and temporary center candidate point (J) population exposure level
附录 E. 医院(I)与临时中心候选点(J)人群暴露水平

节点	暴露水平	节点	暴露水平	节点	暴露水平
I ₁	59828.49	I ₁₇	44871.37	I ₃₃	29914.25
I ₂	59828.49	I ₁₈	44871.37	I ₃₄	29914.25
I ₃	59828.49	I ₁₉	44871.37	I ₃₅	29914.25
I ₄	59828.49	I ₂₀	44871.37	I ₃₆	29914.25
I ₅	59828.49	I ₂₁	44871.37	I ₃₇	29914.25
I ₆	59828.49	I ₂₂	44871.37	I ₃₈	29914.25
I ₇	59828.49	I ₂₃	44871.37	I ₃₉	29914.25
I ₈	59828.49	I ₂₄	44871.37	I ₄₀	29914.25
I ₉	59828.49	I ₂₅	44871.37	J ₁	17473.54
I ₁₀	59828.49	I ₂₆	44871.37	J ₂	12695.18
I ₁₁	59828.49	I ₂₇	44871.37	J ₃	11846.95
I ₁₂	59828.49	I ₂₈	29914.25	J ₄	16625.31
I ₁₃	59828.49	I ₂₉	29914.25	J ₅	11422.83
I ₁₄	59828.49	I ₃₀	29914.25	J ₆	29009.47
I ₁₅	59828.49	I ₃₁	29914.25		
I ₁₆	44871.37	I ₃₂	29914.25		

Appendix F. Exposure level of people in transportation sections between nodes
附录 F. 节点间运输路段人群暴露水平

	J ₁	J ₂	J ₃	J ₄	J ₅	J ₆
I ₁	68920.24	203064.06	142434.31	153924.19	69097.98	78835.81
I ₂	42840.54	138399.10	96189.13	212713.02	97879.81	75160.32
I ₃	46122.45	123434.74	87158.04	182439.40	101661.10	71563.12
I ₄	60549.34	153888.22	117643.25	158520.14	76224.67	53539.03
I ₅	79218.81	144486.83	50466.60	158020.76	120542.17	107279.08
I ₆	47669.25	137681.77	98150.66	175310.60	91222.88	61124.89
I ₇	29638.81	114661.81	88245.66	189466.64	111475.11	65411.91

Continued

I ₈	97103.24	139273.00	59717.75	188184.34	149146.26	121574.78
I ₉	58433.34	153412.12	116475.22	163380.59	81808.79	57451.52
I ₁₀	60906.94	127309.14	84119.46	175431.21	119340.28	90037.92
I ₁₁	59438.44	146689.58	85746.67	154795.98	79864.19	66780.96
I ₁₂	69347.67	135051.58	56488.74	166846.60	109304.10	98478.64
I ₁₃	65881.66	131029.07	58340.24	171967.32	100088.92	86330.68
I ₁₄	42950.57	143433.06	107188.10	173355.42	89265.58	57060.06
I ₁₅	65951.49	160930.26	92185.66	143932.44	72877.16	64969.66
I ₁₆	74889.47	142364.48	77246.70	148693.44	81281.91	73907.65
I ₁₇	61920.51	128563.93	85374.25	168846.22	96019.85	83624.32
I ₁₈	88527.09	160976.82	82428.78	143369.58	88116.59	81516.78
I ₁₉	56622.04	151600.82	115355.86	146922.34	72238.12	55640.22
I ₂₀	125398.39	204234.20	124678.95	128227.48	114613.14	141010.24
I ₂₁	55862.40	143272.24	100082.57	162690.78	75020.66	62197.70
I ₂₂	129234.70	243536.79	214204.80	103400.46	3404.64	91383.69
I ₂₃	94286.84	92365.52	9194.02	225233.39	206915.18	130627.03
I ₂₄	205571.52	295036.00	215480.74	10400.14	94906.83	188027.76
I ₂₅	70390.86	135536.15	92346.47	153970.74	84204.10	77496.38
I ₂₆	64438.55	114712.59	86986.64	285097.14	197077.89	108618.51
I ₂₇	19162.50	136329.65	108603.70	230468.37	123777.54	45237.96
I ₂₈	2877.76	129514.01	101788.06	217391.49	129372.24	47011.17
I ₂₉	70782.32	111513.20	37590.74	212317.32	135495.94	94183.16
I ₃₀	47210.08	132357.92	96823.93	178918.38	96620.79	59857.41
I ₃₁	49307.03	134776.50	99242.52	154855.23	82879.49	64449.13
I ₃₂	28650.64	116085.88	86753.88	238240.44	150221.19	63960.33
I ₃₃	65788.56	202731.84	173399.85	152318.14	65094.51	62381.80
I ₃₄	64929.46	130445.05	87255.38	166901.62	127541.90	89864.40
I ₃₅	120322.11	106364.97	16913.19	209566.52	209716.76	151057.01
I ₃₆	68731.91	206132.26	176840.47	151122.60	63452.49	61670.82
I ₃₇	97915.78	156888.70	77333.45	142114.79	142265.03	168662.13
I ₃₈	63304.37	131644.82	54639.35	170437.45	131077.74	87172.85
I ₃₉	49385.32	123485.53	80063.09	202291.72	113138.29	74019.80
I ₄₀	148572.82	263799.60	234467.61	127340.88	26083.93	113146.75
N ₀	27019.204	143661.59	113313.92	179231.55	120652.2	54281.748
N ₁	131581.344	244977.78	214716.87	239552.36	131786.6	88618.08
N ₂	180253.576	98343.216	90173.34	296961.56	284443.3	209938.94
N ₃	253879.796	271101.92	189839.06	109272.36	181904.06	254922.98