



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405850

引用格式:帅春燕,殷奇,张小七,等. 封闭管理环境下的应急生活物资发放选址优化[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(15): 6368-6377.

Shuai Chunyan, Yin Qi, Zhang Xiaoqi, et al. Optimization of emergency living supplies location selection in closed management environment [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(15): 6368-6377.

封闭管理环境下的应急生活物资发放选址优化

帅春燕¹, 殷奇¹, 张小七¹, 王文聪², 欧阳鑫³

(1. 昆明理工大学交通工程学院, 昆明 650500; 2. 河口县交通运输局, 红河 661300;

3. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明 650500)

摘要 在突发公共卫生事件时,最优的生活物资发放位置的选择极为关键,为此,以长春市的应急生活物资发放为例进行实证研究,提出应急物资发放选址优化算法。首先,基于K-means聚类和泰森多边形的方法确定虚拟物资仓库、发放备选点以及服务覆盖区域。然后,以最大覆盖率、最小化成本为目标建立优化模型,并提出基于自适应精英保留策略的改进遗传算法进行求解。实证研究表明聚类分析算法能够初步得到873个虚拟物资仓库和发放备选点,而泰森多边形能够有效确定备选点的合理覆盖范围,改进的遗传算法能够得到更优的30个物资仓库和发放位置。数据分析同时发现从物资发放到有效控制传染存在时间滞后性,因此一旦新增速率超过正常值,应该提前加大应急物资储备和发放以控制感染的进一步爆发。研究成果有利于增强城市危机管理和应急响应能力,确保生活物资供应的及时性和高效率。

关键词 封闭管理环境; K-means聚类; 自适应精英保留遗传算法(AEGA); 选址优化; 滞后效应

中图分类号 TM614;

文献标志码 A

Optimization of Emergency Living Supplies Location Selection in Closed Management Environment

SHUAI Chun-yan¹, YIN Qi¹, ZHANG Xiao-qi¹, WANG Wen-cong², OUYANG Xin³

(1. School of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Hekou County Transportation Bureau, Honghe 661300, China;

3. School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

[Abstract] In the event of a public health emergency, the selection of the optimal distribution locations of daily necessities is crucial. Accordingly, the emergency distribution of daily necessities in Changchun City was taken as an example for empirical research and an optimization algorithm was proposed for the location of emergency supplies distribution. Initially, the virtual material warehouses, distribution candidate locations, and service coverage areas were determined by using K-means clustering and the Thiessen polygon method. Then, an optimization model was established with the goals of maximum coverage and minimum cost, and an improved genetic algorithm based on adaptive elite retention strategy was proposed to solve it. Empirical research had shown that the clustering algorithm could obtain 873 virtual material warehouses and distribution candidates, while Thiessen polygons could determine the reasonable coverage range of candidates, and improved genetic algorithms could obtain better 30 material warehouses and distribution locations. Data analysis had also found that there was a time lag between the distribution of supplies and effective control of infection. Therefore, once the rate of new additions exceeds the normal value, emergency supplies should be increased in advance to control further outbreaks of possible infections. The research results are beneficial for enhancing the ability of urban crisis management and emergency response, ensuring timely and efficient supply of daily necessities.

[Keywords] closed management environment; K-means clustering; adaptive elite preservation genetic algorithm (AEGA); site selection optimization; hysteresis effect

应急物流是在突发事件发生后,为满足灾区或紧急需求地区的人们生活和救援物资需求而采取的物流行动^[1]。应急物流的高效运作有利于为灾区或者有紧急需求内的人们提供迅速、准确、有序的物资保障^[1-3]。在应急物流中,应急设施选址是

一个关键的环节,其合理规划对提升物资配送效率和服务至关重要。

当前,国内外学者针对应急物资选址问题也进行了大量研究^[4-7]。主要从不同突发事件背景、不同影响因素和不同模型算法三方面入手。在不同突发事件背

收稿日期: 2024-08-04 修订日期: 2024-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(62362044)

第一作者: 帅春燕(1976—)女,汉族,四川成都人,博士,教授。研究方向:大数据挖掘与分析、充电站选址优化。E-mail: earth0806@kust.edu.cn。

* 通信作者: 欧阳鑫(1971—)男,汉族,广西柳州人,博士,讲师。研究方向:大数据挖掘与分析。E-mail: kmoyx@hotmail.com。

景方面, Jiao 等^[8]针对突发灾害情况下需求不确定的问题, 综合考虑人口转移效率、建设成本和住房容量等因素, 建立多目标选址模型, 利用非支配分选遗传算法 II (non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 对模型进行求解。杨洋等^[9]针对不确定需求下的物流配送网点选址问题, 提出了以降低配送成本和缩短配送时间为目标的多目标优化策略, 构建了基于“0-1”整数规划的动态选址模型, 并进行了仿真实验验证。龙圣杰^[10]针对突发公共卫生事件下考虑患者转运的跨区域动态协同应急物流选址-分配优化问题, 构建患者转运与应急资源协同配置两阶段优化决策模型, 设计了嵌入模型预测控制 (model predictive control, MPC) 方法的改进遗传算法。宋英华等^[11]在常态化疫情防控背景下, 考虑不同需求主体防护物资短缺的问题, 构建最小化医院物资集散点分配公平性的储备库选址分配模型, 通过改进的 (NSGA-II) 进行仿真研究。在考虑不同影响因素方面, 郑斐峰等^[12]以最小化建设与运营成本以及床位资源供求比差异为目标, 建立了双目标整数规划模型。根据模型特点, 采用 epsilon 约束精确算法和基于就近原则思想的启发式算法进行求解, 同时利用 (NSGA-II) 进行对比分析。Yan 等^[13]建立了救援满意度和最小化仓库数量的双目标优化模型, 采用启发式多中心聚类定位算法求解。郭冰等^[14]以总成本最小和受灾点综合满意度最大为目标, 构建应急物资配送中心选址-分配多目标优化模型, 并设计量子粒子群优化算法对模型求解。于冬梅等^[15]以最小化系统成本和覆盖服务质量最大化为目标, 建立中断情境下服务能力有限的可靠性应急设施选址分配多目标优化模型, 采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法求解。另一方面, 学者还致力于提出不同的应急物资储备库选址模型算法, 主要包括评估方法、数学算法、启发式算法, 以优化储备库的位置, 从而确保物资供应的效率和及时性。储旭等^[16]通过精确算法研究生活物资集散点选址问题, 提出数学性质的降阶回溯算法, 结合分配子算法和上下界算法, 成功降低了问题求解难度。刘晋等^[17]结合储备库实际情况采取具有方向性的初始群体生成法提高自适应遗传算法 (adaptive genetic algorithm, AGA) 的搜索速度, 自适应交叉与变异算子使得 AGA 能够在进化速度与解的质量之间进行权衡, 并获得全局最优解。Wang 等^[18]提出了一种先聚类候选配送中心, 然后在各聚类单元中定位和分类的方法, 对物流配送中心选址进行研究。吕楠等^[19]基于贝叶斯方法构建物流园区选址模型, 能够充分考虑城市规模、经济社会发展、城市物流量及交通区位等多因素的影响, 实现了对物流园区选址结果的量化评价。

综上, 在应急物资储备库选址方面的研究中, 主要采用单一算法进行求解, 而将不同算法结合以弥补各自算法缺陷的研究相对有限。因此, 在选址优化中以距离最短为目标, 通过 K-means 聚类算法^[18]减少了选址中心的冗余, 优化投放点与需求点的距离。同时利用泰森多边形^[20]确定每个候选仓库的服务范围和服务的需求点, 确保服务范围的精确性。应急生活物资选址需要考虑最大覆盖需求点, 以及最小化总成本 (仓库建设、库存、运输成本), 属于多目标优化问题。为此采用自适应精英保留遗传算法 (adaptive elitist-preserving genetic algorithm, AEGA), 充分发挥其全局搜索能力和多目标优化功能, 进行优化选址求解, 从而得到更加科学的选址。同时, 分析了物资发放与新增感染人数之间的时间滞后效应^[21], 采用皮尔逊相关系数^[22]确定了最优的物资发放时间间隔。

1 备选物资投放点的确定

在突发公共卫生事件封控情况下, 合理规划应急生活物资投放点的位置和规模、确定各物资仓库覆盖的需求点成为亟待解决的实际问题。为此, 首先根据物资需求点的分布、小区实际情况、路网以及城市环境的异质性, 采用 K-means 聚类算法和泰森多边形确定物资仓库的备选点及其覆盖范围。

1.1 K-means 聚类算法

K-means 聚类算法是一种基于距离的聚类分析方法。给定 k 个 $\{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ ($1 < k \leq n$), 和 n 个 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 样本, 其中 X_i 具有 m 个属性。根据 X_i 到簇类中心距离, 将每个样本归类到距离最小的类簇中。每一个 X_i 到每一个聚类中心 C_j 的欧式距离为

$$\text{dis}(X_i, C_j) = \sqrt{\sum_{t=1}^m (X_{it} - C_{jt})^2} \quad (1)$$

式(1)中: X_{it} 为第 i 个对象的第 t 个属性; C_{jt} 为第 j 个聚类中心的第 t 个属性。考虑到生活物资选址的复杂性, 通过轮廓系数分析不同 k 值下成本函数的变化, 从而确定最优的 k 值。

1.2 K-means 泰森多边形

将 K-means 聚类后的聚类中心点作为物资仓库选址的备选点, 考虑到实际的小区、路网、人数的空间异质性, 引入泰森多边形^[20]以确定仓库备选点的服务范围。对于二维平面上的 K-means 聚类中心点, 任意两个数据点的距离 $C_i(x_{i1}, x_{i2})$ 和 $C_j(x_{j1}, x_{j2})$ 定义为

$$d(C_i, C_j) = \sqrt{(x_{i1} - x_{j1})^2 + (x_{i2} - x_{j2})^2} \quad (2)$$

对于任意两个相邻的中心点 C_m 和 C_{m+1} , (C_m, C_{m+1}) 是穿过这两个点的线段的垂直平分线。那么

$B(C_m, C_{m+1})$ 上的任意数据点 y 与 C_m 和 C_{m+1} 的距离相等, 即

$$B(C_m, C_{m+1}) = \{y \mid d(C_m, y) = d(C_{m+1}, y)\} \quad (3)$$

对于 $x \in S$, 如果 $D[C_m \mid (C_m, C_{m+1})] = \{x \mid d(C_m, x) < d(C_{m+1}, x)\}$, $D[C_m \mid (C_m, C_{m+1})]$ 是划分的半平面, 包含 C_m , 以 C_m 为中心的 Voronoi 单位描述为

$$VR(C_m, S) = \bigcap_{q \in S, C_m \neq C_{m+1}} D[C_m \mid (C_m, C_{m+1})] \quad (4)$$

对于 S 中的 n 个聚类中心点, Voronoi 图定义为 $V(S) = \bigcup_{C_m, C_{m+1} \in S, C_m \neq C_{m+1}} VR(C_m, S) \cap VR(C_{m+1}, S)$ (5)

2 物资仓库选址模型建立

2.1 假设

在物资仓库备选点及其覆盖范围确定的情况下, 以覆盖需求最大化, 仓库建设成本、库存成本、运输成本最小化为目标函数, 构建仓库选址模型, 此物资仓库同时也是物资发放中心。为确保模型构建和求解的合理性以及准确性, 做如下假设:

- (1) 从若干物资仓库备选点中选取的某些点作为要建设的仓库。
- (2) 一个需求点仅由一个仓库配送。
- (3) 仓库到需求点之间的距离为欧式距离。
- (4) 运输时间与运输距离呈现线性关系。
- (5) 各需求点的需求量已知。
- (6) 需求点对仓库的需求量小于等于仓库的供应量。

2.2 选址模型构建

2.2.1 变量的确定

总计 I 个物资仓库备选点, 对每个备选点 x_j , 如果建立仓库则为 1, 否则为 0。即

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{建立仓库} \\ 0, & \text{不建立仓库} \end{cases} \quad (6)$$

因此, 此选址优化问题属于 0-1 整数规划问题。

2.2.2 目标函数

目标 1 最大化覆盖面积: 在突发事件情况下, 最大化覆盖面积的目标旨在通过合理布置设施点, 使得尽可能多的需求点能够被物资覆盖, 从而在有限的资源条件下, 最大化利用物资资源, 减少资源的浪费和重复利用, 从而实现资源的最优化配置并提高救援行动的效率和及时性。由此得到目标函数为

$$\max Z_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \alpha_{ij} t_{ij} d_{ij} \quad (7)$$

目标 2 最小化总成本: 该目标函数综合了仓

库建设成本、库存成本和运输成本, 以寻找最佳的仓库选址, 以最小化总成本。表达式为

$$\min Z_2 = \sum_{j \in J} (E_j x_j + F_j Q_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} S_{ij} \alpha_{ij} x_{ij}) \quad (8)$$

式(8)中: I 表示应急物资需求点的集合 $i \in I \{1, 2, \dots, m\}$; J 表示应急物资储备库集合 $j \in J \{1, 2, \dots, n\}$; α_{ij} 表示从仓库 j 向小区需求点 i 运输的物资总量; t_{ij} 表示仓库 j 向小区需求点 i 运输物资所需的时间; d_{ij} 表示仓库 j 到小区需求点 i 的距离; E_j 表示仓库的建设成本; F_j 和 Q_j 表示仓库的库存成本和库存容量; S_{ij} 表示小区需求点 i 到仓库位置的运输成本; $x_{ij} = 1$ 时, 仓库 j 向 i 调运物资, 等于 0 时则不成立。

2.2.3 约束条件

(1) 物资仓库容量约束。物资仓库 j 的库存容 Q_j 大于等于所有分配给该仓库的需求点 i 的物资总量。即

$$\sum_{i \in I} \alpha_{ij} x_{ij} \leq Q_j, \quad j \in J \quad (9)$$

(2) 运输约束。每个需求点 i 只被分配到一个已建成的物资仓库。即

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \quad i \in I \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = x_j, \quad j \in J \quad (11)$$

(3) 需求点服务约束。需求点 i 只能由已建成的仓库 j 服务。如果仓库 j 未建成 (即 $x_j = 0$), 则需求点 i 的物资分配量必须等于 0。即

$$0 \leq x_{ij} \leq x_j, \quad i \in I, j \in J \quad (12)$$

(4) 需求量约束。保证每个需求点的需求电 i 不超过该点的需求数量 δ_i , 只有分配到需求点的储备库 j 才能提供物资。

$$\alpha_{ij} x_{ij} \leq \delta_i, \quad i \in I, j \in J \quad (13)$$

2.3 自适应精英保留遗传算法

作为一种随机搜索启发式算法, 遗传算法 (genetic algorithm, GA) 被广泛用于求解复杂多目标优化问题。然而, 在传统算法中, 由于参数设置的静态性和遗传操作的随机性, 往往存在以下缺点, 在进化初期容易快速收敛并且随着进化的进行, 种群多样性逐渐降低, 容易导致算法陷入局部最优。与此同时, 交叉概率和变异概率等参数需要预先设定, 且这些参数不同进化阶段的要求有所不同, 难以找到最优参数组合。此外, 遗传算法的选择算子基于轮盘赌概率, 容易丢失优秀个体, 也会导致过早地陷入局部最优。为了克服这些缺点, 提出了自适应精英保留遗传算法 (adaptive elitist-preserving genetic algorithm, AEGA), 通过自适应调整遗传操作参数和保留精英个体, 提升算法的搜索效率和解的

质量。其显著特点包括强大的全局搜索能力和良好的鲁棒性,使其成为解决实际问题,尤其是多目标优化问题的重要工具。算法求解策略如下:

(1) 构建初始种群: 本文采用二进制编码方式对仓库进行编码,构建初始种群。每个个体的基因代表一个仓库选址方案,基因长度等于备选仓库点的个数。在编码中,1 表示选中,0 表示未选中。具体设定进化代数计数器 $t=0$,最大进化代数 T 为预设值。为确保选址的实际可行性,规定仓库位置只能从生活物资投放点中选择,并确定种群中的个体数量为 N 。

(2) 适应度函数: 在解决选址优化问题时,本文中目标函数的选择模型的适应度函数作为遗传算法的适应度函数,即

$$f = \lambda_1 \frac{Z_{1max} - Z_1}{Z_{1max} - Z_{1min}} - \lambda_2 \frac{Z_{2min} - Z_2}{Z_{2max} - Z_{2min}} \quad (14)$$

式(14)中: Z_1, Z_2 为选址模型的两个目标函数值。 λ_1, λ_2 是权衡两个目标的参数,用于调整目标函数在适应度计算中的重要性。

(3) 选择操作: 通过将选择算子应用于群体使优化后的个体能够直接遗传到下一代或通过配对交叉产生新的个体再遗传到下一代,选择操作建立在群体中个体的适应度评估基础上,以确保更优秀的个体在进化过程中得到更多机会。

(4) 自适应交叉运算: 通过动态调整交叉概率来增加种群多样性。即

$$P_c = P_{c0} \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{max}} \right) \quad (15)$$

式(15)中: P_{c0} 为初始交叉概率; σ 为当前种群适应度的标准差; σ_{max} 为预设的最大标准差。

(5) 变异操作: 通过动态调整变异概率来防止算法陷入局部最优。

$$P_m = P_{m0} \left(1 - \frac{G}{G_{max}} \right) \quad (16)$$

式(16)中: P_{m0} 为初始变异概率; G 为当前代数; G_{max} 为最大代数。

(6) 精英保留策略: 每代选择适应度最高的前 e 个个体直接进入下一代,确保当前最优解得以保留和延续。这样可以提高收敛速度和解的精度,防止优良基因的丢失。

(7) 终止条件判断: 若 $t = T$,则将进化过程中所得到的具有最大适应度个体作为最优解输出,终止计算。

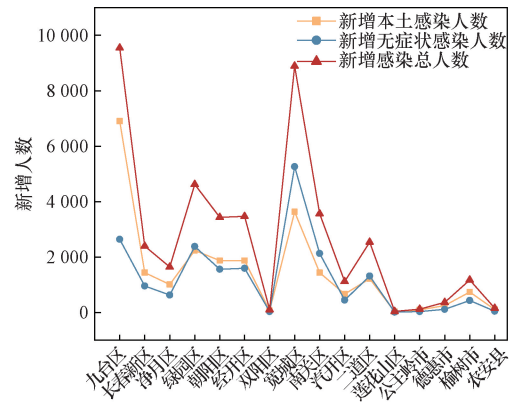
3 实证研究

3.1 数据描述与分析

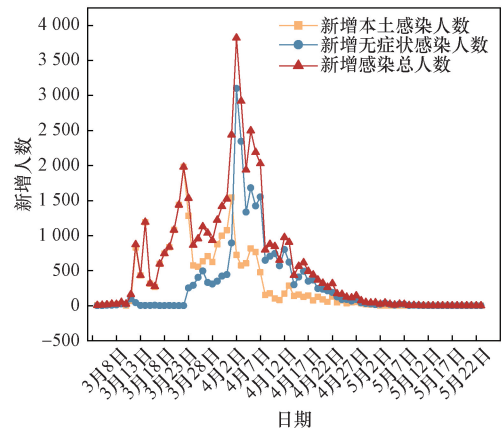
以2022年3—5月疫情期间长春市的封控管理为例,使用长春市9个区的隔离人口数量、生活物资

投放点数量、交通网络基础数据和主要小区分布数据进行分析。数据的来源包括长春市疫情防控指挥部和相关市政部门。通过优化应急生活物资仓库和投放点的选址和配送进行优化,以验证本文提出方法的可行性和有效性。

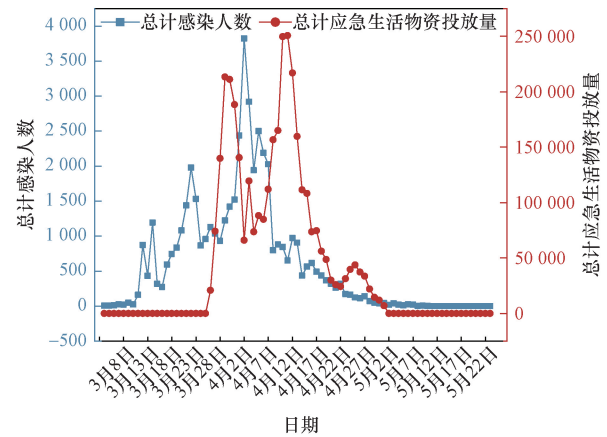
疫情感染数据: 图1(a)和图1(b)显示2022年3月4日—5月23日期间,长春市的新增感染人数在不同区域和不同时间段的分布情况,可以看到不同区域和不同时段感染人数存在较大差异。从3



(a) 各区的累计新增感染人数



(b) 不同时间的新增感染人数



(c) 新增感染总人数与生活物资分布情况

图1 感染数据分析

Fig. 1 Infection data analysis

月14日—4月2日,新增感染人数都出现了上升的趋势,同时长春市在3月26日开始实行2次大规模的应急生活物资发放,如图1(c)所示,随着应急生活物资的发放,小区内的人员无需外出采购生活用品,降低了外出人员交叉感染的风险,因此感染人数明显下降,有效地控制疫情。这说明在疫情封控期间,应急生活物资的发放对疫情的控制有显著的效果,同时具有时间滞后性。

各区人口和当前投放点分布数据:疫情的传播与人口数量和密度密切相关,高的人口数量和密度会导致高的感染风险,需要更多的物资投放点,但已有的生活物资投放点的数量和分布与人口分布失衡,如图2、图3所示。小区栋数、人口数和户数从大到小依次为:朝阳区、南关区、二道区、长春新区、宽城区、净月区、汽开区和经开区,而投放点数量从大到小却依次为绿园区、净月区、南关区、长春新区、经开区、汽开区、二道区。这种人口数量、密度和隔离人数与物资投放点不匹配的现象,导致了供需不平衡和资源的浪费。

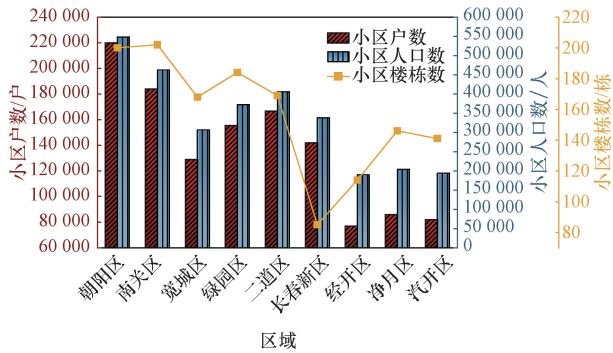


图2 各区小区楼栋数、户数、人口数分布
Fig. 2 Distribution of the number of buildings, households and population in each district

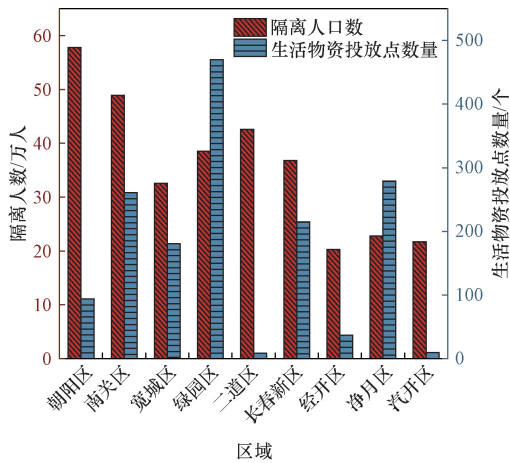


图3 隔离人口数与生活物资投放点数量对比
Fig. 3 Comparison of the number of quarantined people and the number of living material distribution points

3.2 模型求解

3.2.1 虚拟物资仓库和发放备选点及服务区域的确定

确定物资发放备选点:采用K-means聚类算法和轮廓系数法,对1409个小区的坐标、小区栋数、小区户数、小区楼人口数、小区街道数进行聚类,得到更优的873个聚类中心(物资发放备选点),如图4所示。图5所示为生活物资投放点优化前后的对比图,从图5中可以看出在873个聚类中心下,绿园区和净月区内的投放聚类点数急剧减少,汽开区、经开区与长春新区投放点的数量也减少,朝阳区和二道区聚类中心点的数量相应增加。这与人口密度、人口数、隔离人数的分布更一致,有助于更好地满足隔离区域内对物资的需求。

确定覆盖范围:以873个聚类中心的位置作为输入,构建泰森多边形,得到873个不同的多边形的最优覆盖范围,其聚类中心和各多边形如图6所示。计算每一个多边形的面积,以及多边形内每一个物资发放备选点所服务的小区户数、小区栋数、小区人

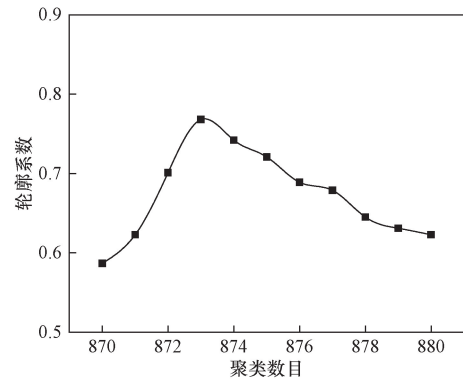


图4 轮廓值图
Fig. 4 Contour value diagram

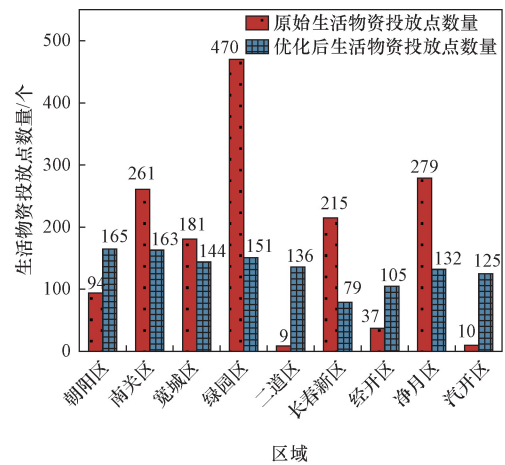


图5 生活物资投放点优化前后对比
Fig. 5 Comparison before and after optimization of daily material delivery points

口数以及小区坐标, 从而得出每一个小区内物资发放备选点的分布, 如图 7(a) 所示。可以看到, 物资发放备选点位置分布图与长春市小区及路网分布 [图 7(b)] 具有一致性, 在小区和人口分布密集的地方备选点也多, 稀疏的地区则相反。这说明经过 *K-means* 聚类 and 泰森多边形优化后的备选点的分布能够较好地覆盖小区, 更能充分服务于封控的小区用户。

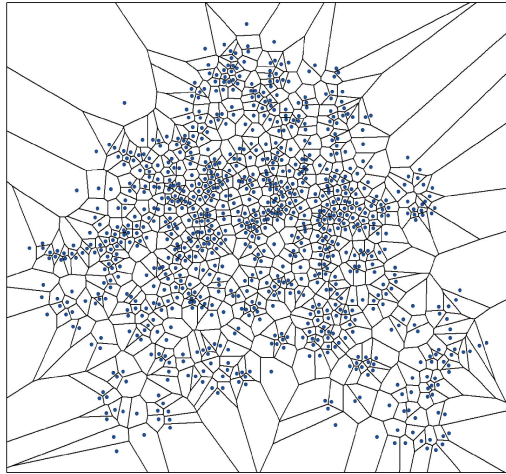


图 6 多边形及其投放点位置分布

Fig. 6 Distribution of polygons and their placement points

通过表 3 可以看出, 优化后的生活物资投放点分布能够有效覆盖长春市各个区域, 并根据人口密度和需求量进行合理配置。例如, 编号 1 的投放点服务 2 个小区, 辖区人口数为 5 961 人, 而编号 5 的投放点服务 1 个小区, 但辖区人口数高达 11 489 人, 表明选址充分考虑了不同区域的需求差异。编号 3 的投放点覆盖面积仅 0.040 2 km², 却服务 9 250 人, 反映了该区域的人口密度较高。投放点分布在朝阳区、净月区等各个行政区域, 实现了均衡投放。此外, 通过聚类算法确定的经纬度位置, 使得投放点布局更具效率。

3.2.2 AEGA 优化后的选址位置

在虚拟物资仓库和发放备选点确定的基础上, 以最大覆盖率和最小成本为目标, 采用 AEGA 对物资仓库和发放点进行选址优化。得到如图 8 所示的 30 个仓库的选址位置。

具体的计算结果见表 4, 结合图 8 可知, 经过 AEGA 求解的选址优化模型, 确定了 30 个物资仓库和发放点的位置。这些位置分布在长春市的不同区域, 每个仓库服务一定数量的小区, 涵盖了相应的人口数量。

通过表 4 可以看出, 30 个优化后的物资仓库的具体选址与服务数据。

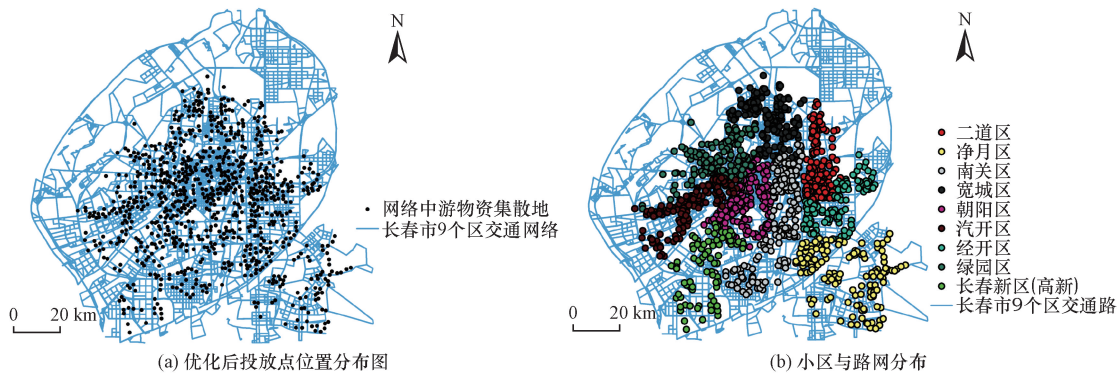


图 7 物资发放备选点位置与长春市小区及路网对比

Fig. 7 Comparison of the location of scientific and technological achievement incubation points with Changchun City's residential areas and road network

表 3 优化后部分投放点位置分布

Table 3 Location distribution of some delivery points after optimization

投放点编号	辖区小区数/个	辖区人口数/人	辖区覆盖面积/km	辖区所属区域	聚类中心经纬度
1	2	5 961	0.627 9	朝阳区	[50.12°E, 42.70°N]
2	2	1 409	0.664 8	净月区	[68.43°E, 26.66°N]
3	3	9 250	0.040 2	朝阳区	[43.12°E, 34.63°N]
4	2	4 727	1.041 0	二道区	[67.50°E, 56.40°N]
5	1	11 489	0.056 2	二道区	[69.83°E, 42.30°N]
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
869	1	1 941	0.132 4	二道区	[68.23°E, 47.51°N]
870	1	1 178	0.064 2	二道区	[67.34°E, 41.35°N]
871	1	958	0.057 9	绿园区	[49.97°E, 57.64°N]
872	1	2 275	0.101 2	汽开区	[31.65°E, 33.29°N]
873	1	7 161	0.161 1	长春新区	[32.95°E, 14.97°N]

辖区小区数和人口数:每个仓库服务的辖区小区数和人口数不同,分布范围从25个小区到72个小区不等,人口数从34 755~175 198人不等。这表明仓库的选址充分考虑了服务区域内的实际需求。

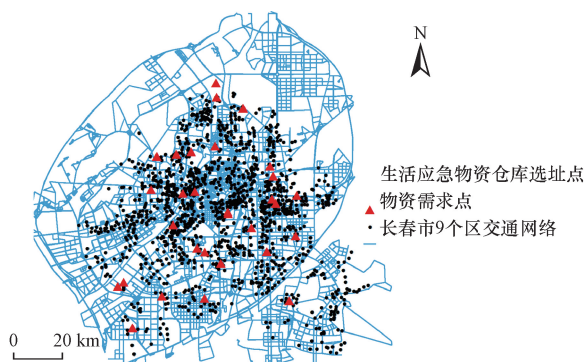


图8 生活应急物资仓库位置选址分布

Fig. 8 Life sample warehouse location selection and distribution

总服务距离和服务半径:总服务距离和服务半径是优化选址的重要指标。表5中显示,服务半径在3.19~6.90,意味着能够在更大的区域内满足需求,减少了多个仓库建设和运营的需求,提高了资源利用率。

所属行政区:仓库分布在不同的行政区,如二道区、宽城区、长春新区、朝阳区等。这种分布确保了各行政区在封闭管理环境下都能得到及时的物资供应。

此外,根据《救灾物资储备库建设标准》,区级救灾物资储备库的各类用房建筑面积约为630~800 m²,其中每万人所需的应急生活物资仓储面积为50~150 m²。仓库的机电工程及设备成本为1 000~3 000元/m²。运输方面,依据《公路货物运费计算公式与标准》,运费取0.45元/(t·km)计算。因此,计算得到优化方案下的总成本为3 780.30万元,较非优化情况下降了32.93%。

表4 物资仓库场所选址与优化问题结果

Table 4 Results of material warehouse site selection and optimization problem

编号	X 坐标/度	Y 坐标/度	辖区小区数/个	辖区人口数/人	总服务距离/km	半径/km	所属行政区
0	68.233 50	42.638 32	52	127 657	204.36	3.93	二道区
1	54.125 13	68.625 67	53	95 404	216.77	4.09	宽城区
2	49.834 35	16.264 32	25	130 886	222.50	6.90	长春新区
3	49.136 54	29.983 33	33	86 791	192.60	4.32	朝阳区
4	51.011 33	17.228 21	50	111 390	196.50	3.93	南关区
5	63.020 75	35.288 67	58	130 980	195.46	3.37	南关区
6	74.299 63	33.146 83	29	161 195	179.51	6.19	经开区
7	53.982 25	72.235 33	57	112 365	251.94	4.42	宽城区
8	53.684 83	56.146 67	58	98 374	205.32	3.54	宽城区
9	42.970 13	35.954 17	38	99 936	164.92	4.34	朝阳区
10	37.364 53	45.033 67	39	68 668	212.16	5.44	绿园区
11	58.620 51	28.623 45	27	106 432	207.63	6.69	长春新区
12	74.598 37	43.468 67	36	98 753	245.52	6.82	经开区
13	60.404 73	44.721 46	33	100 956	182.16	5.52	长春新区
14	57.384 64	40.614 21	52	129 499	165.88	3.19	南关区
15	69.165 38	41.482 17	63	143 616	235.62	3.74	二道区
16	51.101 75	29.025 67	52	175 198	174.72	3.36	朝阳区
17	68.593 75	48.499 33	54	134 511	244.08	4.52	二道区
18	43.804 08	54.056 89	46	91 750	158.24	3.44	绿园区
19	47.578 50	54.692 83	57	118 836	204.06	3.58	绿园区
20	50.247 63	67.721 49	52	72 365	281.84	5.42	净月区
21	48.584 25	44.494 33	39	944 437	189.54	4.86	朝阳区
22	57.918 44	51.252 91	33	34 755	222.75	6.75	净月区
23	38.821 25	53.448 33	42	93 287	158.18	3.79	绿园区
24	57.061 76	38.810 67	38	92 817	218.50	5.75	朝阳区
25	33.171 93	37.717 43	72	101 541	383.04	5.32	汽开区
26	66.915 35	29.108 67	49	53 674	218.05	4.45	经开区
27	58.224 21	60.557 81	61	86 936	386.74	6.34	净月区
28	25.722 41	31.049 36	69	91 921	415.38	6.02	汽开区
29	55.209 38	26.156 83	42	90 277	196.14	4.67	南关区

表 5 优化前后总体选址方案主要指标对比

Table 5 Comparison of key indicators for the overall site selection plan before and after optimization

参数	服务半径/ km	总成本/ 万元	仓储点/ 个	投放点/ 个
优化前	0.52 ~ 2.03	5 636	—	1 409
优化后	3.19 ~ 6.90	3 780.30	30	873

3.2.3 物资发放时间滞后效应分析

进一步分析发现发放物资和新增感染人数在趋势上基本保持一致,但物资发放存在一定的时间滞后性^[21],如图 9 所示。为了确定最优的物资发放时间,本文中采用 Pearson 相关系数^[22]来分析新增感染人数与物资发放的关联关系。图 10 显示了在不同时间阶数下(超前、滞后阶数)长春全市的感染人数与应急物质发放之间的 Pearson 相关系数,表 6 进一步显示了不同行政区的 Pearson 相关系数和超前滞后阶数。9 个区的平均滞后阶数为 7,这说明物资发放到有效控制传染平均需要 7 d 的时间。因此

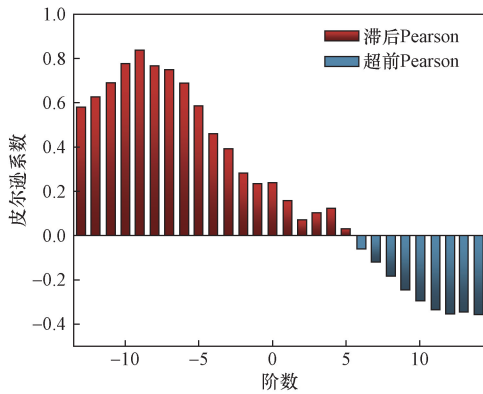


图 9 长春新区新增总感染人数与发放蔬菜包的滞后相关性

Fig. 9 Lagging correlation between the total number of new infections and the distribution of vegetable packets in Changchun New District

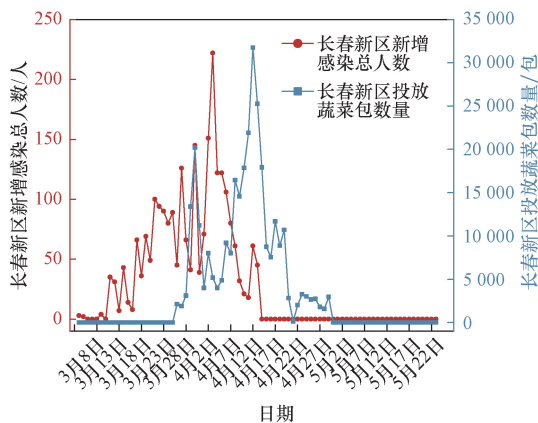


图 10 描述性统计分布

Fig. 10 Descriptive statistical distribution

表 6 新增总感染人数的控制趋势与实行发放蔬菜包的滞后相关性统计

Table 6 Statistics on the lagged correlation between the control trend of the total number of new infections and the implementation of the distribution of vegetable packets

行政区	滞后 Pearson	滞后阶数	超前 Person
长春新区	0.837	9	-0.355
净月区	0.598	9	-0.360
绿园区	0.694	9	-0.258
朝阳区	0.862	8	-0.379
经开区	0.737	9	-0.247
南关区	0.677	7	-0.206
汽开区	0.704	8	-0.248
宽城区	0.482	4	-0.167
二道区	0.642	4	-0.113
平均值	0.693	7	-0.259

一旦发现新增速率超过正常值,就应该提前加大应急物资发放,以控制疫情的进一步爆发,这些都能为未来的防控工作提供定量支持。

综上所述,经过对 2022 年长春市 9 个区域的疫情期间感染人数和发放蔬菜包的详细分析,本文发现这两者在时间上表现出显著的滞后相关性。研究结果显示,对于疫情较为严重的区域,通过居民集中管理,并采取发放应急生活物资的方式,可以在较短的时间内迅速遏制疫情传播。因此,采取发放区域应急生活物资的方式可能成为未来封闭管理环境下的应急生活物资选址优化的重要策略,为提高防控效果提供了有力支持。另外,结合 K-means 聚类、泰森多边形划分与 AEGA 优化算法的局部和全局的选址优化布局,通过优化资源配置、提高物资发放的响应速度、缩短应急响应时间等策略,有助于缓解因区域覆盖不均、运输距离过长或资源分配不平衡引起的滞后性。同时,确保在突发情况下,物资快速、精准地分配到需求点。

4 结论

针对封闭管理环境下的应急生活物资选址优化问题,利用 K-means 聚类算法、泰森多边形和 AEGA 进行建模和求解。并对长春市疫情感染数据和物资发放时间滞后效应分析,得到如下结论。

(1) 针对物资仓库和发放备选点的确定,经过聚类分析,得到了 873 个虚拟物资仓库和发放备选点。通过优化后的聚类中心点数量分布,能够更好地满足区域内隔离人口的需求,提高物资利用效率。泰森多边形进一步确定了虚拟备选点的合理分布,可以反应不同小区的需求范围。经过这一步骤,建立了可靠的物资配送基础。

(2) 对于选址优化,采用 AEGA 以最大覆盖率

和最小成本为目标,对物资仓库和发放点进行了选址优化。得到的30个仓库位置分布在不同区域,确保了物资覆盖范围的最大化。这些选址考虑了各区域的小区数量和人口密度,为封闭管理环境下高效、经济地满足物资需求提供了重要支持。

(3)通过对物资发放时间滞后效应的分析,发现发放物资与新增感染人数存在一定的时间滞后性,平均需要7 d左右才能有效控制传染。这一结果提示了物资发放在疫情防控中的重要性,但也表明了应急响应中需要更加及时地调整物资发放策略。

然而,本研究也存在一定的局限性,例如在模型建立和参数选择上的不足。未来的研究方向包括进一步优化模型算法、优化物资调度,以及考虑更多因素如交通情况等,以提高应急物资配送的效率和准确性。

参 考 文 献

- [1] 冯良清, 陈倩, 郭畅. 应对突发公共卫生事件的“智慧塔”应急物流模式研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2021, 20(3): 123-130.
Feng Liangqing, Chen Qian, Guo Chang. Research on the “smart tower” emergency logistics model to respond to public health emergencies [J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2021, 20(3): 123-130.
- [2] 胡晓伟, 宋浪, 杨滨毓, 等. 重大突发公共卫生事件下城市应急医疗物资优化调度研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 55-64.
Hu Xiaowei, Song Lang, Yang Binyu, et al. Research on optimal dispatch of urban emergency medical supplies under major public health emergencies [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(11): 55-64.
- [3] 陈丰, 丁文龙, 叶一芄, 等. 公共卫生事件暴发初期的医疗物资调度优化[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 65-72.
Chen Feng, Ding Wenlong, Ye Yipeng, et al. Optimization of medical supplies dispatching in the early stage of public health outbreaks [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(11): 65-72.
- [4] 罗振敏, 齐柯, 程方明. 应急物资储备库选址及调运模型研究综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(19): 8177-8186.
Luo Zhenmin, Qi Ke, Cheng Fangming. Review of research on emergency material reserve site selection and transportation models [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(19): 8177-8186.
- [5] Liu Y, Wang M, Wang Y. Location decision of emergency medical supply distribution centers under uncertain environment [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2024, 26: 1567-1603.
- [6] Wang Y, Zhou X, Bai G. Site selection of multi-level material bases in coal mine considering the hierarchical reserve mode and demand difference—a case study [J]. IEEE Access, 2024, 12: 36479-36497.
- [7] 周旦, 杨瑞新, 顾国斌, 等. 城市应急医疗物资集配中心选址评价优化方法[J]. 深圳大学学报(理工版), 2022, 39(5): 584-592.
Zhou Dan, Yang Ruixin, Gu Guobin, et al. Evaluation and optimization method for urban emergency medical supplies distribution center [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2022, 39(5): 584-592.
- [8] Jiao Y, Li Z, Ge W, et al. A study on siting of emergency shelters for dam failure floods considering population distribution and weather effects[J]. Science of the Total Environment, 2024, 914: 169901.
- [9] 杨洋, 武志磊, 王晓霞, 等. 不确定需求下物流配送网点选址多目标优化及仿真[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(14): 5994-6002.
Yang Yang, Wu Zhilei, Wang Xiaoxia, et al. Multi-objective optimization and simulation of logistics distribution site selection under uncertain demand [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(14): 5994-6002.
- [10] 龙圣杰, 张得志, 李双艳, 等. 考虑患者转运的跨区域动态协同应急物流选址-分配优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(4): 1391-1401.
Long Shengjie, Zhang Dezhi, Li Shuangyan, et al. Cross-regional dynamic collaborative emergency logistics location-allocation optimization considering patient transfer [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(4): 1391-1401.
- [11] 宋英华, 裴俊龙, 方丹辉, 等. 常态化疫情防控背景下区域应急医疗物资选址-分配模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(11): 5-9.
Song Yinghua, Pei Junlong, Fang Danhui, et al. Regional emergency medical supplies site selection and distribution model under the background of normalized epidemic prevention and control [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(11): 5-9.
- [12] 郑斐峰, 陈克政, 刘明. 突发疫情下基于机会约束的应急医疗设施建设选址与公平配置优化[J]. 控制与决策, 2024, 39(8): 2783-2790.
Zheng Feifeng, Chen Kezheng, Liu Ming. Location selection and equitable allocation optimization for emergency medical facility construction under sudden epidemic based on chance constraints [J]. Control and Decision, 2024, 39(8): 2783-2790.
- [13] Yan X, Hou H, Yang J, et al. Site selection and layout of material reserve based on emergency demand graduation under large-scale earthquake [J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1236.
- [14] 郭冰, 靖可, 龚逢能. 灾后初期考虑需求及时间不确定的应急物资配送中心选址-分配优化[J]. 大连海事大学学报, 2023, 49(2): 121-130.
Guo Bing, Jing Ke, Gong Fengneng. Optimization of site selection and distribution of emergency material distribution centers considering demand and time uncertainty in the early post-disaster period [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2023, 49(2): 121-130.
- [15] 于冬梅, 高雷阜, 赵世杰. 中断情境下可靠性应急设施选址-分配多目标优化模型[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1415-1420.
Yu Dongmei, Gao Leifu, Zhao Shijie. Multi-objective optimization model of location and allocation of reliability emergency facilities under interruption scenarios [J]. Control and Decision, 2020, 35(6): 1415-1420.
- [16] 储旭, 宁爱兵, 胡开元, 等. 疫情期间生活物资集散点选址问

- 题的降阶回溯算法[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(8): 2351-2360.
- Chu Xu, Ning Aibing, Hu Kaiyuan, et al. Reduced-order backtracking algorithm for location selection of daily supplies distribution points during the epidemic [J]. Application Research of Computers, 2023, 40(8): 2351-2360.
- [17] 刘晋, 邹瑞, 韩琦, 等. 基于自适应遗传算法的应急物资储备库选址及物资调配优化研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(1): 295-302.
- Liu Jin, Zou Rui, Han Qi, et al. Research on emergency material reserve location selection and material allocation optimization based on adaptive genetic algorithm [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(1): 295-302.
- [18] Wang Y, Huang S Q, Liu Y, et al. Study on optimization of logistics multiple distribution center location based on K -means clustering method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(1): 141-148.
- [19] 吕楠, 赵敬源. 基于贝叶斯概率理论的物流园区选址优化研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 251-260.
- Lü Nan, Zhao Jingyuan. Research on logistics park location optimization based on Bayesian probability theory [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 251-260.
- [20] 程东亚, 张小林, 李红波. 变形泰森多边形理论在乡村快递点布局影响因素分析中的应用[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(9): 2140-2160.
- Cheng Dongya, Zhang Xiaolin, Li Hongbo. Application of deformed Thiessen polygon theory in analyzing influencing factors of rural express point layout [J]. Journal of Geo-Information Science, 2024, 26(9): 2140-2160.
- [21] Li Q, Wang W, Chai B, et al. Analysis on lag effect of typhoon-induced landslide: a case study of typhoon Lekima in Qingtian County, Zhejiang Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 10-19.
- [22] 张晓彬, 于渤. 基于皮尔森相关性分析和BP神经网络的北京城市雾霾治理对策[J]. 系统工程, 2023, 41(2): 26-34.
- Zhang Xiaobin, Yu Bo. Countermeasures for Beijing urban haze control based on Pearson correlation analysis and BP neural network [J]. Systems Engineering, 2023, 41(2): 26-34.