

# 控制与决策

Control and Decision

## 考虑多重覆盖的应急设施多级协同布局鲁棒优化

张得志, 乔馨, 李双艳, 李双琳, 张雅睿

引用本文:

张得志, 乔馨, 李双艳, 李双琳, 张雅睿. 考虑多重覆盖的应急设施多级协同布局鲁棒优化[J]. *控制与决策*, 2022, 37(7): 1853–1861.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0687>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于鲁棒优化的云医疗资源配置问题

Robust optimization based medical resource allocation problem in cloud healthcare system

*控制与决策*. 2021, 36(2): 469–474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0455>

### 考虑气动效应不确定性的气动辅助变轨制导算法

Aeroassisted orbital transfer robust guidance method considering atmosphere effect uncertainty

*控制与决策*. 2020, 35(11): 2773–2779 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0333>

### 丢包和量化约束下的不确定系统分布式滚动时域估计

Distributed moving horizon estimation for stochastic uncertain system with packet dropouts and quantized measurements

*控制与决策*. 2021, 36(7): 1771–1778 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1603>

### 考虑效率和公平的跨区域协同应急救援路径选择

Routing optimization of cross-regional collaborative emergency rescue considering efficiency and fairness

*控制与决策*. 2021, 36(2): 483–490 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0919>

### 基于强化学习的小型无人直升机有限时间收敛控制设计

Finite time control based on reinforcement learning for a small-size unmanned helicopter

*控制与决策*. 2020, 35(11): 2646–2652 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0328>

# 考虑多重覆盖的应急设施多级协同布局鲁棒优化

张得志<sup>1†</sup>, 乔馨<sup>1</sup>, 李双艳<sup>2</sup>, 李双琳<sup>1</sup>, 张雅睿<sup>1</sup>

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2. 中南林业科技大学 物流与交通学院, 长沙 410004)

**摘要:** 应急设施的合理布局是灾后实现物资高效、公平和稳定供应的重要保障. 针对突发自然灾害的不确定性, 研究基于多重覆盖的应急设施多级协同布局鲁棒优化问题. 首先, 提出多级设施选址下的多重覆盖水平函数, 以最小覆盖水平和期望总成本最优为目标, 建立应急设施多级协同选址双目标优化模型; 其次, 应用基数不确定集和  $p$ -鲁棒方法构建两类鲁棒优化模型, 分别研究场景内不确定需求和随机场景对设施布局的影响; 最后, 以湖南省救灾备荒种子储备库选址为例进行实证分析, 验证所提出优化模型的有效性. 研究表明: 多级协同布局相比传统布局方案更具优势; 鲁棒优化模型能够有效应对不确定情形和随机场景下的物资需求; 决策者的风险偏好程度和预算水平对设施协同布局有重要影响, 需对二者进行综合权衡.

**关键词:** 应急物流; 多级选址; 协同布局; 需求不确定; 鲁棒优化; 实证分析

中图分类号: F224.3; O224

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0687

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 张得志, 乔馨, 李双艳, 等. 考虑多重覆盖的应急设施多级协同布局鲁棒优化[J]. 控制与决策, 2022, 37(7): 1853-1861.

## Robust optimization of hierarchical cooperative layout of emergency facilities considering multiple coverage

ZHANG De-zhi<sup>1†</sup>, QIAO Xin<sup>1</sup>, LI Shuang-yan<sup>2</sup>, LI Shuang-lin<sup>1</sup>, ZHANG Ya-rui<sup>1</sup>

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. College of Logistics and Transportation, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** The rational layout of emergency facilities is an important guarantee for efficiency, fairness and stability of resource supply in post-disaster. Aiming at the uncertainty of sudden natural disasters, we study the robust optimization of hierarchical collaborative location of emergency facilities based on multiple coverage. Firstly, a multiple coverage level function is formulated based on the hierarchical facility location, and a bi-objective model of hierarchical collaborative location of emergency facilities is presented with the optimization objectives of minimum coverage level and expected total cost. Then, two kinds of robust optimization models are developed by applying the cardinal uncertainty set and the  $p$ -robust method to explore the influence of uncertain demand and random scenario on the facility layout. Finally, an empirical analysis on the location of seed reserve in Hunan province is carried out to validate the proposed models. The results show that there is a clear advantage to the layout solved by the collaborative location model over the traditional layout. The robust optimization models can effectively deal with the demand under the uncertainty and random scenario. The collaborative layout of facilities is affected significantly by the risk preference and budget level of decision-makers, so it is necessary to make a comprehensive trade-off between these.

**Keywords:** emergency logistics; hierarchical location; cooperative layout; demand uncertainty; robust optimization; empirical analysis

## 0 引言

应急设施布局优化是应急物流系统优化重要的基础性工作,其本质在于构建快速响应、高效公平、保障有力的应急网络,以确保灾后物资供应的及时性和

经济性<sup>[1]</sup>. 美国联邦应急管理署将灾害管理划分为防灾减灾、备灾、应急响应和恢复重建4个阶段<sup>[2]</sup>,作为灾后响应和恢复阶段的基础,应急设施布局优化直接影响到应急过程中的物资供应效率. 我国应急

收稿日期: 2021-04-21; 录用日期: 2021-08-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72074073, 71672193).

责任编委: 李勇建.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: dzzhang@csu.edu.cn.

管理部门依照“属地管理,多级协同”原则,旨在形成“省-市-县-乡”多级差异化物资储备管理体系,然而,目前应急实践中,仍存在储备设施布局不协调、资源不匹配、共享能力弱等问题.此外,应急事件的突发性意味着其发生时间、地点以及物资需求量等存在很大的不确定性.因此,考虑灾害场景的随机性以及物资需求不确定性,对多级应急设施进行协同布局优化,从而保障物资供应的时效性和稳定性,具有重要的现实意义.

应急选址属于设施选址问题的范畴,经典选址模型主要包括 $P$ -中位、 $P$ -中心、最大覆盖和集覆盖等.集覆盖问题经相应拓展研究,衍生出备用覆盖、广义最大覆盖、渐近覆盖以及多级覆盖选址等模型,其中多级覆盖选址模型具有管理流程简单、管理效率高、责任明确、专业性强等特点,广泛应用于应急与公共设施选址相关研究中<sup>[3-5]</sup>.近年来,国内外学者对多级选址问题进行拓展研究,取得了较为丰富的研究成果.肖俊华等<sup>[3]</sup>在传统无容量限制的多级覆盖选址模型的基础上增加容量限制,建立了带容量约束的双目标多级覆盖选址模型,并设计启发式算法进行求解.宋艳等<sup>[4]</sup>结合备用覆盖模型,研究了应急储备设施点的多级备用覆盖选址决策问题.段倩倩等<sup>[6]</sup>在多级应急物资储备体系中综合考虑多阶段、多主体和跨区域协同目标,建立多级选址优化模型,设计迭代算法进行求解.Ma等<sup>[7]</sup>引入“补充选址”概念,建立多级应急设施选址-分配模型,并在京津冀地区进行了实证研究.目前,已有的研究主要以成本或覆盖水平为优化目标,未充分考虑应急物资配送公平性.此外,在覆盖水平函数中同时考虑时效性和不同等级设施覆盖能力差异性的研究成果较少.

突发事件的不可预测性,使得灾前设施选址和应急资源储备决策面临严峻考验,如何在应急准备阶段提高设施选址的可靠性和抗风险能力成为当前研究的一个热点问题.Dönmez等<sup>[8]</sup>认为影响应急选址决策的不确定因素来自需求<sup>[9-11]</sup>、供应<sup>[11-12]</sup>以及网络连通性<sup>[11]</sup>3个方面.Bai等<sup>[13]</sup>建立了模糊风险值模型,对非常规事件的资源预置方案进行优化.Mohamadi等<sup>[14]</sup>提出了一个双目标随机模型,用于灾后在供应中断时提供备用服务的应急设施布局.Haghi等<sup>[15]</sup>为解决需求和供应不确定的应急服务设施选址问题,建立了一个多目标鲁棒优化选址-分配模型.目前处理不确定性的方法中,模糊规划需要掌握不确定参数的相关隶属函数,具有较强的主观性.随机规划在充分刻画参数分布的前提下,通过求

解目标期望值进行不确定性选址决策,但其结果优劣往往取决于参数分布的准确性.此外,由于追求全局最优,得到的解可能导致特定场景下的结果表现较差.鲁棒优化假设参数位于不确定区间内,更适用于突发灾害这类不可预测事件<sup>[16]</sup>.

应急物资储备库是灾后应急的重要基础设施,在保证公平性、满足灾后应急需求和相应财经预算条件下,考虑应急物资需求不确定和随机场景对选址结果的影响,进行应急物资储备库多级协同布局.基于此,本文采用随机离散场景模拟不确定需求,通过优化多重覆盖下最小覆盖水平和期望总成本两个目标,构建应急储备库多级协同选址多目标模型.此外,提出两类鲁棒优化方法,分别研究场景内的需求不确定性和跨场景的相对遗憾值,针对两种不同的鲁棒性,通过优化各级应急物资储备库的数量、位置和库容,实现灾前设施协同布局和应急资源合理储备,并以湖南省救灾备荒种子储备库选址布局优化为例,进行实证分析.

## 1 问题分析与建模

### 1.1 问题描述及假设

应急服务水平是衡量设施选址方案优劣的重要指标,常见的描述服务水平的参数包括距离/时间、需求满意度以及覆盖水平等<sup>[8]</sup>.在实际应急工作中,一个需求点可能不止由一个应急储备库负责,考虑到不同等级储备库具备不同的容量和覆盖能力,本文扩展经典覆盖模型中关于覆盖水平的定义,构造考虑多级应急储备库选址的多重覆盖水平函数.如图1所示,将应急储备库划分为3个等级,即 $l = \{1, 2, 3\}$ .对于每一个需求点,根据应急储备库到需求点的相应地理范围划分为不同等级的集合.用 $SU_c$ 表示需求点 $c$ 级覆盖的应急储备库集合, $c = \{1, 2, 3\}$ ,即每个需求点共三级覆盖,分别为核心覆盖、区域覆盖和边缘覆盖.

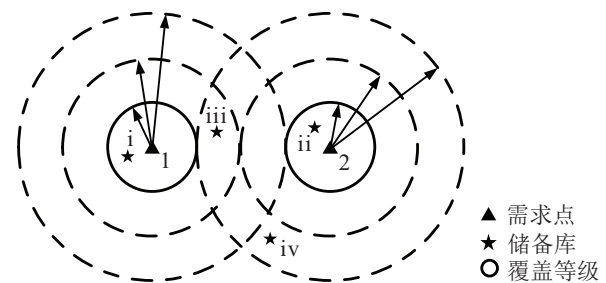


图1 多重覆盖示意图

由图1可见,需求点1的1级覆盖储备库集合为 $SU_1 = \{i\}$ ,2级覆盖储备库集合为 $SU_2 = \{iii\}$ ,需求点2的1级覆盖储备库集合为 $SU_1 = \{ii\}$ ,3级覆盖储备库集合为 $SU_3 = \{iii, iv\}$ .

对于某一需求点,若其覆盖范围内有一 $l$ 级储备库,且为 $c$ 级覆盖,则其线性覆盖水平函数表达式为

$$C = \sum_{c \in C} \rho_c \sum_{l \in L} p_{cl}. \quad (1)$$

其中: $\rho_c$ 为覆盖等级 $c$ 对应的覆盖率权重, $p_{cl}$ 为覆盖等级 $c$ 与应急物资储备库等级 $l$ 对应的覆盖率.

基于上述覆盖水平函数,提出考虑多重覆盖的应急物资储备库多目标选址优化模型,对不同级别储备库进行协同布局.同时建立不确定需求和跨场景 $p$ -鲁棒两类鲁棒随机优化模型,要求规划稳健的储备库选址和物资分配方案,使得最小覆盖水平最大,并尽可能减少期望总成本.模型相关假设如下:

- 1) 应急物资配送采取“多对多”模式,即一个储备库可负责多个需求点,需求点物资可由多个储备库供应,并保证需求全部满足.
- 2) 不同级别应急储备库对应不同容量水平.
- 3) 不同覆盖等级对应不同的覆盖率权重.
- 4) 不同级别应急储备库和覆盖等级对应不同的覆盖率.
- 5) 候选储备库、需求点之间运输时间为固定值.

### 1.2 符号说明

本节涉及的数学符号及说明如表1所示.

表1 建立模型所用变量

符号	说明
$S$	灾害场景集合
$C$	储备库地理覆盖等级集合
$L$	储备库建设等级集合
$I$	备选储备库集合
$J$	需求点集合
$\rho_c$	覆盖等级 $c$ 对应的覆盖率权重
$p_{cl}$	需求点覆盖等级 $c$ 和应急物资储备库建设等级 $l$ 对应覆盖率
$d_{ij}$	候选储备库 $i$ 和需求点 $j$ 间的距离
$D_c$	$c$ 级覆盖允许的最大距离
$\delta_{il}$	储备库建设等级判断矩阵
$\theta_{ijc}$	储备库覆盖等级判断矩阵
$c_{il}$	在 $i$ 处建设 $l$ 级应急储备库的固定成本
$q$	应急物资单位采购成本
$t$	应急物资单位存储成本
$h$	应急物资单位运输成本
$n_l$	$l$ 级应急储备库的最低建设数量
$\min_l$	$l$ 级应急物资储备库的容量下限
$\max_l$	$l$ 级应急物资储备库的容量上限
$m_j^s$	第 $s$ 种场景下需求点 $j$ 的物资需求量
$P^s$	第 $s$ 种场景发生的概率
$x_{il}$	决策变量,建设 $l$ 级储备库 $i$ 时为1,否则为0
$y_{ijcl}^s$	决策变量, $l$ 级 $i$ 点负责 $j$ 点且为 $c$ 级覆盖时为1,否则为0
$z_i$	决策变量,应急储备库 $i$ 点的物资储备量
$w_{ij}^s$	决策变量,场景 $s$ 下应急储备库 $i$ 向需求点 $j$ 配送的物资数量

### 1.3 多目标随机规划模型

建立考虑多级覆盖的应急储备库随机选址-分配模型model-1如下:

$$\max f_1 = \min_{s \in S, j \in J} \sum_{c \in C} \rho_c \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} p_{cl} y_{ijcl}^s; \quad (2)$$

$$\min f_2 = \sum_{s \in S} P_s \left[ \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} c_{il} x_{il} + (q + t) \sum_{i \in I} z_i + h \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} w_{ij}^s \right]. \quad (3)$$

$$\text{s.t. } x_{il} \leq \delta_{il}, \forall l \in L, i \in I; \quad (4)$$

$$y_{ijcl}^s \leq \theta_{ijc} x_{il}, \quad \forall s \in S, c \in C, l \in L, i \in I, j \in J; \quad (5)$$

$$\sum_{l \in L} x_{il} \leq 1, \forall i \in I; \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} x_{il} \geq n_l, \forall l \in L; \quad (7)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} y_{ijcl}^s \geq 1, \forall s \in S, j \in J; \quad (8)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{l \in L} y_{ijcl}^s \geq w_{ij}^s, \forall s \in S, i \in I, j \in J; \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} w_{ij}^s \geq m_j^s, \forall s \in S, j \in J; \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} w_{ij}^s \leq z_i, \forall s \in S, i \in I; \quad (11)$$

$$\sum_{l \in L} \min_l x_{il} \leq z_i \leq \sum_{l \in L} \max_l x_{il}; \quad (12)$$

$$x_{il}, y_{ijcl}^s \in \{0, 1\}; \quad (13)$$

$$z_i, w_{ij}^s \in Z^+. \quad (14)$$

其中:式(2)和(3)为目标函数;式(2)为公平性目标,表示最大化所有灾害场景下各需求点的最小覆盖水平;式(3)为经济性目标,表示最小化期望总成本,包括储备库固定建设和维护成本、采购和存储成本以及期望运输成本;式(4)~(14)为约束条件,式(4)规定在允许级别范围内建设储备库;式(5)表示储备库建立后才能在配送范围内负责需求点;式(6)表示每个候选点至多只能建设1个储备库;式(7)为各级储备库建设数量约束;式(8)表示每个场景下任何一个需求点至少被一个储备库所覆盖;式(9)表示在覆盖范围内方能安排物资配送;式(10)表示各储备库可为同一需求点进行配送,且总配送量必须满足需求;式(11)表示配送量不能超过该点储备量;式(12)表示最低、最高库存容量约束;式(13)和(14)分别为0-1约束和非负约束.

1.4 基于epsilon-约束法的单目标模型

上述模型中包含最小覆盖水平和期望总成本两个优化目标,常见的求解多目标优化的方法有加权法和法、TOPSIS法和epsilon-约束法.与前两种方法相比,epsilon-约束法无需对不同量纲目标进行加权求和或新增变量,而是将次要目标转化为约束,通过权衡目标间的对抗关系,产生一组Pareto最优解.

基于应急工作的弱经济性,将model-1中最小覆盖水平  $f_1$  作为主要优化目标.期望总成本  $f_2$  作为次要优化目标.同时由于  $f_1$  非线性,需对模型进行线性化处理,其转换过程如下:

1) 引入辅助决策变量  $\mu$  代替目标函数  $f_1$ ,并增加如下约束:

$$\mu \leq \sum_{c \in C} \rho_c \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} p_{cl} y_{ijcl}^s, \forall s \in S, j \in J. \quad (15)$$

2) 分别求出两个目标函数的最优解  $f_1^*$  和  $f_2^*$ ,将  $f_2$  转换为预算约束,规定  $f_2$  可在阈值  $\varepsilon$  内取值,其中  $\varepsilon \geq f_2^*$ ,通过调整  $\varepsilon$  的大小,获取帕累托前沿.基于epsilon-约束法的线性模型model-2为

$$\max f_1 = \mu. \quad (16)$$

$$\text{s.t.} \sum_{s \in S} P_s \left[ \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} c_{il} x_{il} + (q+t) \sum_{i \in I} z_i + \right. \\ \left. h \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} w_{ij}^s \right] \leq \varepsilon; \quad (17)$$

$$\mu \in Z^+; \quad (18)$$

$$\text{式(4)} \sim \text{(15)}.$$

2 鲁棒优化模型

2.1 需求不确定鲁棒优化模型

在应急设施布局优化问题中,不确定性对选址、分配决策起着决定性影响<sup>[17]</sup>.为有效规避不确定性参数对模型解的扰动,更准确地描述不确定性需求的波动情况,采用文献[18]提出的基数不确定集方法,将model-2中的需求相关约束转换为鲁棒对等式,即

$$\Phi_j^{m^s} = \left\{ m_j^s : \frac{|m_j^s - \bar{m}_j^s|}{\hat{m}_j^s} \leq \Gamma_j^{m^s}, \forall s \in S, j \in J \right\}. \quad (19)$$

如式(19)所示,假设各场景各需求点的应急物资需求量  $m_j^s$  为基数不确定性集合  $\Phi_j^{m^s}$ ,即有界的对称区间集合,  $m_j^s \in [\bar{m}_j^s - \hat{m}_j^s, \bar{m}_j^s + \hat{m}_j^s]$ .其中:  $\bar{m}_j^s$  为需求的名义值,  $\hat{m}_j^s$  为需求的最大偏离值.引入不确定预算参数  $\Gamma_j^{m^s}$  描述需求量的不确定程度,其中  $\Gamma_j^{m^s} \in [0, 1]$ .当  $\Gamma_j^{m^s} = 0$  时问题为确定性问题,随着  $\Gamma_j^{m^s}$  逐渐增大,求解结果逐渐趋于保守;当  $\Gamma_j^{m^s} = 1$  时将获得最为保守的解;基于基数不确定的多场景随机鲁

棒模型model-3为

$$\max f_1 = \mu. \quad (20)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i \in I} w_{ij}^s \geq \bar{m}_j^s + \Gamma_j^{m^s} \hat{m}_j^s, \forall s \in S, j \in J; \quad (21)$$

$$\text{式(4)} \sim \text{(9)}、\text{(11)} \sim \text{(15)}、\text{(17)} \text{和} \text{(18)}.$$

2.2 随机p-鲁棒优化模型

多场景随机优化的求解结果往往不能保证每个场景的目标值也为最优<sup>[19]</sup>,为探究其跨场景鲁棒性,考虑建立基于model-2的随机p-鲁棒优化模型.

p-鲁棒模型多应用于目标为最小化成本的多场景随机规划问题,model-2为考虑期望总成本约束、最大化最小覆盖水平的问题,于是在传统问题的基础上<sup>[19]</sup>提出最大化问题的p-鲁棒定义.

定义1 设  $\xi_s^*$  分别为各场景  $s$  下确定性规划问题的最优解,  $\xi_s$  为多场景下可行解  $X$  对应各场景  $s$  的目标值,对于参数  $p$ ,若满足下述条件:

$$\frac{\xi_s^* - \xi_s}{\xi_s^*} \leq p, \quad (22)$$

则称解  $X$  对各场景p-鲁棒.

当  $p$  取得最小值并满足下列多场景随机p-鲁棒模型model-4中的约束时,即为跨场景中鲁棒性最优的解:

$$\max f_1 = \mu. \quad (23)$$

$$\text{s.t.} \xi_s \geq (1-p)\xi_s^*, \forall s \in S; \quad (24)$$

$$\text{式(4)} \sim \text{(15)}、\text{(17)} \text{和} \text{(18)}.$$

model-4的可行性取决于式(22)中相对遗憾值  $p$  的选择,Tian等<sup>[20]</sup>的研究表明,  $p$  是一个任意数,以往文献多采用启发式方法求解p-鲁棒最优解.本文根据递归思想,提出一种迭代算法计算最小相对遗憾值,具体步骤如下.

step 1: 初始化迭代参数  $t = 0$ ,求解各场景  $s$  下model-2的最优解,得到目标函数  $\xi_s^*$ .

step 2: 求解model-2,得到最优解  $\{X, Y, Z, W\}^t$ .

step 3: 计算最优解在各场景下的目标函数  $\xi_s^t$ .

step 4: 计算场景  $s$  的相对遗憾值  $p_s^t = (\xi_s^* - \xi_s^t) / \xi_s^*$ ,令  $p_{\max}^t = \max_{s \in S} \{p_s^t\}$ .

step 5: 令  $t = t + 1$ ,相对遗憾值  $p^t = p_{\max}^{t-1} \times \phi$ ,期望总成本约束  $\varepsilon^t = \varepsilon^{t-1} \times (1 + t\psi)$ ,求解model-4,若可行,则得到最优解  $\{X, Y, Z, W\}^t$ ,转入step 3;若不可行,则终止迭代.

该算法中,step 1优化各场景下的model-2,以求解单场景下的目标值;step 2求解model-2的最优解,step 3计算各场景对应的目标函数;step 4计算相对遗憾值  $p$ ;step 5通过定义缩放系数  $\phi$ ,递归求解model-4,

寻找最小相对遗憾值,直至出现不可行解.由于模型中含约束(17),由原问题的目标函数 $f_2$ 转换而来,与 $f_1$ 相冲突,直接通过迭代算法求解该模型第1次迭代时 $p$ -鲁棒模型即不可行,故引入成本松弛系数 $\psi$ ,以便找到松弛条件下的最小遗憾值.

### 3 算例分析

湖南省是我国粮食生产大省,俗有“湖广熟,天下足”之谓,尽管自然条件优越,为农业发展提供了有利的条件,但各类灾害发生种类多、频率高,严重制约了全省农业生产和经济发展.据应急管理部门统计,2019年全省共发生旱涝、风雹和雨雪冰冻等灾害30余次,各类自然灾害共造成农作物受灾面积99万公顷,绝收面积17.9万公顷,直接经济损失高达242.6亿元.在所有保障粮食产量增产、农业生产安全的保障政策中,救灾备荒种子储备是最为直接有效的方法之一.本文以湖南省应急储备库选址为背景,救灾备荒种子储备为研究对象,对多级储备库协同布局鲁棒模型进行求解和分析.

#### 3.1 参数设置

算例设定需在湖南省内建设一个省级和多个区域级及区县级救灾种子储备库,其中省级和区域级候选点为长沙、株洲、湘潭等14个地级行政区划,区县级候选点为全省122个县级行政区划.由于自然灾害发生频率和损失难以预测,采用场景生成法,参考湖南省各区县粮食种植成灾面积历史统计数据,尽可能覆盖全省所有区县,随机生成50个灾害场景,计算各场景下需求点(区县)救灾种子需求量,各节点距离数据为实际行车距离,通过调用百度API获取;需求点覆盖等级、应急物资储备库等级及覆盖率之间的关系如表2所示.模型相关参数由实际调研确定,具体设置如表3所示.

系如表2所示.模型相关参数由实际调研确定,具体设置如表3所示.

表2 多重覆盖等级及储备库等级对应覆盖率 %

	省级	区域级	区县级
核心覆盖	90	80	70
区域覆盖	60	50	40
边缘覆盖	30	20	10

表3 测算参数数据

参数	单位	参考值	参数	单位	参考值
$\rho_c$	-	{0.53, 0.33, 0.14}	$t$	¥/t	4000
$D_c$	km	{30, 60, 120}	$h$	¥/(t·km)	1.2
$\min_l$	t	{500, 400, 300}	$\phi$	-	0.9
$\max_l$	t	{1000, 700, 400}	$\psi$	-	0.025
$q$	¥/t	10000			

本文在Java平台上对模型进行编码,并调用CPLEX求解,求解器所有参数为默认设置.实验均在配置为2.9GHz AMD Ryzen 7 4800H处理器和15.4GB可用内存的计算机上完成,所有算例可在1h内得到最优解.

#### 3.2 多目标分析

本文运用epsilon-约束法对第1.2节中多目标规划模型model-1进行转换,得到model-2,model-2为混合整数线性规划模型.具体多目标分析过程如下.

- 1) 分别求出两目标函数最优值 $f_1^* = 0.413$ ,  $f_2^* = 318\ 700\ 083$ .
- 2) 根据epsilon-约束法,将 $f_1$ 作为主目标函数,设定 $\epsilon \geq 318\ 700\ 083$ ,将期望成本 $f_2$ 转化为预算约束,得到帕累托解集.舍弃预算过高不符合实际的情况,选取其中具有代表性的12组解,如表4所示.

表4 基于epsilon-约束法的多目标求解结果

序号	$\epsilon$ /万元	$f_1$	选址数量			建设成本/万元	采购成本/万元	存储成本/万元	期望运输成本/万元
			总数	区域级	区县级				
1	31 000	-	-	-	-	-	-	-	-
2	31 870	0.014	26	4	21	16 800	10 759	4 303	7.12
3	33 390	0.028	27	5	21	17 600	11 273	4 509	7.48
4	34 090	0.028	28	4	23	18 000	11 487	4 595	7.19
5	34 932	0.042	29	4	24	18 600	11 660	4 664	7.54
6	35 775	0.042	29	6	22	19 000	11 977	4 791	6.43
7	36 554	0.056	31	4	26	19 800	11 961	4 784	7.50
8	37 994	0.056	32	4	27	20 400	12 561	5 024	7.34
9	38 933	0.07	33	5	27	21 200	12 661	5 064	7.00
10	39 730	0.07	34	4	29	21 600	12 946	5 178	6.19
11	41 312	0.098	35	6	28	22 600	13 361	5 344	6.06
12	42 741	0.146	38	2	35	23 600	13 667	5 466	7.02

注: - 表示无可行解.

由表4可以看出,当 $\varepsilon$ 逐渐增大时,目标函数值 $f_1$ 随着 $\varepsilon$ 的增大而增大,同时选址总数及区县级选址数量呈上升趋势,除期望运输成本外的单项成本均逐渐增加,当 $\varepsilon$ 由最小值增加34%至42741万元时,覆盖水平由0.014增至0.146,扩大了10倍;当 $\varepsilon$ 的值小于 $f_2^*$ 时,模型无解.由于两目标函数值无法同时达到最优,决策者可根据实际情况在覆盖水平和期望成本之间权衡,确定合适的选址方案.

### 3.3 选址方案对比分析

现有传统布局中,区县级储备库采取“自下而上”储备模式,即各行政区域自行决定储备规模,再向上级进行报送,存在协同效率较低、资源冗余、浪费等现象.本文从经济性和资源利用率等方面对传统布局与所提出的优化模型结果进行对比,定义资源利用率为多场景中配送量占采购总量比重的期望值.如表5所示,当目标1取值均为0.413,即公平性一致时,以系统经济性为优化目标,多级协同布局能够有效降低期望总成本,其中建设、采购和存储成本均降低40%以上,仅期望运输成本有所增加;在选址结果方面,区县级储备库选址数量减少近50%,资源利用率提升68%.因此,与传统布局相比,多级协同选址在经济性方面更具优势,资源利用率更高,更适用于实际规划中预算受到限制的情况.表中 $X/Y/Z$ 表示选址总数为 $X$ ,区域级选址数量为 $Y$ ,区县级选址数量为 $Z$ .

表5 传统布局与多级协同布局结果对比

	传统布局	多级协同布局
期望总成本/万元	126 143	72 420
建设成本/万元	74 200	41 400
采购成本/万元	37 100	22 154
存储成本/万元	14 840	8 862
期望运输成本/万元	2.78	4.30
选址数量	123/0/122	67/4/62
资源利用率/%	2.37	3.97

### 3.4 不确定需求鲁棒分析

本文认为应急救援种子需求量具有不确定性,即在一定范围内处于波动之中.因此,所得到的方案能否在需求发生波动后依然保持良好的稳健性十分重要,为评价选址方案对不确定需求的适应性,下面对模型进行鲁棒分析.

由上述多目标分析可知,随着预算约束的放松,最小覆盖水平逐渐增大,但实际应急工作中预算往往会受到限制,为探究一定预算水平下,需求不确定

时储备库选址决策与相关成本的变化规律,将其设置为固定值( $\varepsilon = 4$ 亿元),并假设需求在名义值的0%、2.5%、5%、7.5%范围内波动,对模型进行求解,表6为在不同鲁棒水平下的求解结果,表中 $X/Y/Z$ 表示选址总数为 $X$ ,区域级选址数量为 $Y$ ,区县级选址数量为 $Z$ .

表6 不同鲁棒水平下求解结果

	鲁棒水平			
	0%	2.5%	5%	7.5%
目标1	0.07	0.07	0.07	0.056
期望总成本/万元	39917	39913	39913	39927
建设成本/万元	22000	21600	21400	21800
采购成本/万元	12793	13076	13218	12942
存储成本/万元	5117	5230	5287	5176
期望运输成本/万元	6.98	6.84	7.07	7.79
选址数量	35/3/31	33/7/25	33/6/26	34/5/28

在选址决策的变动上,如图2所示,不同预算水平下,选址总数均呈现出减少趋势;在同一鲁棒水平下,预算越高,选址数量越多,对应的目标函数1也越大.决策者需要在预算与鲁棒性之间进行权衡,选择合适的布局方案.

有关各项成本的变化规律由表6可以看出,当在0%~5%的区间内变动时,最低覆盖水平仍能维持在确定性情况下的最优值,但当 $\Gamma_j^{m^s} = 7.5\%$ 时目标1由0.007变为0.056,下降了20%;同时各项成本也随着鲁棒水平的提高发生变化,建设成本在0%~55%鲁棒水平范围内逐渐减少,在 $\Gamma_j^{m^s} = 7.5\%$ 时增加.而采购成本和存储成本的变化趋势与之相反,期望运输成本在较低鲁棒水平下变动不大,当 $\Gamma_j^{m^s} = 7.5\%$ 时增加至确定性水平下的1.16倍.可以发现,在总成本不变的情况下,当需求量出现波动并逐渐升高时,用于采购和存储的成本将有所增加,而建设成本将被缩减,在不确定性到达一定程度时( $\Gamma_j^{m^s} = 7.5\%$ ),逐渐缩小的建设成本和选址数量已不能满足供应需求,求解结果趋于保守,需增加一定数量的储备库.

上述分析均是在期望预算为4亿元时得出,为消除预算水平对分析结果产生影响的可能性,将预算削减5%,即在 $\varepsilon = 3.8$ 亿元时,探究不同鲁棒水平下各类成本的变化规律.如图3所示,发现当 $\Gamma_j^{m^s}$ 在0%~7.5%区间内变动时,不同预算水平下建设成本、采购成本和存储成本的变化基本一致;运输成本仅占总成本约0.02%,对优化结果的影响并不显著,且取值与储备库的选址数量、布局以及特定场景下的物资分配方式均有关,因此其变化趋势无明显规律.

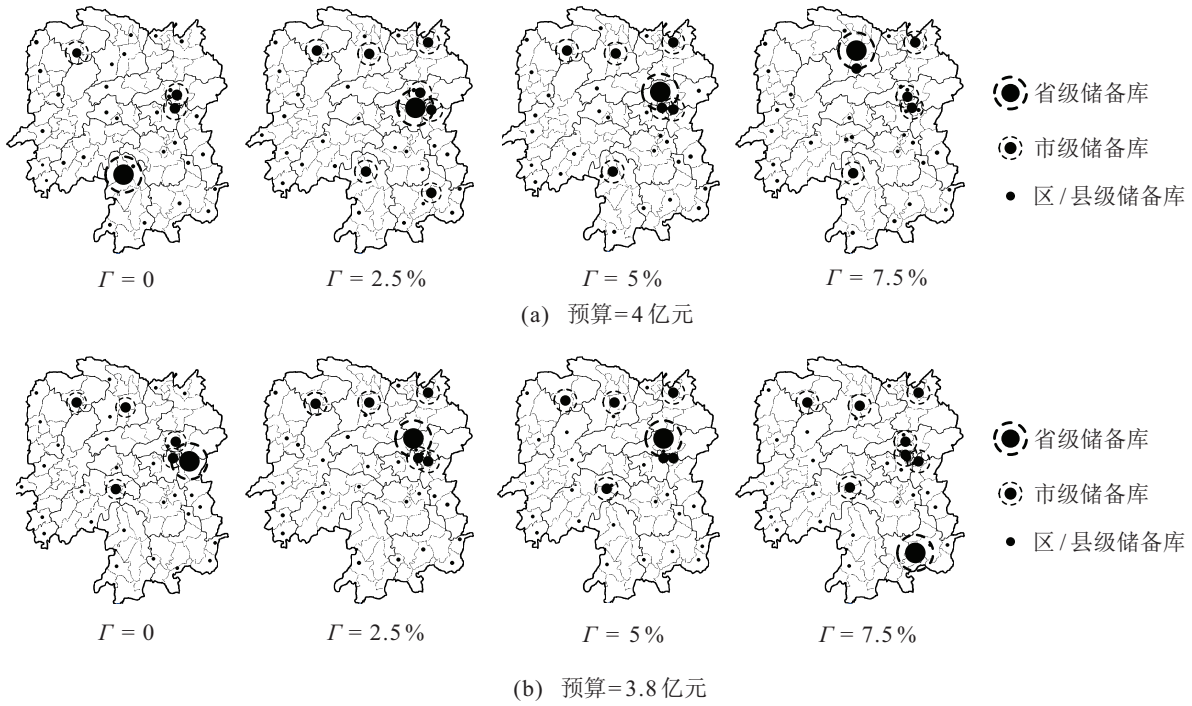


图2 不同预算和鲁棒水平下选址结果

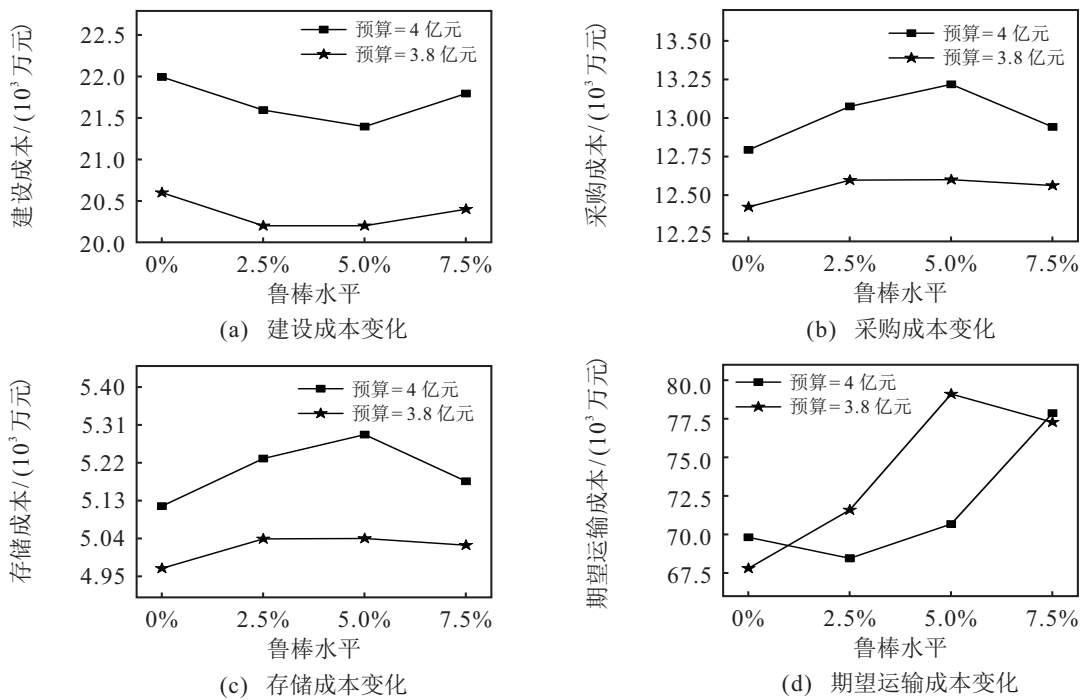


图3 不同鲁棒水平下成本变化

### 3.5 跨场景鲁棒分析

随机规划产生的最优解可能无法在特定场景中达到最优<sup>[11]</sup>,为检验模型跨场景的鲁棒性,使用第2.2节提出的松弛迭代算法进行算例分析.该方法虽不能确定最小相对遗憾值的精确值,但易于快速求解 $p$ -鲁棒模型,能够为选址决策提供参考.

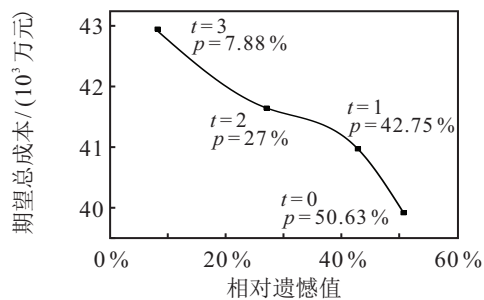
在step 1中,求解单场景随机规划模型model-2,得到目标函数 $\xi_s^*$ ,初始阶段( $t = 0$ )根据多场景随机规划最优解计算各场景目标值 $\xi_s^t$ ,得到最大相对遗

憾值  $p_{\max}^t = \max_{s \in S} \{(\xi_s^* - \xi_s^t) / \xi_s^*\} = 50.63\%$ ,令  $\phi = 0.9$ <sup>[11]</sup>、 $\psi = 0.025$ ,通过逐渐缩小 $p^t$ ,并对预算约束进行松弛,求解model-4,重复上述步骤,获得相对遗憾值 $p_{\max}^t$ 的最小值.表7列出了每次迭代后计算出的期望成本、最优目标值、选址结果及相对遗憾值,在第4次松弛迭代时模型不可行,至此求得的最小相对遗憾值为第3次迭代时的7.88%.表中 $X/Y/Z$ 表示选址总数为 $X$ ,区域级选址数量为 $Y$ ,区县级选址数量为 $Z$ .

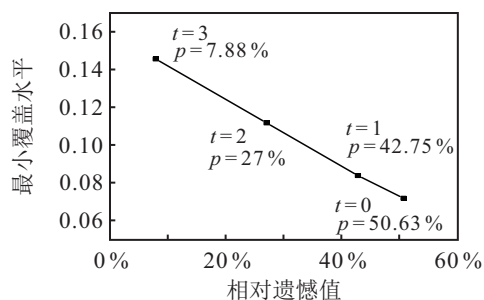
表7 迭代过程求解结果

迭代次数	预算 (万元)	期望总成本 (万元)	目标1	选址数量	相对遗憾值/%
0	40000	39917	0.070	35/3/31	50.63
1	41000	40973	0.084	35/5/29	42.75
2	42000	41650	0.112	36/4/31	27.00
3	43000	42950	0.146	38/2/35	7.88
4	44000	-	-	-	-

图4为迭代过程中相对遗憾值与期望总成本、目标函数的对应关系。当相对遗憾值由初始值50.63%减小至7.88%时,选址数量由35增加到38个,对应的期望总成本增加了7.6%,同时目标函数提升了109%。由此可知,覆盖水平的提高和跨场景的稳健性需要以增加预算为代价,适当增加预算有利于实现目标函数和相对遗憾值的大幅优化。在现实场景中,预算往往会受到严格的控制,因此决策者需在两者之间进行权衡,结合实际预算建设储备库。



(a) 期望总成本变化规律



(b) 最小覆盖水平变化规律

图4 相对遗憾值与期望总成本、最小覆盖水平关系

## 4 结论

针对现有应急管理实践中存在的储备设施布局不均衡、协同能力差等问题,本文从多级协同视角,研究考虑多重覆盖的应急设施多级协同布局鲁棒优化问题,构造应急设施的覆盖水平函数。在此基础上,建立基于多重覆盖的应急物资储备设施多级协同选址多目标鲁棒优化模型,运用epsilon-约束法处理双目标模型。针对需求不确定的特征,提出了两类鲁棒优化模型:1)考虑各场景下物资需求的不确定性,

根据基数不确定集方法,将不确定参数相关约束转换为鲁棒对等式,建立鲁棒优化模型;2)基于跨场景的鲁棒性,构造相应的p-鲁棒优化模型,并设计松弛迭代算法求解最小相对遗憾值。最后,针对上述两类鲁棒优化模型,以湖南省应急物资储备库协同布局为例进行案例研究。结果表明:基于多重覆盖的多级协同选址模型求解的布局方案较传统布局模式,能够有效改善各层级储备库间协同能力,提高资源利用率;鲁棒优化模型能够有效处理不确定情形和随机场景下应急物资需求。

本文建立的多级应急设施选址鲁棒优化模型,同时考虑了公平性和经济性两个目标,但未深入探究各层级储备设施间的协同物资调运机制,并且在多目标的处理方法上有待进一步改善。因此,考虑应急储备设施间存在横向转运的多周期协同布局优化问题以及其高效的求解算法,将是未来值得进一步研究的课题。

## 参考文献(References)

- [1] 王海军, 刘畅, 王婧. 应急储备库选址与资源配置随机规划模型研究[J]. 管理学报, 2013, 10(10): 1507-1511. (Wang H J, Liu C, Wang J. Stochastic optimization models for emergency supplies location and allocation[J]. Chinese Journal of Management, 2013, 10(10): 1507-1511.)
- [2] Federal Emergency Management Agency. The four phases of disaster[R]. Washington: FEMA-Emergency Management Institute, 2004.
- [3] 肖俊华, 侯云先. 带容量限制约束的应急设施双目标多级覆盖选址模型及算法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(12): 3618-3621. (Xiao J H, Hou Y X. Capacitated bi-objective emergency facility location model and algorithm considering multi-level gradual coverage[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(12): 3618-3621.)
- [4] 宋艳, 滕辰妹, 姜金贵. 基于改进NSGA-算法的多级服务设施备用覆盖选址决策模型[J]. 运筹与管理, 2019, 28(1): 71-78. (Song Y, Teng C M, Jiang J G. A decision model of reserve coverage selection for multi-level service facilities based on improved NSGA- algorithm[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(1): 71-78.)
- [5] 陈振南, 吴立志, 夏登友, 等. 基于城市火灾风险的消防站分级覆盖选址模型——以济南市为例[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(7): 18-24. (Chen Z N, Wu L Z, Xia D Y, et al. Hierarchical coverage location model for fire station based on urban fire risk: A case study on urban area in Jinan[J]. Journal of Safety

- Science and Technology, 2020, 16(7): 18-24.)
- [6] 段倩倩, 白鹏飞, 张小咏, 等. 协同视角下多级救灾物资储备体系中的储备库选址模型[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(21): 141-148.  
(Duan Q Q, Bai P F, Zhang X Y, et al. Location model of emergency material storages in multi-level disaster relief resources system under collaborative perspective[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2018, 48(21): 141-148.)
- [7] Ma Y J, Xu W, Qin L J, et al. Hierarchical supplement location-allocation optimization for disaster supply warehouses in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 102-117.
- [8] Dönmez Z, Kara B Y, Karsu Ö, et al. Humanitarian facility location under uncertainty: Critical review and future prospects[J]. Omega, 2021, 102: 102393.
- [9] Hu S L, Han C F, Meng L P. Stochastic optimization for investment in facilities in emergency prevention[J]. Transportation Research—Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 89: 14-31.
- [10] Dufour É, Laporte G, Paquette J, et al. Logistics service network design for humanitarian response in East Africa[J]. Omega, 2018, 74: 1-14.
- [11] Paul J A, Wang X. Robust location-allocation network design for earthquake preparedness[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2019, 119: 139-155.
- [12] 于冬梅, 高雷阜, 赵世杰. 不确定与损毁情景下可靠性设施选址鲁棒优化模型与算法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(2): 498-508.  
(Yu D M, Gao L F, Zhao S J. Robust optimization model and algorithm for reliability facility location under uncertainty and failure scenarios[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2019, 39(2): 498-508.)
- [13] Bai X, Gao J, Liu Y. Prepositioning emergency supplies under uncertainty: A parametric optimization method[J]. Engineering Optimization, 2018, 50(7): 1114-1133.
- [14] Mohamadi A, Yaghoubi S. A bi-objective stochastic model for emergency medical services network design with backup services for disasters under disruptions: An earthquake case study[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2017, 23: 204-217.
- [15] Haghi M, Fatemi Ghomi S M T, Jolai F. Developing a robust multi-objective model for pre/post disaster times under uncertainty in demand and resource[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 154: 188-202.
- [16] Noyan N. Risk-averse two-stage stochastic programming with an application to disaster management[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(3): 541-559.
- [17] 蔡冬雪, 朱建明, 王国庆. 基于情景分析的应急装备多层次协同布局问题研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 72-79.  
(Cai D X, Zhu J M, Wang G Q. Hierarchical collaborative location and allocation of emergency equipment based on scenario analysis[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(10): 72-79.)
- [18] Bertsimas D, Sim M. The price of robustness[J]. Operations Research, 2004, 52(1): 35-53.
- [19] Snyder L V, Daskin M S. Stochastic  $p$ -robust location problem[J]. IIE Transaction, 2006, 38(11): 971-985.
- [20] Tian J F, Yue J F. Bounds of relative regret limit in  $p$ -robust supply chain network design[J]. Production and Operations Management, 2014, 23(10): 1811-1831.

### 作者简介

张得志(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流系统优化、应急物流等研究, E-mail: dzzhang@csu.edu.cn;

乔馨(1996—), 女, 硕士生, 从事应急物流系统优化的研究, E-mail: 194212146@csu.edu.cn;

李双艳(1979—), 女, 副教授, 博士, 从事物流系统优化、绿色物流配送等研究, E-mail: lishuangyan585@163.com;

李双琳(1986—), 男, 讲师, 博士, 从事应急物流、物流系统优化等研究, E-mail: haliven@163.com;

张雅睿(1998—), 女, 硕士生, 从事应急物流系统优化的研究, E-mail: 18186406657@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)