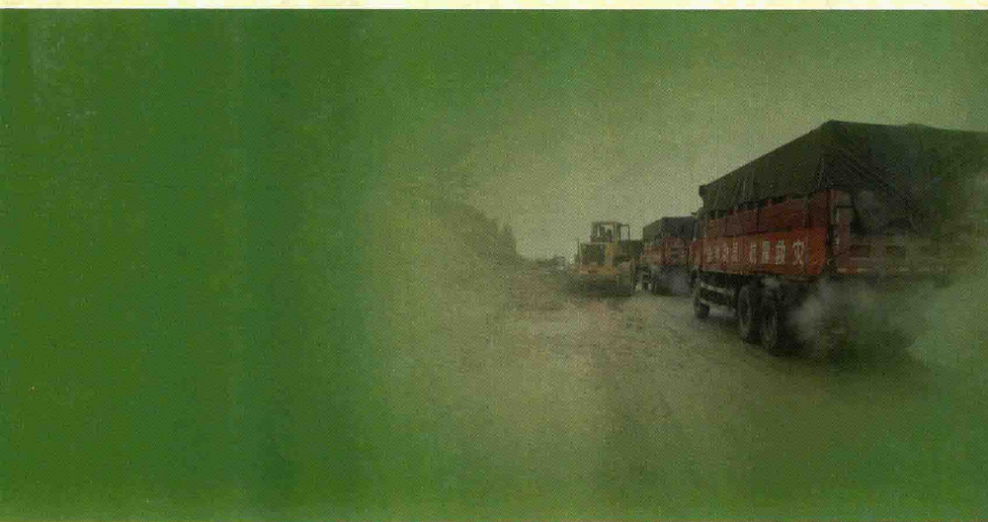


本书由湖南商学院学术著作出版基金资助出版

震后应急物流系统中的 定位—路径问题 (LRP) 研究

Research on Location-routing Problem of
Emergency Logistics System in Post-earthquake

◎ 刘长石 罗 亮 著

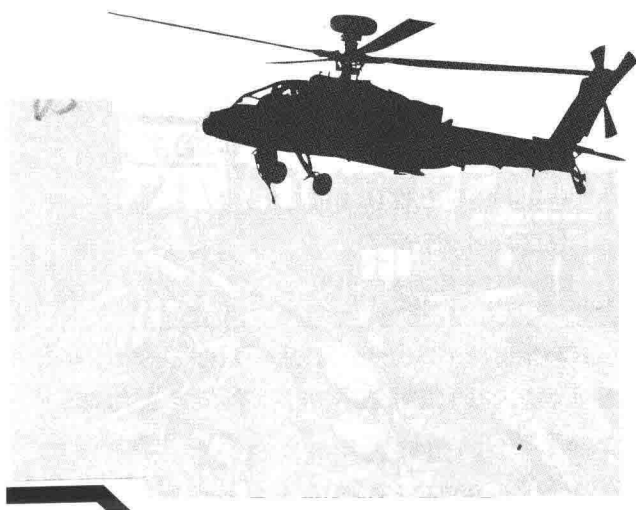


西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

震后应急物流系统中的 定位—路径问题 (LRP) 研究

Research on Location-routing Problem of
Emergency Logistics System in Post-earthquake

◎ 刘长石 罗 亮 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

震后应急物流系统中的定位—路径问题 (LRP) 研究 / 刘长石, 罗亮
著. —西安: 西安交通大学出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-5605-9355-5

I. ①震… II. ①刘…②罗… III. ①地震灾害—物流管理—应急系
统—研究 IV. ①F252

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 007015 号

书 名 震后应急物流系统中的定位—路径问题 (LRP) 研究

著 者 刘长石 罗 亮

责任编辑 魏 杰 贺彦峰

出版发行 西安交通大学出版社

(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>

电 话 (029) 82668357 82667874 (发行中心)

(029) 82668315 (总编办)

传 真 (029) 82668280

印 刷 长沙市宏发印刷有限公司

开 本 880mm×1230mm 1/32 印张 6.375 字数 154 千字

版次印次 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

书 号 978-7-5605-9355-5

定 价 58.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题, 请与本社发行中心联系、调换。

版权所有, 侵权必究

前 言

自古以来，我国一直是一个地震灾害多发国家。尤其是最近 10 年来，地震灾害频发，给人们带来了巨大的人员伤亡与财产损失，例如汶川大地震、玉树地震、雅安地震。为抢救灾区人民群众的生命，尽可能减少地震灾害带来的损失，应急物资必须在震后尽可能短的时间内配送到灾区的各个需求点，尤其是在震后初期救援阶段的搜救设备、医疗设备与药品。开展抗震救灾工作需要多品种、大批量的应急物资。地震灾害的突发性、破坏性与应急物资配送的时间紧迫性，给震后应急物流系统带来了巨大挑战。根据汶川大地震抗震救灾实际工作情况的反馈信息，学者们普遍认为，有效保障应急物资供应的关键在于合理进行应急设施定位分配（Location Allocation Problem, LAP）与科学规划应急车辆行驶路线（Vehicle Routing Problem, VRP）。而且，LAP 与 VRP 之间存在相互依赖、相互影响的关系，必须将二者进行整体设计与优化，即研究震后应急物流系统中的定位—路径问题（Location - Routing Problem, LRP）。

由于应急物流系统内外部存在诸多不确定因素（例如余震、泥石流、疫情暴发），震后应急物资配送过程中经常发生

不同类型的干扰事件 (例如余震导致本来通畅的原定配送路径上的某些道路严重损毁从而使车辆无法通行、灾区部分地区疫情突然大规模爆发导致部分需求点的应急物资需求急剧增加、车辆在服务过程中突然发生故障无法继续配送等)。此时, 决策者如果按照干扰事件发生前制定的初始方案进行应急物资供应, 必然导致部分需求点服务失败。因此, 必须根据干扰事件发生的具体情况进行方案调整, 有效处理干扰事件, 使其对整个震后应急物流系统产生的扰动最小, 保障应急物资配送正常进行。

为此, 本书以震后应急物流系统中的 LRP 为研究对象, 并结合汶川大地震、玉树地震、雅安地震等自然灾害发生后的应急物资配送相关数据, 重点研究震后应急物资配送特性、符合震后应急物资配送不同真实情景的多目标 LRP 优化模型与相应求解算法、震后应急 LRP 中的干扰管理优化模型以及相应求解算法。全书主要内容分为如下 7 个部分。

(1) 震后应急物资配送特性分析。描述了地震的突发性、巨大破坏性、时间持续性与周期性, 分析了震后应急物资需求的复杂性、分级性与动态性, 总结了震后应急物资供应具有时间紧迫性、数量巨大性与应急物流网络复杂性, 震后应急物流系统中的 LRP 具有时间优先性、环境复杂性、供应方式多样性与动态性。

(2) 震后应急物资配送的新 LRP 模型与算法研究。研究震后应急物资配送的一种新 LRP, 即假设震后有 n 个需求点, 在这 n 个需求点内选择 m 个需求点作为没有容量限制的应急物流中心, 并综合考虑应急设施运输能力限制、需求点所在地理位

置和地形导致的应急车辆行驶时间的随机性、需求点应急物资需求量的不确定性与应急物资配送的时间紧迫性,以应急物资总运达时间最短与总配送成本最小为目标,构建一个基于机会约束规划的多目标模糊 LRP 优化模型,并根据模型的特点设计一种混合免疫遗传算法予以求解。最后,给出算例验证了本书提出的方法的可行性与有效性。

(3) 震后应急物资多方式供应中的模糊动态 LRP 模型与算法研究。综合考虑应急物流网络中的模糊需求量、时间窗限制、路网连通损毁与动态恢复情况、车辆随机行驶时间、配送设备运输能力限制以及应急物资分割运输与配送等特性,以应急物资总供应时间最短、总供应费用最小为目标,构建一个震后应急物资多方式供应的多目标模糊 LRP 优化模型,并根据模型的特点设计一种混合蚁群算法予以求解。最后,通过算例验证了本书模型和算法的可行性与有效性。

(4) 公平视角下震后应急物资多方式配送的 LRP 模型与算法研究。将公平理论引入震后应急物资配送,并综合考虑灾区需求点的时间窗限制、部分道路损毁与动态恢复、车辆随机行驶时间、应急物资多方式供应等特性,以应急物资总运达时间最短、应急物资运达需求点的最长等待时间最短为目标,建立一个多品种应急物资多方式公平供应且带限制期的多目标 LRP 优化模型,并根据模型的特点设计一种混合启发式算法予以求解。最后,以汶川大地震应急物资配送过程中的相关数据构造算例进行测试,验证了本书提出的方法的合理性与有效性。

(5) 震后应急 LRP 中的干扰管理模型与算法研究。综合考虑应急物资配送过程中发生的各种干扰事件、灾区路网损毁情

况、需求点的模糊需求量与时间窗限制、多方式供应等因素，以应急物资配送总时间最短构建了震后应急 LRP 的初始配送方案优化模型，并结合行为科学中对人的行为感知的研究方法，从灾区需求点、应急决策部门、应急物流执行者等 3 个方面分析干扰事件对应急物流系统的扰动，在此基础上以系统扰动最小为目标构建一个字典序的干扰管理模型。最后，设计干扰事件处理策略，并根据模型特点设计了一种混合蚁群算法予以求解。算例结果表明了本书提出的方法比全局重优化方法和局部重优化方法更加合理有效。

（6）震后应急物流设施不确定失效情景下的 LRP 研究。震后应急物流设施容易被破坏而失效，应急物资配送必须考虑设施失效情景。综合考虑震后应急路网部分损毁、多方式配送、时间窗限制、车辆随机行驶时间、部分设施被破坏等特性，以应急物流设施最坏失效情景下的需求点覆盖期望最大、应急物资总配送时间最短为目标，采用情景建模方法构建一个应急物流设施失效数目不确定情景下的多目标定位—路径问题（LRP）优化模型，并根据模型特点设计一种混合启发式算法予以求解。最后，通过算例验证了本书模型和算法的可行性与有效性。

（7）关键设施防护情景下应急物资配送的 LRP 研究。震区应急物流设施容易被余震、泥石流等不确定因素破坏从而失效，震后应急物资配送应该考虑设施防护。综合考虑震后应急路网部分损毁、多方式配送、时间窗限制、部分设施被破坏、应急设施保护资源有限等特性，构建一个关键设施防护情景下震后应急物资配送 OLRP 的“防护—破坏—优化”三层主从对策模型，并根据模型特点设计一种免疫遗传算法予以求解。最后，

采用汶川大地震之后第一天的应急物资配送案例验证了本书提出的方法的可行性与有效性。

本研究成果可以有效保障应急物资配送，避免应急物资供需失衡，实现震后应急物资供应的快速响应，降低应急物流系统的总费用，降低地震灾害带来的各种损失与危害，具有重要的理论和实践意义。本研究在理论上补充、丰富了应急物流管理理论与优化方法，为应急物流领域研究提供了新理念和研究方向，为同行提供研究参考；在应用层面上，可以为相关应急管理决策部门提供决策参考。

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究背景与研究意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(5)
1.3 研究内容与研究方法	(20)
1.4 本书结构安排	(22)
第 2 章 震后应急物资配送特性分析	(26)
2.1 地震灾害特性分析	(26)
2.2 震后应急物资需求特性分析	(29)
2.3 震后应急物资供应特性分析	(34)
2.4 震后应急物资供应中的 LRP 分析	(38)
2.5 本章小结	(42)
第 3 章 震后应急物资配送的模糊 LRP	(43)
3.1 引言	(43)
3.2 震后应急物资配送的新 LRP 模型	(45)
3.3 混合免疫遗传算法设计	(52)

3.4	算例分析	(57)
3.5	本章小结	(62)
第4章	震后应急物资多方式供应的动态 LRP	(63)
4.1	引言	(63)
4.2	应急物资供应的多周期模糊动态 LRP 模型	(64)
4.3	混合启发式算法设计	(74)
4.4	算例分析	(77)
4.5	本章小结	(87)
第5章	公平视角下震后应急物资多方式配送的 LRP	(88)
5.1	引言	(88)
5.2	应急物资供应的公平性分析	(89)
5.3	应急物资多方式公平配送的 LRP 模型	(91)
5.4	混合启发式算法设计	(100)
5.5	基于汶川大地震应急物资配送数据的算例分析	(105)
5.6	本章小结	(110)
第6章	震后应急 LRP 中的干扰管理	(112)
6.1	引言	(112)
6.2	震后应急物流过程中的干扰事件分析	(113)
6.3	震后应急 LRP 的初始方案与干扰管理模型	(116)
6.4	混合蚁群算法设计	(124)
6.5	数值验证	(128)

6.6 本章小结	(134)
第7章 应急物流设施不确定失效情景下的 LRP 研究	(135)
7.1 引言	(135)
7.2 数学模型	(137)
7.3 算法设计	(144)
7.4 算例分析	(146)
7.5 本章小结	(151)
第8章 关键设施防护情景下应急物资配送的 OLRP	(152)
8.1 引言	(152)
8.2 关键设施防护下应急物资配送的 OLRP 优化模型	(154)
8.3 免疫遗传算法	(159)
8.4 算例分析	(162)
8.5 本章小结	(168)
第9章 全书总结与展望	(169)
9.1 全书总结	(169)
9.2 展望	(171)
参考文献	(173)

第1章

绪论

.....

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 研究背景

近年来,地震灾害频发,给人类带来了巨大的人员伤亡与财产损失。例如2008年5月12日的中国四川省汶川大地震,造成69227人遇难,374643人受伤,17923人失踪,直接经济损失8452亿元;2010年1月12日海地地震,造成22.25万人死亡,19.6万人受伤;2011年东日本大地震,造成了14063人死亡,经济损失2350亿美元。根据2015年1月17日中国地震局震灾应急救援司发布的官方消息,2014年全球一共发生13次7级以上地震,以海域地震为主,主要分布在环太平洋地震带,仅智利8.1级地震就造成7人死亡和近百人受伤,另有5次5.6级地震造成12人死亡和数百人受伤;中国发生30次5级以上地震,主要分布在西部地区和台湾地区,造成云南、四川和新疆3个省(区)一共624人死亡、112人失踪和3688人受伤。

地震灾害后,必须马上开展抗震救灾工作。抗震救灾工作主要划

分为初期应急救援阶段工作、中期安置阶段工作和后期恢复阶段工作。初期救援阶段时间为震后 0 至 10 天,其中最重要的为震后 0 至 3 天,主要任务是抢救生命、防范次生衍生灾害,应急物资主要为应急抢险设备、医疗设备与药品、部分生活物资等。中期安置阶段时间为震后 11 至 90 天,主要任务为灾民生活安置、正常生活秩序的恢复,应急物资主要为生活类物资。后期恢复阶段时间为灾后的 3 个月至 5 年,主要包括全面恢复重建、灾害损失评估、善后处置和长期心理危机干预等。

开展震后抗震救灾工作需要多品种、大批量的应急物资。为抢救灾区人民群众的生命,尽可能降低地震灾害带来的各种损失,应急物资必须在震后尽可能短的时间内供应到灾区的需求点,尤其是在初期救援阶段。因此,保障应急物资供应是有效开展震后抗震救灾工作的关键。

地震灾害的突发性、破坏性与应急物资供应的时间紧迫性,给震后应急物流系统带来了巨大挑战。根据 2008 年汶川大地震的救灾实际工作情况的反馈信息,震后应急物资供应存在如下亟需解决的问题。

(1) 应急设施如何定位? 综合考虑应急设施选址的可行性与安全性、应急物资需求点的地理分布、应急物资需求量等因素,对应急设施的数量与位置进行合理决策,目的是尽可能缩短应急物资配送总时间,降低应急物资供应总成本。

(2) 如何确定灾区需求点的应急物资供应方式? 综合考虑地震灾区的地形、需求点的地理位置与道路连通情况,合理确定灾区需求点的应急物资供应方式(陆运/水运/空运),目的是保证在规定时间期限内实现应急物资供应。

(3) 应急物资运输/配送路线如何安排? 根据应急车辆、直升机、船只等应急设备的容量,应急救援的时间期限,应急设备行驶速度,

需求点位置等因素,合理安排各个应急物流中心的应急物资运输/配送路线,保障应急物资供应。

学者们普遍认为,有效保障应急物资供应的关键在于合理进行应急设施定位分配(Location Allocation Problem, LAP)与科学规划应急车辆行驶路线(Vehicle Routing Problem, VRP)。而且, LAP 与 VRP 之间存在相互依赖、相互影响的关系,必须将二者进行整体设计与优化,即研究震后应急物流系统中的定位—路径问题(Location - Routing Problem, LRP)。

震后,应急物资供应过程面临诸多不确定因素的干扰。例如余震导致本来通畅的原定配送路径上的道路系统部分瘫痪、灾区部分地区疫情突然大规模爆发导致部分需求点的应急物资需求急剧增加、车辆在运输过程中突然发生故障等。此类事件统称干扰事件。此时,决策者如果按照干扰事件发生前制定的初始方案进行应急物资供应,必然导致部分需求点服务失败。因此,必须根据干扰事件发生的具体情况进行方案调整,有效地处理干扰事件,使其对整个震后应急物流系统产生的扰动最小。

1.1.2 研究意义

震后应急物流系统规划与优化事关抗震救灾,非常重要。但是,地震灾害的突发性、破坏性、应急救援的时间紧迫性给震后应急物资供应带来了巨大挑战。主要原因有:

- (1) 灾区部分道路受到不同程度损毁,行驶在受损路段上的车辆行驶速度难以确定;
- (2) 灾区需求点需要多品种、大批量的应急物资;
- (3) 应急物资供应可能必须采用多种供应方式,且具有时间紧迫性;

- (4) 有些需求点的应急物资需求量非常大;
- (5) 在某些时间段内, 灾区有些需求点是“连通孤岛”, 车辆不能到达;
- (6) 通过一段时间抢修后, 灾区的部分损毁路网状态发生改变;
- (7) 应急物资供应网络由多级设施构成, 是一个多层次、多对多的复杂网络。

为有效应对地震灾害, 必须研究、建立高效的地震灾害应急物流系统和灵活快速、因地制宜的应急反应机制; 与此同时, 必须合理设计、优化应急救援物资储备、应急设施定位和应急配送体系, 充分发挥应急物流系统为应对突发自然灾害、突发公共事件提供应急物资保障的作用。

为此, 本书研究震后应急物流系统中的 LRP, 分析震后应急物资供应特性, 构建多个符合震后应急物资供应不同真实情景的多目标 LRP 优化模型; 结合行为科学中对人的行为感知的研究方法, 从灾区需求点、应急决策部门、应急物流执行者三个方面分析干扰事件对应急物流系统的扰动, 在此基础上以系统扰动最小为目标构建干扰管理模型, 根据模型的特点设计相应的求解算法, 并采用震后应急物流系统的相关真实数据/模拟数据进行案例测试, 验证模型与算法的合理性、有效性。

本研究成果可以迅速、有效地分配应急资源, 避免物资配送不及时与供需失衡, 实现震后应急物资供应的快速响应, 降低应急物流系统的总费用, 保障应急物资供应, 降低地震灾害带来的各种损失与危害, 具有重要的理论和实践意义。本研究在理论上补充和完善了应急管理理论, 为应急物流领域研究提供了新理念和研究方向, 为同行提供研究参考; 在应用层面上, 可以为相关应急管理决策部门提供应急物流决策参考。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 应急物流研究现状

1. 国内应急物流研究

国内学者对应急物流研究起步相对较晚，主要是从2003年“非典”发生之后开始。“非典”疫情带来的巨大损失使人们意识到长期形成的物流定式和以单纯追求经济效益最大化为物流驱动力的物流模式不利于应急物流的实现，中国学术界由此展开了对应急物流系统的研究。《中国物流与采购》杂志于2003年年底特别策划了应急物流专题系列报道。其中，高东椰、刘新华（2003）提出了应急物流具突发性、不确定性、弱经济性和非常规性等特点。赵新光等（2003）提出了应急物流的保障机制。邓伟、王卫国（2003）提出了建立和完善各类信息系统和数据库。王国文（2003）提出了建立应急物流的信息保障预案。此后，许多学者展开了应急物流相关研究，主要分为如下几个方面。

（1）应急物流体系与机制研究。欧忠文等（2004）正式提出了应急物流的概念，并探讨了应急物流中的政府协调机制、全民动员机制、法律机制和绿色通道机制。王旭坪等（2005）提出了应急物流体系结构和快速反应机制。谢如鹤等（2005）建立了应急物流运作流程的基本框架。缪成、吴启迪、许维胜（2008）进行了应急物流的差异分析，在此基础上构建了应急物流体系。耿鹏（2008）对突发事件下物流系统应急措施的特征、管理进行了探讨和分析。邹学慧（2010）认为完善的应急物流体系应该包括建立系统协调的应急物流组织系统、强化政府公共危机中的信息管理、合理规划应急物资储备、建立统一应对突发性事件的法律法规等方面。杨轶（2013）认为健全的应急物流体

系包括救灾应急物流需求预测和预警,确立应急物资的种类和批量,健全灾害的评估和应急预案的启动等方面。何亚洲(2014)分析了我国自然灾害应急物流管理体系的不足之处,并提出了构建完善的自然灾害应急物流管理体系的相关措施与建议。赵泽旭等(2014)以云南省鲁甸县2014年6.5级地震为例,从应急物流设备、交通网络、信息技术以及应急中的回收物流等方面讨论了中国灾害应急物流体系建设问题,并提出了相关建议。

(2) 应急物流网络研究。赵林度(2007)研究了城市重大危险源应急物流网络。刘明(2007)进行了一类多层次的生物反恐应急物流网络集成动态优化控制研究。乔鹏亮(2009)研究了地质灾害下区域应急物流配送网络。刘思婧等(2011)基于全过程管理的理念,提出应急物流网络体系应该由应急物流配送网络的规划、建设、运营管理三个阶段构成,并对各个阶段的工作内容及重点方法进行了分析。聂彤彤与徐燕(2011)结合物流发展的趋势定义了应急物流网络的概念,并按应急物流保障基地、应急物流中心、应急物资储备基地三个层次给出了应急物流网络的拓扑结构。赵思敏等(2011)从节点布局、物资配送两个方面研究了应急物流网络规划的主要内容。郭晓光(2013)分析了应急物流网络规划的内涵,提出了应急物流网络规划的主要内容,设计了应急物流网络规划的三阶段法。孙君、谭清美、张中华(2014)分析了突发事件对地面物流网络系统的干扰影响、地面应急物流网络系统的应对能力及瓶颈,在此基础上构建了立体多级应急物流网络系统,并阐明了其网络拓扑结构和网络应急物流功能的实现方法。

(3) 应急设施选址研究。应急设施选址直接影响到应对自然灾害、突发事件的实效性,有许多学者关注该问题。刘春林等(2003)研究了离散应急供应系统优化选址问题。方磊等(2004)研究了给定期限条件下的应急系统优化选址模型及算法。何建敏、刘春林等(2005)