

应急救援物资运输与 车辆路径规划

Scheduling of Rescue Resources and Planning of
Transportation Path in Emergency

杨继君 缪 成 许维胜 著

014057942

本书研究成果获国家自然科学基金项目“大规模应急救援资源运输与车辆调度问题研究”(70871091)的支持(2012年结项)

应急救援物资运输与 车辆路径规划

Scheduling of Rescue Resources and Planning of
Transportation Path in Emergency

杨继君 缪 成 许维胜 著

F252
605



F252
605



北航

C1742742



经济管理出版社
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

应急救援物资运输与车辆路径规划/杨继君, 缪成, 许维胜著. —北京: 经济管理出版社, 2014.7

ISBN 978-7-5096-3139-3

I. ①应… II. ①杨… ②缪… ③许… III. ①突发事件—救援—货物运输—研究 IV. ①U

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 109052 号

组稿编辑: 何 蒂

责任编辑: 杨国强

责任印制: 黄章平

责任校对: 陈 颖

出版发行: 经济管理出版社

(北京市海淀区北蜂窝 8 号中雅大厦 A 座 11 层 100038)

网 址: www.E-mp.com.cn

电 话: (010) 51915602

印 刷: 大恒数码印刷 (北京) 有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 720mm×1000mm/16

印 张: 18.5

字 数: 264 千字

版 次: 2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5096-3139-3

定 价: 48.00 元

·版权所有 翻印必究·

凡购本社图书, 如有印装错误, 由本社读者服务部负责调换。

联系地址: 北京阜外月坛北小街 2 号

电话: (010) 68022974 邮编: 100836

前言

Preface

本书研究了在大规模突发事件爆发的情况下，应急物流系统的设计以及应急物流领域关键问题：应急救援物资运输与车辆路径规划。通过分析应急物流的目标、区别与约束条件，设计出适应于突发事件特殊环境下的应急物流系统，总结了突发事件环境下应急救援物资调度与运输路径规划问题的限制条件，据此设计了救援物资分配模型、救援物资调度模型、可靠路径搜索模型以及路径选择整合模型。本书的研究可为应急决策者在突发事件爆发的特殊背景下制定快速、高效、可靠的应急救援物资调度与运输计划提供指导。本书的主要研究内容包括：

(1) 突发事件下应急物流分析与设计。从突发事件的属性与应急管理的机理出发，总结了应急物流的属性与作业目标，详细对比分析了应急物流与一般商业物流在目标、驱动力、物资供应者、物流网络设计、外部影响环境等方面的差异。本书根据应急管理状态划分以及应急物流与一般商业物流差异的演变过程，将应急物流的运行归纳为日常管理、启动阶段、平稳运作、善后处置四个阶段，并划分了不同阶段的过渡条件。由于在平稳运作阶段后，应急物流与商业物流的主要差异已经消除，可以将物流系统的执行主体向第三方物流公司过渡。按照越库作业的思想，本书采用扁平化的结构设计了专

用于启动阶段的应急物流供应网络,它由应急物流中心、物资中转站与需求中心三类设施组成。通过该网络配送救援物资可以尽量减少货物流转环节,同时降低无用物资进入应急物流系统的概率,达到应急物流快速响应、满足需要等作业目标的要求。

(2) 面向多事故点的救援物资调配模型及求解。突发事件爆发后,往往会造成多个事故点,这些事故点之间一般发生时间间隔短、地理位置相对靠近、涉及共同的救援物资和救援力量。另外,各个事故点的需求往往不同,并且它们之间还存在竞争救援物资的情形。单独的应急物流中心很难同时满足上述要求,需要多个应急物流中心把所储备的救援物资公平合理地分配给各事故点。因此,把有限的救援物资公平合理地分配给各事故点就成为优先需要解决的问题。鉴于各事故点存在争夺救援物资的行为,具有非合作的性质,本书故以非合作博弈理论为工具,在对各事故点灾情进行分类分级的基础上,从各事故点所需救援物资数量的角度出发,提出了基于非合作博弈的多事故点救援物资分配模型和算法,以实现应急救援物资的公平合理分配。

(3) 应急救援物资调度模型构建与求解。在确定需求点所需救援物资数量之后,需要借助运输工具将救援物资从供应主体(应急资源中心)向需求主体(事故点)转移,以填平物资与受灾群众之间的空间距离。因此,救援物资调度问题就成为应急物流中最为主要的决策问题。对于救援物资调度问题,本书分析了救援物资运输、车辆调度问题与车辆路径选择问题的区别,并归纳该问题的约束条件。为了描述这个复杂问题,本书设计了多模式分层网络,以形式化表示物资从源点到终点流动以及车辆循环使用的行为,并以此为基础,在网络流模型的基础上建立了救援物资运输与车辆调度的混合整数规划模型。随后采用拉格朗日松弛法设计了拉氏调度算法,以求解该模型的近似最优解。最后,本书使用上述算法求解了一个包括三种运输模式、七个顶点、两种物资的实验算例,验证了算法的收敛性,并且通过调整输入参数的值,证明了该算法在输入参数波动情况下具有良好的鲁棒性。

(4) 突发事件情境下可靠路径搜索模型构建与求解。由于突发事件经常

会毁坏当地的基础交通设施,造成部分路段的旅行时间延长,甚至完全中断。为了减少突发事件对当地路网的影响,保证救援物资可以按计划运达目的地,本书对突发事件背景下的可靠路径搜索问题进行了研究。由于突发事件爆发时,无法在短时间内通过抽样实验等方法,得到路段旅行时间的概率分布函数,所以本书提出了一种不依赖于道路旅行时间概率分布的可靠路径搜索模型。该模型通过使用模糊综合评价法评估影响因子对道路通行状态的影响,建立场景集以描述交通运输网络旅行时间的不确定性,最后使用 Minimax 理论设计绝对与相对可靠路径搜索模型,选择源点到终点的可靠性路径,并通过基于动态规划法的算法计算该模型的最优解。该解可以在突发事件情境下,搜索出目标可靠路径,同时还可以降低救援物资运输调度问题求解的复杂性。

(5) 面向多目标的救援路径选择整合模型与优化。在突发事件情境下,救援车辆的路径选择具有多目标性,比如在救援路径选择时需要同时考虑救援路径行程时间的可靠性、救援路径阻断的风险性和救援路径的复杂性。为此,本书首先构建救援路径选择的三个子模型即救援路径行程时间可靠性子模型、救援路径阻断风险子模型和救援路径复杂度子模型,然后对这三个子模型进行整合而构建了面向多目标的救援路径选择整合模型,并设计了改进遗传算法对其进行求解。

通过对以上问题的研究,可以帮助应急决策者构建出一个在突发事件爆发后快速、高效、公平地保障救援物资供应的应急物流系统,为应急救援物资公平分配与高效调度以及快速搜索可靠路径;设计最小化时间与成本的救援物资运输与车辆调度方案,为突然爆发的灾难提供有效、实用的应对方案与决策模型,实现在最小延迟时间下满足救援物资的需求,以最大限度地降低大规模突发性公共事件对社会正常秩序的冲击,减少人员伤亡。

序

Preface

经济增长、社会公平和社会稳定是一个国家可持续发展不可缺少的要素。改革开放 30 多年来，中国的经济持续高速增长，创造了“中国奇迹”。但是，在经济持续高速发展的过程中，也引发了各种突发事件，特别是重大自然灾害也不断发生，不仅给国家造成巨大的经济损失，也增加社会的不稳定，甚至诱致社会冲突与矛盾。这说明如何有效应对和解决突发事件问题已成为世界各国亟待解决的重大课题。该书以突发事件下应急物流系统及其优化运输问题为研究主题，符合时代需要，具有现实意义。同时，由于以往国内学者对应急物流的研究仍处于初期阶段，在运输路径方面也主要从确定性参数的模型探讨解决运输路径的选择问题，较少从不确定性或多目标性等复杂性角度出发研究应急物流运输与调度问题，该书从不确定性和多目标性视角，运用博弈论和其他数学工具构建相关决策模型，一定程度上丰富了应急物流系统和运输调度方面的理论研究。

该书在对突发事件应急管理相关理论进行分析的基础上，对国内外应急物资运输和车辆调度相关文献研究进行了回顾和综述，深入分析了突发事件下应急物流的特征、运行阶段并进行相关的系统设计；运用博弈论工具，提出了具有完全信息的非合作博弈救援物资调配模型及其算法；运用相关数量

工具,构建了突发事件下可靠路径搜索模型及其求解,并提出了面向多目标的救援路径选择模型及其优化。这些模型的建构对应急物资运输与车辆调度决策提供科学的依据。该书定量分析方法选择得当,模型构建严谨,分析过程层层递进,结论可信。篇章结构安排合理,文献回顾工作有效,内容完整,论证充分,逻辑性强,能很好地突出研究主题,具有较好的学术价值和实践参考意义。

黄 刚

2014年4月16日

(黄刚:广西财经大学管理科学与工程学院院长、
教授,广西公共政策研究中心主任)

目录

Contents

第1章 绪 论 / 001

- 1.1 研究背景、意义与来源 / 001
- 1.2 研究问题的提出 / 010
- 1.3 突发事件应急管理概述 / 015
- 1.4 突发事件应急管理体系 / 019
- 1.5 应急物流的重要性、定义与区别 / 024
- 1.6 应急物流系统的运作流程 / 027
- 1.7 本书的组织框架及主要研究内容 / 029
- 参考文献 / 034

第2章 文献综述 / 037

- 2.1 应急物流与应急物资供应链相关文献 / 037
- 2.2 应急物资运输与车辆调度问题相关文献 / 050
- 2.3 可靠路径搜索问题相关文献 / 058
- 2.4 博弈调度相关研究文献 / 066
- 参考文献 / 068

第3章

突发事件下应急物流分析与设计 / 077

- 3.1 应急物流的基本概念 / 078
- 3.2 应急物流与一般商业物流的区别 / 083
- 3.3 应急物流运行阶段的划分 / 095
- 3.4 应用于启动阶段的应急物流系统设计 / 100
- 3.5 应急物流实体的分类分级 / 119
- 3.6 小结 / 125
- 参考文献 / 125

第4章

面向多事故点的救援物资调配模型及求解 / 129

- 4.1 非合作博弈理论基础 / 130
- 4.2 基于非合作博弈的多事故点救援物资调配模型 / 135
- 4.3 非合作博弈调配模型的求解 / 146
- 4.4 算例分析 / 158
- 4.5 小结 / 161
- 参考文献 / 162

第5章

救援物资调度模型构建与求解 / 165

- 5.1 救援物资调度问题与车辆路径选择问题的区别 / 166
- 5.2 救援物资调度问题的约束条件与范围 / 168
- 5.3 应急物资调度模型的构建 / 169
- 5.4 基于拉格朗日松弛法的解决算法设计 / 179
- 5.5 Lag1 (X) 和 Lag2 (Y) 子问题解法设计 / 183
- 5.6 救援物资调度计划的调整 / 187
- 5.7 验证算例的输入数据设计 / 190
- 5.8 计算结果分析与鲁棒性验证 / 195
- 5.9 小结 / 200
- 参考文献 / 200

第6章

突发事件背景下可靠路径搜索模型构建及求解 / 203

- 6.1 突发事件背景下可靠路径搜索问题与最短路径问题的区别 / 204
- 6.2 突发事件下可靠路径搜索的模型框架 / 205
- 6.3 道路受阻时备选路径方案的制定 / 212
- 6.4 可靠路径模型的算法设计 / 212
- 6.5 可靠路径搜索模型的算法验证 / 216
- 6.6 小结 / 225
- 参考文献 / 225

第7章

面向多目标的救援路径选择整合模型与优化 / 227

- 7.1 救援路径选择因素分析 / 228
- 7.2 面向多目标的应急救援路径选择整合模型构建 / 229
- 7.3 整合模型求解 / 234
- 7.4 算例分析 / 237
- 7.5 小结 / 240
- 参考文献 / 240

第8章

总结与展望 / 243

附录一 《交通运输突发事件应急管理规定》 / 247

附录二 《国家突发公共事件总体应急预案》 / 257

附录三 《中华人民共和国突发事件应对法》 / 267

后 记 / 283

第1章

绪论



1.1 研究背景、意义与来源

1.1.1 研究背景

突发事件是指突然发生，造成或者可能造成重大人员伤亡、财产损失、生态环境破坏和严重社会危害，危及公共安全的紧急事件。根据突发事件的发生过程、性质和机理，可以将突发事件分为自然灾害、事故灾难、公共卫生事件、社会安全事件四类。

“天有不测风云，人有旦夕祸福。”从古至今，人类就不断地遭受着洪水、地震等自然灾害与恶性传染病等公共卫生事件的侵袭，严重影响着人类社会的正常生产、生活秩序，给人民群众的生命财产造成了巨大损失。这些突发

事件使许多人的生命瞬间就戛然而止，而更多的人则要面对病痛折磨、无家可归、一贫如洗的困境，等待外部社会的救助。以下是近些年来国内外发生的大规模突发事件，它给我们带来的创伤至今仍然记忆犹新：

SARS 事件：2002 年 11 月 16 日，在中国广东省发现全球首例“非典”病例，2003 年 3 月 15 日将其名称公布为严重急性呼吸道症候群症（简称 SARS），它是由一种新病原体引起的非典型肺炎，临床主要表现为肺炎，在家庭和医院有显著的聚集现象。该病具有极强的传染性，致死率为 3%~15%，而且 50 岁以上患者的死亡率高达 50%。3 月 27 日，北京被世界卫生组织确定为疫区，4 月 12 日国务院各职能部委发布联合通知，要求做好 SARS 的防范工作。由于 SARS 是一种未知疾病，加之其传染快与危害大等特点，几乎每个人都感到个人健康受到严重的威胁，原有的生活秩序、生活习惯以及工作方式等也随之发生了很大的变化。由于在 SARS 事件前期的处理措施不力，该传染病以极快的速度和极强的传染性在广东全省蔓延，并迅速传播至其他省、市、自治区和中国香港、中国台湾地区以及新加坡、越南、加拿大、美国等地。SARS 由一个局部性传染病演变为全国性和世界性传染病。SARS 事件对中国国民经济产生了很大影响，人员流动迅速减少，人们取消了各种出现人群聚集的活动，SARS 流行地区和城市的商场、饭店、酒店等场所门庭冷落，高危人群如中小学停课、大学实行严密的封闭性管理，企业的订单、营业额直线下降，对国家、企业和个人造成了很大的经济损失，给中国的社会、经济、政治、文化等各方面带来了巨大而深远的影响。短短几个月就波及全球 31 个国家和地区，造成了 8000 多人发病，700 人死亡。其中，在中国内陆共发生病例 5327 例，死亡 348 例；香港地区 1755 例，死亡 298 例。

印度洋地震与海啸：2004 年 12 月 26 日，印度洋苏门答腊岛以西约 160 公里处发生里氏 9 级地震，地震引发了大规模海啸，海啸波及印度尼西亚、斯里兰卡、印度、泰国、马尔代夫、马来西亚、孟加拉国、缅甸、索马里、坦桑尼亚、塞舌尔、肯尼亚 12 个国家。在这次海啸中，印度尼西亚的亚齐省因距离震中最近，损失最为严重：一些村庄被海浪整个卷走，班达亚齐大部

分被毁。在泰国,游人聚集的普吉岛等沿海旅游胜地变成一片废墟。从斯里兰卡到印度南部,乃至东非,许多沿海村庄都被夷为平地。海啸造成了重大人员伤亡:据各国官方权威统计,至少 21.6 万人在这场灾难中丧生或失踪(联合国提供的数字是 22.3 万人)。由于许多遇难者遗体被海水冲走和统计方式的问题,至今难以得到精确的统计数字。面对这场灾难所造成的巨大损失,世界各国纷纷伸出援助之手。据联合国统计,灾后有 100 多个国家捐赠的 136 亿美元,其中 75% 捐赠款物在灾后一年中到位。但是由于受灾严重,到 2005 年 12 月 31 日仍有 80% 的难民居住在帐篷或其他暂居点,并依靠救援组织提供的救援物资来维护基本生活^[2]。

“卡特里娜”飓风:2005 年 8 月,五级飓风“卡特里娜”袭击了美国南部,它首先在东南部的佛罗里达州登陆,造成 11 人死亡,100 多万户家庭电力供应中断。在 8 月 29 日,“卡特里娜”又在美国南部墨西哥湾沿岸地区登陆,横扫沿岸各州。其中,路易斯安那州的新奥尔良市受灾最为严重,因为新奥尔良市三面环水,平均海拔在海平面以下,最低点在海平面 3 米以下,仅依靠岸边防洪堤来预防海水。但是“卡特里娜”飓风使新奥尔良市的防洪堤两处发生决口,造成城内洪水肆意,80% 的市内建筑物被洪水淹没。此次“卡特里娜”飓风造成 1300 多人死亡,共有 100 多万人被迫离开家园,新奥尔良市在灾后一度成为空城,“卡特里娜”与紧随其后的“丽塔”飓风给当地造成的财产损失高达 700 亿~1300 亿美元,将近 50 万人失业,是美国历史上最严重的自然灾害之一。而且这次灾害也暴露出美国各级应急管理部门救援迟缓、组织拖沓、应急救援物资运输不及时等问题。在飓风侵袭期间,新奥尔良市建立 10 个临时避难所用来收容不能撤离的居民,但并没有准备充足的食物和水。在其中最大的避难所“超级穹顶”体育场和州会议中心的食物储备、生活用品和药品严重不足,甚至没有为每个避难所配备所需的医护人员,避难所里也根本没有医疗区,造成了严重后果。最大的避难所“超级穹顶”体育馆被形容为“人间地狱”,2.5 万灾民拥挤在一起,空气中弥漫着令人窒息的臭气。灾民每天只能得到两瓶瓶装水,食物严重缺乏。在没有电、缺少

水和食物的情况下度过了近一个星期后，避难所中的人员才被陆续疏散到其他地区的灾民中心。在容纳了 1.5 万~2 万灾民的另一避难所——新奥尔良州会议中心，军方直升机几次想降落到空地上分发食品和纯净水，但蜂拥而来的人群却让直升机不得不从高处扔下供应的救援物资。一个参加救援行动的士兵说：“这情形让我想起非洲饥饿的难民。”由于灾后救援物资供应不及时，许多灾民根本得不到必要帮助，出现了大规模市民骚乱，这使本已严重的灾情雪上加霜^[3]。

南亚次大陆大地震：2005 年 10 月 8 日，南亚次大陆发生里氏 7.6 级地震，强烈地震几乎撕裂了整个南亚次大陆北部地区。巴基斯坦西北边境省有 5 个县遭到了地震的袭击。受灾最重的地区是穆扎法拉巴得、巴格、曼瑟拉和巴拉科特等地，许多土坯房屋在地震中坍塌，有几个村子被彻底夷为平地。拉合尔、白沙瓦、奎塔以及旁遮普省 80% 和西北边境省 70% 的地区都有明显震感。巴格镇有 11000 人在地震中遇难，其中数个村庄的居民全部在地震中丧生，最多的是学龄儿童。巴基斯坦官方证实，截至 10 月 19 日，共有 79000 名巴基斯坦人在地震中遇难，另有 65038 人受伤，造成了将近 330 万人无家可归。而非官方的地震估计死亡人数超过 7.9 万人。巴基斯坦总理说，灾区重建需要 50 亿美元及 10 年时间。这次地震是巴基斯坦历史上最大的灾难之一^[4]。灾后灾区面临的主要问题有：①断水断粮，居民急需外部的救援物资供应。由于不少灾区位置偏远，加上交通中断，脱险灾民们面临着缺少衣物，无水无粮局面，居民不得不饮用溪水。②缺医少药，例如在巴控克什米尔地区的穆扎法拉巴德市，医生们在公园里搭建了临时诊所，穆扎法拉巴德体育场也成了临时医疗中心，手术都在足球场上进行，而且缺乏必要的医疗条件与急救药品。③运输不便，大部分重灾区都属于交通不便的偏远地区，救援人员的抵达和受伤人员的运送都十分困难。造成巨大损失的原因是震区救援物资准备很少，主要靠外地运送；被堵塞的公路震后几天仍没有清理疏通；救援活动非常混乱；缺少有效事先组织；等等。在灾后，由于当地灾民缺乏足够的应急救援物资以维护生活，发生哄抢商店。在印度南部泰米尔纳德邦

首府金奈市一个赈灾中心，在发放赈灾物资的过程中甚至发生踩踏事件，造成6人死亡，10人受伤的惨剧。

南方大雪灾：2008年1月10日开始，中国南方地区遭受了近50年来最为严重的一次持续低温雨雪冰冻灾害。从民政部官方网站了解到：此次罕见的低温雨雪冰冻灾害造成上海、广东、广西、江西、湖南、湖北、四川、贵州、江苏、浙江、安徽、福建、河南、重庆、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆等20个省（区、市）和新疆生产建设兵团不同程度受灾。因灾死亡129人，失踪4人，各级紧急转移安置166万人，累计救助铁路公路滞留人员192.7万人；农作物受灾面积1.78亿亩，成灾8764万亩，绝收2536万亩；森林受损面积近2.6亿亩；倒塌房屋48.5万间，破坏房屋168.6万间，因灾直接经济损失约1516.5亿元^[5]。

“5·12”汶川大地震：2008年5月12日，中国四川汶川县发生8.0级大地震。新华网北京8月25日电，国务院新闻办公室25日根据国务院抗震救灾总指挥部授权发布：据民政部报告，截至8月25日四川“5·12”汶川大地震已造成69226人遇难，374643人受伤，17923人失踪，累计解救和转移1486405人，倒塌房屋、严重损毁不能再居住和损毁房屋涉及近450万户，1000余万人无家可归，重灾区面积达10万平方公里，其直接经济损失达8451亿元。据财政部报告，截至8月25日，各级政府共投入抗震救灾资金670.34亿元。中央财政投入598.02亿元，其中，应急抢险救灾资金274.82亿元，灾后恢复重建资金323.2亿元，地方财政投入72.32亿元^[6]。

在目前科技发展水平下，突发事件特别是许多种自然灾害是不可避免的，但是事件所造成的损失是可以大幅度降低甚至消除的。通过建立完善的应急管理体系，形成快速灵敏的预警体制，制定有效突发事件应急预案，保证当地充足的灾后救助物资供应，将可以大大降低灾害所带来的损失。在这一方面，日本就是一个典型的例子。日本位于环太平洋地震带上，全国遍布断层，目前仍有许多断层处于持续活动中，因受地质条件的影响日本属于地震多发国家，台风等其他自然灾害也时有发生。因此，日本对于突发事件有着强烈

的危机意识,在自然灾害方面,注意吸取以往灾害特别是发生在 20 世纪 90 年代的神户大地震经验教训基础上,建立了完善防灾和救灾机制。在 2003~2006 年,日本共发生 7 级以上地震 4 次^[7],分别是:2003 年 2 月 6 日,北海道东部钏路附近海域发生 7.0 级地震并引发海啸,此次地震共造成 1 人死亡,573 人受伤。2004 年 10 月 23 日新潟县发生里氏 7.0 级地震,造成 40 人死亡,4574 人受伤,避难人数超过 10 万人,房屋以及公路、铁路受到严重损坏,大面积水、电、气供应中断。2005 年 3 月 20 日,福冈县以西海域发生里氏 7.0 级地震,福冈、佐贺、长崎、岛根、大分、山口、熊本等县均有强烈震感,造成 1 人死亡、381 人受伤,部分民房倒塌。2006 年 11 月 15 日,日本千岛群岛附近发生里氏 8.1 级强烈地震,没有伤害报道。从这一系列灾害报告可以看出,虽然日本频繁发生重大地震,但并没有造成像南亚地震那样惨重的人员伤亡。这一方面说明了社会对于灾害的承受能力与它的发展程度有一定的比例关系,相同强度的灾害,对发展中国家造成的危害比发达国家和最不发达国家更为严重;另一方面也给我们展示了完善的应急管理体系的重要性。在灾害发生后,立即设立应急响应处置机构、及时告知民众应采取的避难措施、恢复公共设施的运转、供应急需的应急救援物资,将可以大大降低灾害所造成的损失^[8]。

近一个世纪以来,随着现代社会的高速发展,在人口、资源、环境、公共卫生等方面的社会问题日益尖锐,这些都导致了突发事件爆发日趋频繁、危害程度逐渐加大、扩散速度加快,事件所造成的损失也在不断增加,仅从 1900~2000 年自然灾害^①爆发情况来看,根据国际自然灾害数据库组织统计数据分析(见图 1-1)^[9]:在自然灾害爆发数量方面,1900~2000 年这 100 年的时间里,自然灾害的爆发次数持续增长,直到 20 世纪 60 年代,全球记录到的自然灾害数量在每年 100~500 次,发生频率还比较稳定,但是从 20 世纪

① 自然灾害包括雪崩、山体滑坡、干旱、饥饿、食品短缺、地震、洪水、森林火灾、热带风暴/飓风/台风/暴风雨雪、火山爆发、寒潮、海啸和昆虫灾害。