



城市地下管线 运行安全风险评估

朱 伟 翁文国 刘克会 等◎著



科学出版社

城市地下管线 运行安全风险评估

朱 伟 翁文国 刘克会 等◎著

科学出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

城市地下管线运行安全风险评估 / 朱伟等著. —北京: 科学出版社,
2016.4

ISBN 978-7-03-047708-8

I. ①城… II. ①朱… III. ①市政工程-地下管道-安全评价
IV. ①TU990.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第049391 号

责任编辑: 石 卉 程 凤 / 责任校对: 刘亚琦

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 无极书装

编辑部电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail. sciencep.com

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 4 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2016 年 4 月第一次印刷 印张: 22 1/4 插页: 2

字数: 448 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

城市地下管线指城市范围内供水、排水、燃气、热力、电力、通信、广播电视、工业等管线及其附属设施，是保障城市运行的重要基础设施和“生命线”。随着城市经济水平的提高、城市规模的扩大和现代化步伐的加快，城市地下管线系统越来越庞大和复杂，城市运行和公众生活对其的依赖程度也越来越强。《国务院办公厅关于加强城市地下管线建设管理的指导意见（国办发〔2014〕27号）》中指出：“近年来，随着城市快速发展，地下管线建设规模不足、管理水平不高等问题凸显，一些城市相继发生大雨内涝、管线泄漏爆炸、路面塌陷等事件，严重影响了人民群众生命财产安全和城市运行秩序。”提高地下管线管理水平，保障城市运行平稳安全，是当前城市管理者 and 管线运行企业亟待关注的重点。

风险管理是一门新兴的管理学科。随着后工业化时代的来临，风险社会的形成，风险管理越来越多地应用到公共安全领域，尤其在城市化高速发展的背景下对城市运行安全提供了新的管理方法。风险评估是风险管理的核心环节，通过系统识别和排查可能存在的风险和风险控制点，科学分析各种风险发生的可能性与后果及风险承受力与控制力，评估风险级别，明确风险控制对策并采取措施，能够有效提升地下管线运行安全管理的科学性和准确性。

本书作者在2008年北京奥运会、残奥会期间和2009年新中国成立60周年庆祝活动期间参与了北京市城市运行安全保障和地下管线安全风险评估与控制的研究与应用工作，在国家科技支撑计划（项目编号：2011BAK07B03-2、2015BAK12B01-1）、北京市财政专项（项目编号：PXM2014-178215-000007）、北京市科技计划（项目编号：Z09050600910902、D101100049510001），以及北

京市青年拔尖人才（项目编号：2014000021223ZK47）等科研项目资助下，持续开展城市地下管线运行安全风险评估技术的研究，长期为相关部门提供科技支撑。本书的完成，是过去工作的总结，在对城市地下管线和风险评估发展现状梳理综述（第一章到第三章）的基础上，按照风险评估的三个阶段即风险识别（第四章）、风险分析（第五章和第六章）和风险评价（第七章）对地下管线运行安全风险评估的方法、技术及案例应用进行了阐述，给出了一套理论性和实用性兼顾的评估工具。

研究团队成员郑建春、尤秋菊、韩朱旻、邢涛、邓楠、尚秋谨、翟振岗、刘鹏澄、孙平、王瑜、翟淑花、徐栋、芮静、尹萌萌等为以往科研项目的完成做出了不同程度的贡献，也为本书的撰写提供了丰富的内容基础。我们的工作一直得到北京市市政市容管理委员会、北京市科学技术研究院和清华大学公共安全研究院各级领导学者的支持和指导。本书的完成，也是清华大学、北京市科学技术研究院等单位共同组建的公共安全协同创新中心的合作成果。

本书借鉴和参考了国内外同行的现有研究成果及有益经验，引用了相关作者的部分文献和研究成果，在此对署名的和未署名的相关研究者表示由衷的感谢。风险理论和评估方法仍在发展当中，地下管线运行安全问题涉及的专业面广，鉴于本书作者水平有限，难免有疏漏甚至差错之处，敬请广大读者批评指正。

目 录

前言

第一章 现代城市视野下的地下管线管理	1
第一节 现代城市运行的要素和特征	1
一、城市与现代城市	1
二、现代城市运行的基本要素	2
三、现代城市运行的特征	6
第二节 城市地下管线对城市运行的作用与影响	7
一、现代城市中地下管线的功能与发展	7
二、现代城市运行中地下管线的特点	10
三、地下管线对现代城市运行的影响	12
第三节 现代城市中地下管线管理的重要性	17
一、我国城市地下管线管理概况	17
二、城市地下管线管理存在的问题	19
三、保障现代城市发展, 加强地下管线管理	21
第二章 风险评估: 提升城市地下管线管理水平	24
第一节 风险评估基本概念	24
一、风险概述	24
二、风险管理	25

三、风险评估	26
第二节 风险评估技术与工具	28
一、传统风险评估技术简介	28
二、风险评估技术与工具发展趋势	32
三、风险评估技术与工具适用性分析	33
第三节 地下管线运行风险评估的发展与意义	35
一、地下管线运行风险评估的研究与应用现状	35
二、地下管线运行安全需要风险评估支撑	38
第三章 城市地下管线基本情况	40
第一节 城市地下管线的类别	40
一、城市地下管线的分类方式	40
二、不同分类的城市地下管线概述	42
第二节 典型地下管线及其系统介绍	48
一、燃气管线及燃气系统	48
二、供热管线及供热系统	49
三、供水管线及供水系统	50
四、排水管线及排水系统	52
第三节 城市地下管线建设与管理的发展趋势	53
一、城市地下综合管廊建设	53
二、城市地下管线信息化建设	56
三、发达城市地下管线管理的经验总结与分析	58
四、国内主要城市地下管线运行管理的经验与问题	63
五、城市地下管线管理的发展趋势	68
第四章 城市地下管线运行风险识别	74
第一节 地下管线事故与原因分析	74
一、供水管线	74
二、排水管线	80

三、燃气管线.....	86
四、供热管线.....	92
五、电力管线.....	94
六、通信管线.....	95
七、生存环境.....	95
第二节 基于事故树分析的地下管线事故原因识别	98
一、原因分类.....	98
二、供水管线.....	98
三、排水管线.....	104
四、燃气管线.....	110
五、供热管线.....	120
第三节 基于灾害机理分析的地下管线事故风险后果识别	126
一、地下管线事故灾害机理	126
二、供水管线运行风险的后果识别	137
三、排水管线运行风险的后果识别	139
四、燃气管线运行风险的后果识别	142
五、供热管线运行风险的后果识别	144
第四节 地下管线运行风险识别结果.....	146
第五章 基于事故演化的地下管线运行风险分析	151
第一节 典型地下管线事故链式演化风险分析.....	151
一、事故演化过程中的事件分级	151
二、事故演化过程事件入度、出度分析	153
三、事故过程中事件演化链分析	154
四、燃气管线破裂事故演化过程定量分析	155
第二节 管线内外事故耦合的燃气管线定量风险分析方法	160
一、城市燃气管线综合风险分析的框架	160
二、可能性分析.....	162
三、后果分析：管线外.....	163
四、后果分析：管线内.....	177

五、特定目标风险值确定	180
六、算例及分析	183
七、小结	195
第三节 地下管线运行风险分析中的事故模拟方法	195
一、地下空洞对地下管线运行风险的影响模拟	195
二、燃气管线泄漏后火灾爆炸的影响模拟	198
三、降雨情景下排水管线能力对道路积水的影响模拟	212
第六章 基于指标体系的地下管线运行风险分析	217
第一节 概述	217
一、构建指标体系的原则	217
二、构建指标体系的方法	218
三、地下燃气管线运行风险分析的特点	221
第二节 基于“人—物—环—管”系统的指标体系	224
第三节 基于“压力—状态—响应”模型的指标体系	226
一、“压力—状态—响应”模型的特点	226
二、基于PSR模型的燃气管线系统风险分析指标体系	228
三、地下管线系统风险分析指标约简	231
第四节 燃气管线运行模糊风险分析模型	235
一、模型结构	235
二、可能性分析	236
三、后果严重性分析	238
四、模糊分析过程	239
五、算例分析	242
六、小结	243
第五节 基于可靠性和脆弱性的燃气管线风险分析指标体系	244
一、可靠性分析	244
二、风险分析指标体系建立	247
三、小结	252

第六节 多因素耦合的燃气管线风险分析指标体系	253
一、城市燃气管线风险分析指标确定	254
二、城市燃气管线风险分析指标权重计算	262
三、风险分析	268
四、小结	280
第七章 城市地下管线运行风险评价与评估机制	282
第一节 风险评价：确定风险评估的结果	282
一、风险矩阵法	282
二、支持向量机	284
三、评价标准的确定	289
第二节 地下管线风险评估的GIS实现	294
一、指标体系管理功能	294
二、GIS的基本框架	298
三、案例1：城市部分区域的燃气管线风险评估	302
四、案例2：全市区域的城市燃气管线风险评估	321
第三节 城市地下管线运行风险评估的管理机制	326
一、风险评估管理机制的建立	326
二、风险沟通机制	332
三、基于风险评估的某市燃气管线运行风险控制措施建议	336
参考文献	341

第一章 现代城市视野下的地下管线管理

第一节 现代城市运行的要素和特征

一、城市与现代城市

随着我国城市化进程的加快，城市越来越成为一个人群流、资金流、能量流和信息流高度集中交汇的地方。城市的功能日趋多样化、复杂化，涉及社会的各个层面。从参与角色上，城市的参与主体包括政府、企业和社会等多个主体；从层次上，城市包括市级、区级、街道、社区、网格等多个层次；从专业维度上，城市管理包括市政基础设施、公共服务、生态环境管理等众多子系统，而每个子系统又包含许多分类更为细致的子系统，整个城市是一个多维度、多结构、多层次、多要素相互关联、整体结构高度繁杂的开放的巨系统。

世界上的任何事物都有一个发生、发展、定型的渐进变化过程。城市的产生也是如此，经历了漫长的由“量变”到“质变”的发展时期。因此，城市是社会发展到一定历史阶段的产物。具体来说，城市就是以人的活动为主体，由经济、社会、环境等三大系统组成的多层次的动态系统。它是人口与经济活动在空间的集中，是一个地区的经济、政治、文化、服务等中心，是一个地区经济和社会发展的标志。城市的本质是人类聚居的形式之一、一定区域的中心、人类文明的摇篮和展现，以及一种社会公共服务集中供给的活动方式。

过去十年，中国城镇化进程高歌猛进，城市风貌日新月异。随着城市规模的日益扩大，城市化进程的不断加快，高密度、多元化的人口聚落形式和开放的物

质流、能量流和信息流成为城市的两大基本特点,越来越庞大、复杂的现代城市成为社会的核心主体。中国城镇化的一个重要特征是大城市化趋势明显,其表现是人口和财富进一步向大城市集中,大城市数量急剧增加,而且出现了超级城市(supercity)、巨城市(megacity)、城市集聚区(city agglomeration)和大都市带(megalopolis)等新的城市空间组织形式(陶希东,2015)。

现代城市是一个开放的社会经济系统,这不同于古代的城市系统。古代的城市大多由于各方面的因素,如防卫、交通的不便利或者闭关锁国的政策影响,处于相对封闭的状态。例如,出于防卫的考虑,紫禁城不筑城,不修建护城河,城市处于相对封闭状态。得益于科技生产力的不断发展,流通、交易程度的提高,范围的扩大,城市的开放程度越来越高,资源配置效率也越来越高,才逐渐形成了现代城市的架构。

现代城市的发展塑造了具有人口规模庞大、基础设施建设速度快、功能完备、大型活动丰富频繁、第三产业比重大等特征的运行体。城市资源要素的高度集聚是城市的根本,但同时也产生了人口老龄化、资源紧缺、交通拥堵、环境恶化、生活成本高等城市问题,不仅影响城市居民的日常生活,给城市居民造成巨大的生活和心理压力,也会制约城市的健康发展,增加城市的脆弱性,由城市自身发展所导致的内在风险因素与日俱增(沈国明,2008;刘彤,2015)。只有对自身所面临的风险有正确的认知,才能主动选择适当有效的方法防范和处理风险。面对来势汹汹的城市风险,至少需要在思想认识与技术方法两个方面做必要的准备,即要主观上高度重视城市风险,并积极探求消解城市风险的综合性技术方法和治理手段,提前预防城市风险的发生,减少风险可能造成的损害。现代城市各类风险的影响更为复杂,灾害造成的影响和损失更为严重。

二、现代城市运行的基本要素

“城市运行”尚没有一个具有普遍意义的、明确的概念,其含义尚有待于进一步深入探讨。“运行”一词原意是指“周而复始地运转(多指星球、车辆等)”。根据《现代汉英词典》,“运行”对应的英文解释是“move; be in motion”(运动;处于运动状态)。该词典列举的例子是“move in orbit”,即“在轨道上运行”。综合来说,城市运行是指城市系统各要素之间及其与外部环境之间的物质、能量和信息的交流、运动过程,即在运行状态中保障城市功能的正常实现。城市运行是政府、市场与社会围绕城市公共产品与服务的提供、各要素共同作用于城市而产生的所有动态过程和行为的总称。

城市运行的内在动力由城市内各主体的需求构成,如城市市民对维持自身正常生活的需求;城市消费对城市正常运行的需求;城市建设、城市发展对城市正

常运行的需求；城市市民为满足更高品质生活对城市正常运行的需求。从参与角色上，城市运行的参与主体包括政府、企业和社会等多个主体；从运行层次上，城市运行包括市级、区级、街道、社区、网格等多个层次；从专业维度上，城市运行管理包括市政基础设施、公用事业、交通管理、废弃物管理、市容景观管理、生态环境管理等众多子系统（郭德勇等，2013），而每个子系统又包含许多更为细致的子系统，整个系统呈现出多维度、多结构、多层次、多要素间关联关系高度繁杂、开放等特征。

（一）城市运行系统结构框架

根据对城市系统和结构的分析，借鉴城市系统工程及城市管理学等研究，我们把城市运行的系统构成具体划分为资源运行、环境运行、经济运行、社会运行四大部分，结构框架如图 1-1 所示。

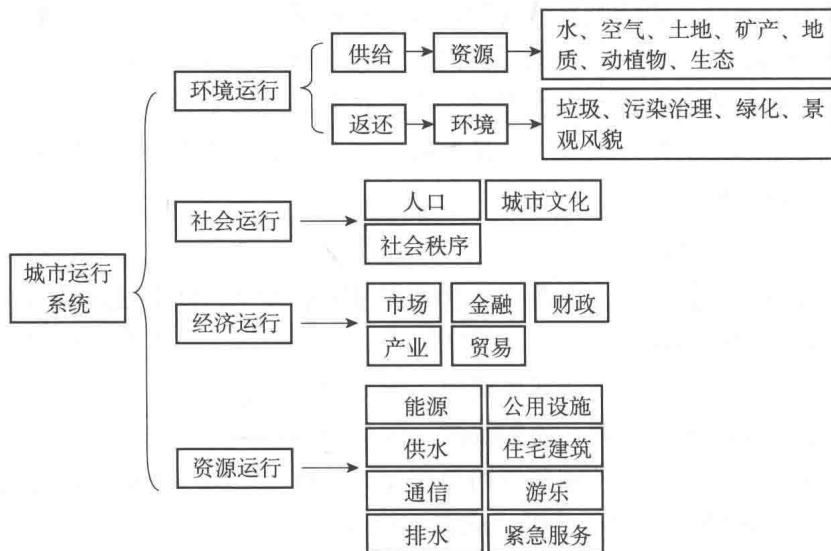


图 1-1 城市运行系统结构框架

1. 环境运行系统

城市作为一个自然环境中的特定环境系统，一方面，从其他环境系统（如农业环境系统、海洋环境系统）中获取大部分能量与物质，如粮食、水、原材料、各种资源等；另一方面，又将人类生产和生活所产生的废物、废水、废气传送到其他环境系统，可将此描述为供给与返还的过程。

（1）供给。城市从自然系统中获取大部分能量与物质的过程。

（2）返还。城市中人类生产和生活所产生的废物、废水、废气传送到其他环境系统的过程。

2. 社会运行系统

社会运行系统主要包括人口、社会秩序、文化三个部分。

人口主要指人口数量、人口质量。社会秩序和文化是城市软环境：文化包括体制、文物、历史、民族、心理等；社会秩序主要指政府、人大、政协、公检法、交通等部门对城市秩序的维护。

从较深的层次来分析，城市系统是通过其内部社会运行系统对外部环境的刺激做出反应，并通过社会运行过程作用于外部环境系统。

3. 经济运行系统

经济运行系统主要划分为市场、金融、财政政策、产业、贸易等的运转，包括城市内部和城市个体与其周围城市之间建立起的物质、能量、信息的流通网络，通过资源共享与互补提高城市的规模经济效益、专业化程度和聚集经济效益。

例如，生活必需品的物价，对大型批发市场、超市和农贸市场的经营数据进行的监测和分析，为实施有效的商业运行指挥提供依据。还有主要能源的物价（主要就是成品油、天然气的价格），银行卡的受理、交易情况、账户情况、外币兑换情况、咨询投诉服务受理情况等，生活必需品供给（如粮油、蔬菜、肉蛋奶等基本生活必需品的库存情况、市场渠道及交通运输保障情况）等因素都会对城市运行产生重大影响。

4. 资源运行系统

资源运行系统指在国家资源安全得到保障的前提下，城市通过多元化的来源渠道和高效、稳定的资源为可持续发展提供充足、经济、可靠的资源供应。这里的资源包括生产和生活所需的实质资源，比如能源、水、粮食、食品等，也包括生产和生活所需的服务资源，比如旅游、信息、应急保障等。

资源运行系统应该从功能和使用角度加以分析。资源系统的功能是支持城市建设和经济发展的重要物质基础，应该保持持续正常的供应；从资源的使用看，包括资源的经济安全（主要包括供需的总量和结构对称，以及供应通道的畅通）和环境安全（约束和限制能源生产和消费过程中的废气、废物对环境的影响）。

以上四大系统相互联系、相互影响、相互作用，形成复杂的城市运行系统。城市的正常运行依赖于每个系统的正常运行，以及每个系统之间建立起的良性循环的互动关系。

（二）城市运行构成要素

从城市运行的构成来看，可以包括以下要素。

1. 制度要素

城市运行安全管理制度解决的是城市运行安全管理的依据问题，即管理主体

将依据什么来维护城市的运行,并对城市实施管理。它为城市管理职能的实施提供依据,为城市运行各类主体行为提供准则。一般而言,城市运行安全管理的制度包括宪法,相关城市管理的法律、法规、部门规章和规章以下的规定或政策。

2. 理念要素

城市运行安全管理的理念要素指的是城市管理主体在城市管理行为中表现出的看法与思想的综合。城市运行的效果如何,归根结底是受城市管理主体管理理念的引导和制约的。城市管理的实践者在城市运行安全管理的实践中总结经验、吸取教训,并在借鉴国外城市管理先进理念的基础上,逐渐总结出城市运行安全管理应坚持的理念。

3. 主体要素

城市运行安全管理的主体要素首先解决的问题是“谁来维护城市运行的安全”。城市运行的主体主要包括政府、社会组织(企业和非营利组织)及社会公众三大类主体。它们共同组成了一个对城市运行进行监督、管理、评价的有机主体,共同在城市运行过程中依据其独有的资源条件起着其各自独特的作用。

4. 客体要素

现代城市是一个由多种要素构成的复合系统。城市运行安全管理的客体要素主要有城市危险源、城市自然灾害、城市重要机构及场所、城市公共基础设施、城市突发公共卫生事件、恐怖袭击破坏、城市应急救援力量、城市应急救援设备设施等。

5. 信息要素

城市运行安全管理中很重要的一项工作就是城市运行安全信息的管理,这些信息已经成为安全管理有效进行的保证。信息作为一种资源已经越来越受到人们的重视,其主要的价值在于减少城市管理中的许多不确定性。信息对城市运行安全管理活动有着重要的作用。

(三) 城市运行原则

现代城市运行为了达到平稳的状态,应遵循下列原则。

(1) 以人为本的原则。在城市运行安全管理中,首先应树立“以人为本”的管理理念,充分体现全心全意为人民服务的宗旨,实现由权力本位向权利本位、政府本位向社会本位、官本位向民本位的转变。人的生命权是人与生俱来的权利,对人的生命权的尊重,是人类社会的一条基本公理,也是城市运行安全管理应当坚持的第一理念。

(2) 均衡原则。城市运行安全管理的目标是注重城市经济、社会、文化和

环境等方面的整体、协调、均衡的发展，而不是偏重某一方面。也就是说，城市管理既要达到发展经济的目的，又要注重城市相关基础设施的配套建设，也要保护好城市居民赖以生存和发展的自然环境；既要注重城市经济的发展，也要注重社会的发展，促使城市的各种要素和谐运行。

(3) 服务原则。树立“以人为本”的服务理念，要求城市政府在三个方面进行理念的转换。一是调整城市政府管理的价值理念，如何更好地为社会、为公民提供公共服务，是现代政府最基本的价值理念。二是树立利民便民的“服务观”，政府部门应改变以往官僚式的工作作风和方式，主动做人民的公仆。三是坚持造福人民的“政绩观”。

(4) 效率、效能、经济原则。城市运行的经济原则简单可以理解为以尽可能低的成本或投入，达到城市运行过程中需要的城市公共产品或服务。城市运行将效率、效果和经济原则相结合，不仅聚焦投入的情况，还关注产出的结果，还注重那些不能用货币来衡量的效果。

三、现代城市运行的特征

现代城市运行系统的基本特征表现在以下几个方面。

(1) 经常性。现代城市运行需要城市管理者能在第一时间通过城市运行系统监测，做出具体决策，组织各种力量，协调各个部门，迅速、及时地处理城市问题，保证城市的顺利运行。因此，经常性是城市运行的首要特征。

(2) 科学性。城市运行系统的一个显著特征在于它将信息科学技术广泛运用于城市管理的全过程之中，以 GIS（地理信息系统）、网络和多媒体等技术，对城市的基础设施、功能机制进行自动的信息采集和传输，使得信息传输更为迅速，实现了城市管理信息的共享。

(3) 协调性。现代城市运行理念强调城市运行手段和机制的协调、城市运行主体的协调、城市运行客体的协调、城市运行目标的协调，追求城市整体的和谐运行。

(4) 系统性。城市运行是一个整体的、系统的过程，涉及城市的各个要素，必须在整体上把握城市的复杂性，采取有效的方式把各个子系统有机结合起来，发挥整体功能。

(5) 动态性。城市的发展是一个动态的发展过程，城市运行系统需要在城市各个要素动态的变化发展过程中，迅速获取城市动态变化的信息，谋求城市管理条件和管理目标的动态平衡。

现代城市在经济社会快速发展的同时，仍处于工业化、城市化、现代化和国际化的关键时期，结构升级、体制转轨和社会转型加快将伴随各类矛盾凸显和突发事件高发，各种传统的和非传统的、自然的和社会的风险交织并存，城市运行

面临的挑战和考验更加复杂,各类问题日益增多,形势更加严峻。从风险的角度进行审视,现代城市运行存在如下新的问题。

一是各类灾害风险交织并存。近年来,受全球气候变化的影响,极端天气增多,强降雨、海啸、干旱、高温、雾霾、冰雪、沙尘暴等极端天气是城市面临的主要灾害类型。我国地域广阔,不少城市处于不同程度的地震烈度区,突发地质灾害风险源广泛分布,可能产生地震、崩塌、滑坡、泥石流、采空塌陷等重大灾害,城区超高层建筑集中,轨道交通建设运营里程不断上升,高层和地下空间发生火灾的概率增加。

二是城市承载处于超负荷状态。城市常住人口和流动人口日益增加,水资源、能源供应、交通路网长期处于高度紧张的状态。人口急速扩张对城市承载能力形成严峻挑战,人口高度集中导致突发事件的不确定性和复杂性增强。水资源严重不足,资源能源对外依赖性强。局部地区能源供需矛盾更加突出。城市基础设施处于满负荷运转状态。城市的超负荷运转也使得城市在问题面前暴露出较强的脆弱性,使得现有运行保障能力与人口、资源、环境的承载状态存在明显差距。

三是各类事故灾难仍然可能高发。目前城市地下管线网络因自然老化或人为外力破坏造成的管线破裂、泄漏和路面塌陷等突发事件仍时有发生。过境交通压力大,危险化学品运输车辆多,易发生危险化学品泄漏、爆炸、污染等事故和突发环境事件。人员密集场所、有限空间作业、地下空间等领域的安全问题日益凸显。随着城市基础设施建设加快,轨道交通、建筑施工等各类事故风险有所增加。第二产业中的高风险仍将在一定时期内存在;高新技术产业、现代服务业快速发展的同时,也带来新的危险因素;产业间的关联更加紧密,突发事件导致的次生衍生灾害使灾情加重。

四是次生衍生影响极易放大。城市正经历着“经济转轨、社会转型”的发展阶段,随着城市运行各系统的联系日益紧密,信息化、网络化的程度不断加深,一旦发生运行故障极易对城市功能的正常发挥造成巨大影响,应对不当更将诱发群体恐慌乃至社会动荡等事件发生,对城市经济社会活动、城市正常运行和生态环境等造成严重威胁。

第二节 城市地下管线对城市运行的作用与影响

一、现代城市中地下管线的功能与发展

地下管线是满足城市运行和市民生产生活的重要基础。地下管线担负着城市