

刘敏 权瑞松 许世远 著

# 城市暴雨内涝灾害风险评估： 理论、方法与实践



**Risk Assessment of Urban Rainstorm  
Waterlogging Disaster:  
Theory, Method and Practice**



科学出版社

# 城市暴雨内涝灾害风险评估： 理论、方法与实践

Risk Assessment of Urban Rainstorm Waterlogging Disaster:  
Theory, Method and Practice

刘 敏 权瑞松 许世远 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

在全球气候变化与城市化过程耦合效应下,各种自然灾害频发,城市安全设防问题日益突出并已引起国际社会和国内外学者的高度关注,城市自然灾害风险研究已成为当前国际灾害研究领域的前沿与热点问题。在国家自然科学基金重点项目“沿海城市自然灾害风险应急预案情景分析”的资助下,本书从地球系统科学思想与灾害学系统理论出发,分析了中国沿海典型城市洪涝灾害系统特征,阐明了典型城市洪涝灾害系统构成与作用机理,探讨了典型城市暴雨内涝灾害风险的评估理论与方法,并选取典型区域进行实证研究,建立了城市暴雨内涝灾害风险评估范式。

本书可为从事灾害风险评估与应急管理研究的高校师生、科研院所研究人员及政府相关部门管理者阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

城市暴雨内涝灾害风险评估:理论、方法与实践/刘敏,权瑞松,许世远著. —北京:科学出版社,2012.9

ISBN 978-7-03-035224-8

I. ①城… II. ①刘… ②权… ③许… III. ①城市-暴雨-水灾-风险评估 IV. ①P426.616

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 172151 号

责任编辑:许 建 李 静/责任校对:宣 慧

责任印制:刘 学/封面设计:殷 靓

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>

上海叶大印务发展有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 9 月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:280 000

定价:62.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

自然灾害是自然环境中对人类健康、生命与财产安全以及生计等带来严重破坏和危害的异常现象或极端事件。近年来,由于全球气候变化和人类活动影响等因素的叠加作用,地震、海啸、洪涝灾害等巨灾频发。当前,由各种自然灾害造成的人员伤亡、财产损失、资源和生态环境破坏以及由此产生的一系列社会矛盾等问题日益尖锐和突出,对自然灾害成灾机理、风险评估与管控等方面研究已成为当今世界关注的热点与前沿。2005年《兵庫行动框架》将灾害风险辨识、评估、灾害风险监测与预警列为未来10年减灾的五个优先领域之一。

灾害学是自然科学和社会科学交叉持续发展而成的一个新兴学科,它重在揭示灾害成灾机理,从而为防灾减灾工作提供科学依据,为实现人类与环境的和谐相处及人类的可持续发展服务。自从20世纪30年代美国田纳西河流域管理局(TVA)开创了自然灾害风险评估的先例后,经过80余年的发展,自然灾害风险分析评估的技术与方法日趋成熟。随着科技水平的不断发展,对灾害成灾机理、灾害风险评估与应急管理等方面的研究不断深入,人类对自然灾害认识水平不断提高,防灾减灾能力也在不断增强。

城市是人口和经济高度聚集地区,城市的发展改变了原有的植被类型,不透水地面面积与高层建筑数量正以惊人的速度不断增加,使原有的排水系统与模式发生根本性改变,并导致灾害类型与结构发生了巨大变化。自然灾害具有突发性、大面积性和受灾周期性较长等特点,它是不以人的意志为转移的自然现象,对大城市和特大城市的影响或危害由于城市人口、建筑物、基础设施、工业服务业的高密集性及城市系统要素间的相互依存性等而呈放大性、复杂性的特点。往往城市现代化程度越高,其抗御灾害的能力越脆弱,受影响程度也就越严重,“城市病”日益突出。目前,城市自然灾害形势不容乐观,已引起全球学界、政府部门等的高度关注。如何协调好人类经济社会健康发展与自然环境之间的关系,有效降低自然灾害对城市的不利影响,提高城市应对自然灾害的能力,是城市公共安全和城市可持续发展中面临的一项重大课题。因此,开展全球气候变化背景下的城市自然灾害风险研究具有十分重要的意义。

本书旨在探索城市典型的自然灾害系统——洪涝灾害系统构成与作用机制,摸清城市典型的洪灾系统类型——暴雨内涝灾害系统的作用机制,根据城市独特的下垫面特征,构建城市暴雨内涝灾害风险评估的理论体系,形成适合城市尺度的暴雨内涝灾害风险评估的方法,并尝试建立分析基于多致灾因子链的洪涝灾害风险评估的理论与方法,并以上海城市为例开展实证研究,建立城市洪涝灾害风险评估的示范模式,为城市洪灾风险防范提供科学依据。

本书是在国家自然科学基金重点项目“沿海城市自然灾害风险应急预案情景分析”(项目编号:40730256)与上海市科协2011年基础性学科前瞻性课题调研项目“上海城市自然灾害风险辨识及其管控对策”的支持下,开展城市洪涝灾害研究的相关成果,在一定

程度上反映了当前国内城市自然灾害学的学科发展水平。本书共分八章，第一章为绪论，主要论述城市洪涝灾害研究背景与意义、国内外洪涝灾害的研究进展、风险研究的新趋势以及城市灾害风险管理面临的挑战与机遇；第二章介绍城市系统与城市洪涝灾害系统构成与特征，并以上海市为例初步阐述城市系统与城市洪涝灾害系统间的影响机理；第三章探讨了典型城市洪涝灾害孕灾环境变化过程(土地利用/覆被变化)对城市洪灾的影响；第四、五、六章分别概述了城市洪涝灾害危险性、暴露性、脆弱性的概念与表征，并分别开展相应的分析评估方法实证研究；第七章归纳总结了城市洪灾风险的概念、城市洪涝灾害系统特征，提出了城市不同研究对象的洪涝灾害风险评估思路，并对上海市历史洪灾特征进行了系统分析，着重研究城市地铁系统与城市住宅暴雨内涝灾害的风险特征与区划；第八章对基于多致灾因子链的洪涝灾害风险评估的理论与方法进行了初步探讨，并对海平面上升背景下的台风-风暴潮-洪涝灾害风险进行了初步分析。本书由笔者和笔者指导的博士和硕士研究生共同完成，按照城市灾害系统研究的思路和框架进行总体设计、组织和撰稿工作。其中，陆敏副教授参与本书第二、四章内容的研究和撰写工作；硕士研究生张丽佳协助完成第六章；第八章由陆敏副教授、硕士研究生牛海燕参与撰写。同时，还得到了黄余明教授和唐曦副教授的帮助和支持，硕士研究生宗宁等也参与了书稿的审校工作。

目前，城市自然灾害研究在理论、思路和技术手段上仍亟待积累资料，不断提升学科与研究水平。笔者希望本书的出版能为我国城市灾害学的发展抛砖引玉，并在实践中指导科研院校师生开展相关的科研工作，为政府加强城市灾害防御提供决策依据和参考借鉴。

本书数易其稿，但由于城市系统的复杂性、多变性，加之有关自然灾害风险评估的理论、方法不尽完善，仍在探索之中，书中不妥在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2011年11月于华东师范大学地理馆

# 目 录

## 前言

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| 第一章 绪论                                         | 1  |
| 第一节 问题的提出                                      | 1  |
| 第二节 研究意义                                       | 3  |
| 第三节 灾害风险研究进展                                   | 4  |
| 一、国际计划                                         | 4  |
| 二、风险评估方法进展                                     | 7  |
| 三、灾害风险研究新趋势                                    | 12 |
| 第四节 城市灾害风险管理的挑战与机遇                             | 13 |
| 一、挑战                                           | 13 |
| 二、机遇                                           | 17 |
| 第二章 城市系统与城市洪涝灾害系统                              | 20 |
| 第一节 城市系统                                       | 20 |
| 第二节 城市洪涝灾害系统                                   | 22 |
| 一、城市洪涝灾害类型                                     | 22 |
| 二、城市洪涝灾害系统构成                                   | 23 |
| 三、城市洪涝灾害系统特征                                   | 26 |
| 第三节 实证分析                                       | 27 |
| 一、上海城市系统特征                                     | 28 |
| 二、上海城市暴雨致灾的环境条件                                | 32 |
| 三、上海城市暴雨灾害影响分析                                 | 32 |
| 四、上海城市系统暴雨灾害的脆弱性演化                             | 35 |
| 五、结论与讨论                                        | 36 |
| 第三章 典型孕灾环境变化对城市洪涝灾害影响研究                        | 38 |
| 第一节 孕灾环境系统构成                                   | 38 |
| 第二节 城市孕灾环境特征                                   | 39 |
| 一、城市土地利用/覆被变化巨大、地面沉降显著                         | 39 |
| 二、城市水系萎缩、排水系统建设滞后                              | 39 |
| 三、城市局地气候显著、城市“热岛效应”与城市“雨岛效应”突出                 | 40 |
| 四、城市系统的高暴露性、高脆弱性                               | 41 |
| 第三节 典型孕灾环境变化过程对城市内涝灾害的影响——以土地利用/覆被变化(LUCC)过程为例 | 41 |
| 一、研究区概况                                        | 42 |
| 二、研究方案                                         | 43 |
| 三、结果分析                                         | 46 |
| 四、结论与讨论                                        | 50 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>第四章 城市洪涝灾害危险性评估</b>         | 52  |
| 第一节 危险性概念与表征                   | 52  |
| 第二节 实证研究                       | 53  |
| 一、中国沿海地区近 20 年台风灾害风险分析         | 53  |
| 二、上海降雨特征分析及其城市水情灾害响应           | 59  |
| 三、基于情景分析的上海中心城区内涝模拟与危险性评估      | 67  |
| <b>第五章 城市洪涝灾害暴露性评估</b>         | 75  |
| 第一节 暴露性概念与表征                   | 75  |
| 第二节 实证研究                       | 76  |
| 一、研究方法                         | 76  |
| 二、结果与分析                        | 78  |
| 三、小结                           | 82  |
| <b>第六章 城市洪涝灾害脆弱性评估</b>         | 83  |
| 第一节 脆弱性概念与表征                   | 83  |
| 一、现象论                          | 83  |
| 二、因果论                          | 84  |
| 第二节 实证研究                       | 85  |
| 一、基于指标体系的上海中心城区地下轨道交通暴雨内涝脆弱性评估 | 85  |
| 二、基于情景模拟的上海市中心城区住宅脆弱性分析        | 93  |
| <b>第七章 城市洪涝灾害风险评估</b>          | 101 |
| 第一节 风险概念与表征                    | 101 |
| 第二节 城市洪涝灾害风险系统特点               | 104 |
| 一、客观性                          | 104 |
| 二、不确定性                         | 105 |
| 三、相对性                          | 105 |
| 四、动态性                          | 105 |
| 第三节 基于情景模拟的城市洪涝灾害风险分析方法        | 105 |
| 一、城市地上建筑                       | 106 |
| 二、城市地下设施                       | 107 |
| 第四节 实证研究                       | 108 |
| 一、上海市近 2000 年来洪涝灾害系统特征及风险分析    | 108 |
| 二、基于情景模拟的上海中心城区地铁暴雨内涝风险评估      | 127 |
| 三、基于情景分析的上海市中心城区住宅暴雨内涝风险评估     | 136 |
| <b>第八章 基于多致灾因子链的洪涝灾害综合风险评估</b> | 168 |
| 第一节 洪涝灾害多致灾因子链的概念与表征           | 168 |
| 第二节 基于多致灾因子链的洪涝灾害风险分析方法        | 170 |
| 第三节 实证研究                       | 171 |
| 一、上海沿海地区海平面上升趋势预测              | 172 |
| 二、海平面上升背景下的台风-风暴潮-洪涝灾害风险评估     | 172 |
| 三、小结                           | 178 |
| <b>参考文献</b>                    | 179 |

# Contents

## Preface

|          |                                                                                                                |    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>                                                                                            | 1  |
| 1.1      | Present Problems                                                                                               | 1  |
| 1.2      | Research Significance                                                                                          | 3  |
| 1.3      | Research Progresses of Disaster Risk                                                                           | 4  |
|          | (1) International Programs                                                                                     | 4  |
|          | (2) Advances of Risk Assessment                                                                                | 7  |
|          | (3) Research Trends in Disaster Risk                                                                           | 12 |
| 1.4      | Challenges and Opportunities of Urban Disaster Risk Management                                                 | 13 |
|          | (1) Challenges                                                                                                 | 13 |
|          | (2) Opportunities                                                                                              | 17 |
| <b>2</b> | <b>Urban System &amp; Urban Flood Disaster System</b>                                                          | 20 |
| 2.1      | Urban System                                                                                                   | 20 |
| 2.2      | Urban Flood Disaster System                                                                                    | 22 |
|          | (1) Types of Urban Flood Disaster System                                                                       | 22 |
|          | (2) Structures of Urban Flood Disaster System                                                                  | 23 |
|          | (3) Characteristics of Urban Flood Disaster System                                                             | 26 |
| 2.3      | Case Study                                                                                                     | 27 |
|          | (1) Characteristics of Shanghai Urban System                                                                   | 28 |
|          | (2) Hazard-Formative Environments of Rainstorm in Shanghai                                                     | 32 |
|          | (3) Impact Analysis of Urban Rainstorm Disaster in Shanghai                                                    | 32 |
|          | (4) Evolution of Vulnerability of Urban System on Rainstorm Disaster in Shanghai                               | 35 |
|          | (5) Conclusion and Discussion                                                                                  | 36 |
| <b>3</b> | <b>Impact of Typical Changes of Hazard-Formative Environment on Urban Flood Disaster</b>                       | 38 |
| 3.1      | Structures of Hazard-Formative Environment System                                                              | 38 |
| 3.2      | Characteristics of Hazard-Formative Environment in Urban Area                                                  | 39 |
|          | (1) Huge Changes of Land Use and Land Cover and Significant Land Subsidence                                    | 39 |
|          | (2) Atrophy of Water Systems and Lag of Drainage System Constructions                                          | 39 |
|          | (3) Significant Urban Local Climate, Prominent Urban Heat Island Effect and Enhanced Urban Rain Island Effect  | 40 |
|          | (4) High Exposure and High Vulnerability of Urban System                                                       | 41 |
| 3.3      | Impact of Typical Changes of Hazard-Formative Environment on Urban Waterlogging Disaster: A Case Study of LUCC | 41 |
|          | (1) Study Area                                                                                                 | 42 |
|          | (2) Method                                                                                                     | 43 |

|                                                                                                                            |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| (3) Result Analysis.....                                                                                                   | 46         |
| (4) Conclusion and Discussion.....                                                                                         | 50         |
| <b>4 Hazard Assessment of Urban Flood Disaster .....</b>                                                                   | <b>52</b>  |
| 4.1 Definition and Expression of Hazard .....                                                                              | 52         |
| 4.2 Case Study.....                                                                                                        | 53         |
| (1) Risk Assessment of Typhoon Disasters during Last 20 Years in Chinese Coastal Areas .....                               | 53         |
| (2) Characteristics of Rainfall in Shanghai and Its Influence on Urban Flood Disaster .....                                | 59         |
| (3) Scenario Analysis-Based Simulation and Hazard Assessment of Waterlogging in Shanghai<br>Central Urban Area .....       | 67         |
| <b>5 Exposure Assessment of Urban Flood Disaster .....</b>                                                                 | <b>75</b>  |
| 5.1 Definition and Expression of Exposure .....                                                                            | 75         |
| 5.2 Case Study.....                                                                                                        | 76         |
| (1) Method.....                                                                                                            | 76         |
| (2) Result Analysis .....                                                                                                  | 78         |
| (3) Conclusion.....                                                                                                        | 82         |
| <b>6 Vulnerability Assessment of Urban Flood Disaster .....</b>                                                            | <b>83</b>  |
| 6.1 Definition and Expression of Vulnerability .....                                                                       | 83         |
| (1) Phenomenalism.....                                                                                                     | 83         |
| (2) Theory of Causation.....                                                                                               | 84         |
| 6.2 Case Study.....                                                                                                        | 85         |
| (1) Index System-Based Vulnerability Assessment of Rainstorm Waterlogging on Subways of<br>Shanghai.....                   | 85         |
| (2) Vulnerability Analysis of Residences in Shanghai Central Urban Area .....                                              | 93         |
| <b>7 Risk Assessment of Urban Flood Disaster.....</b>                                                                      | <b>101</b> |
| 7.1 Definition and Expression of Risk .....                                                                                | 101        |
| 7.2 Characteristics of Urban Flood Disaster System .....                                                                   | 104        |
| (1) Objectivity .....                                                                                                      | 104        |
| (2) Uncertainty .....                                                                                                      | 105        |
| (3) Relativity .....                                                                                                       | 105        |
| (4) Dynamicity .....                                                                                                       | 105        |
| 7.3 Risk Analysis Methods of Urban Flood Disaster .....                                                                    | 105        |
| (1) Buildings on the Ground.....                                                                                           | 106        |
| (2) Underground Infrastructure.....                                                                                        | 107        |
| 7.4 Case Study.....                                                                                                        | 108        |
| (1) Analysis of Characteristics and Risk of Flood Disaster of Shanghai in nearly 2000 Years .....                          | 108        |
| (2) Scenario Simulation-Based Risk Assessment of Rainstorm Waterlogging on Subways in<br>Shanghai Central Urban Area.....  | 127        |
| (3) Scenario Analysis-Based Risk Assessment of Rainstorm Waterlogging on Residences in<br>Shanghai Central Urban Area..... | 136        |
| <b>8 Integrated Risk Assessment of Flood Disaster Based on Multi-Hazards Chain .....</b>                                   | <b>168</b> |
| 8.1 Definition and Expression of Multi-Hazards Chain of Flood Disaster.....                                                | 168        |

---

|                        |                                                                                               |            |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.2                    | Multi-Hazard-Chain-Based Analysis Methods of Flood Disaster Risk .....                        | 170        |
| 8.3                    | Case Study.....                                                                               | 171        |
|                        | (1) Trend Forecast of Sea Level Rise in Shanghai Coastal Regions .....                        | 172        |
|                        | (2) Risk Assessment of Typhoon-Storm Surge-Flood Disaster Chain Based on Sea Level Rise ..... | 172        |
|                        | (3) Conclusion.....                                                                           | 178        |
| <b>References.....</b> |                                                                                               | <b>179</b> |

# 第一章 绪 论

## 第一节 问题的提出

近百年来，全球范围内海啸、洪涝、地震等巨灾频发，正不断地威胁着人类社会的生存安全与可持续发展。特别是近年来，由于气候变暖和海平面上升等的影响，各类自然灾害席卷世界各地，造成了巨大的人员伤亡和经济损失，如 2004 年印尼地震海啸、2005 年美国新奥尔良飓风、2008 年中国汶川大地震、2011 年日本地震海啸等。

在过去 20 年里灾害的发生频率呈上升趋势(Scheuren et al., 2008)。由灾害性天气事件造成的损失在近几十年来呈迅速增长趋势(图 1-1)，重大灾害事件造成的年经济损失从 20 世纪 50 年代的 40 亿美元/a 增加到 20 世纪 90 年代的 400 亿美元/a(以 1999 年美元价格换算得来)，增加了 10.3 倍；保险损失由最初的可以忽略不计到 90 年代的 92 亿美元/a，重大灾害损失的保险比例下降了 2/3。

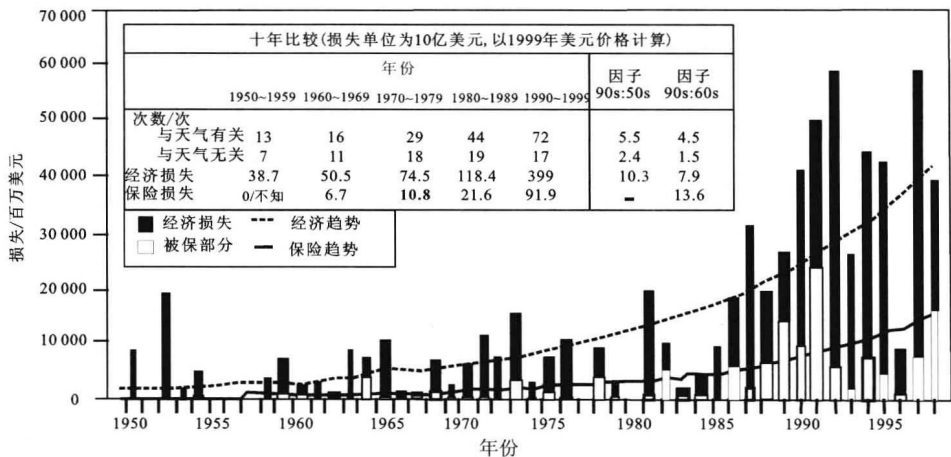


图 1-1 过去几十年灾害性天气事件造成的损失(IPCC, 2001)

Figure 1-1 Costs of catastrophic weather events in recent decades (IPCC, 2001)

发展中国家在自然灾害面前异常脆弱。自然灾害给发展中国家带来更为严重的后果，许多自然灾害事件都会造成受灾国 3% 以上的 GDP 损失，并会造成严重的经济危机与大量人员伤亡(Shi et al., 2010)。据世界银行统计数据 displays，发展中国家在 1984~2003 年有超过 40 亿的人口受到各种自然灾害袭扰；同时，仅 1990~1999 年灾害造成的经济损失就是 1950~1959 年灾害造成的经济损失的 15 倍(World Bank, 2006)。在 20 世纪 90 年代，世界上因自然灾害死亡人口总数为 88 万人，其中 90% 的死亡人口属于发展中国家(Perrow, 2007)。

中国是世界上最大的发展中国家，也是世界上受自然灾害影响最严重的国家之一。

20 世纪全球死亡人数最多与直接经济损失最大的 100 次自然灾害事件中, 分别有 24 次和 17 次发生在中国(葛全胜等, 2008)。近 10 年来, 中国每年仅自然灾害造成的经济损失就在 1000 亿元以上, 常年受灾人口达 2 亿人次(孙健等, 2004)。

洪涝灾害是中国最常见、影响最严重的自然灾害类型之一。1900~2010 年, 中国共发生 50 次影响较大的洪涝灾害, 共造成 2 254 492 人死亡, 165 018 799 人受影响, 直接经济损失 16 865 744 美元, 平均每发生一次大的洪涝灾害就会造成 45 090 人死亡, 330 0376 人受影响, 平均直接经济损失 337 315 美元。另外, 据世界卫生组织紧急事件数据库资料(Emergency Events Database, EM-DAT)<sup>①</sup>显示, 中国在 1900~2010 年的 100 多年间, 人员死亡最多的 10 次自然灾害事件中有 4 次是洪涝灾害, 受影响人口数最多的 10 次自然灾害事件中有 9 次是洪涝灾害, 造成经济损失最严重的 10 次自然灾害事件中有 7 次是洪涝灾害; 洪涝灾害在造成人员死亡数、受影响人口数和经济损失的自然灾害事件排名中均居首位。

洪涝灾害对我国城市造成了非常严重的影响, 并已严重危及城市的正常运转和公众正常的生产生活。2007 年 7 月 18 日, 济南主城区遭受特大暴雨袭击, 导致 33 万人受灾、34 人死亡、26 条供电线路停电、2 处水厂供水中断、多处商场被淹以及数千户居民家中进水, 直接经济损失约 12.3 亿元(刁颀和刘晓斐, 2008)。2008 年 8 月 25 日清晨上海遭暴雨袭击, 部分地区的小时降雨强度超过 100 年一遇暴雨标准, 造成全市 160 多条段马路严重积水, 1.3 万户民居进水, 中环吴中路、衡山路、祁连山路等 7 个下立交因积水严重而临时封闭, 而吴中路地道积水最深达 1.5 m, 封闭时间长达 10h<sup>②</sup>。2011 年夏初, 武汉、北京、杭州、成都等城市因持续强降雨造成市区严重内涝, 多个城市均出现水漫金山的景象, 给城市的正常运转、居民的正常生产生活及城市形象带来严重影响。

世界最大的经济体中有 37 个城市(Hoornweg and Bhada, 2009)。城市是一个结构复杂的受人控制的开放系统, 一般包括经济系统、社会系统和自然(或生态)系统三大子系统, 而三大子系统又由不同类型、不同范围、不同层次的子系统组成(许学强等, 1997; 邓清华, 2001)。城市通过其高度集聚作用, 集中了人类的智慧和财富, 加快了人类的发展速度, 但同时也成为滋生突发事件的最佳场所, 与其他区域相比, 城市独特的自然、社会、经济特征使得灾害发生时更具破坏性(刘智, 2010)。由于城市各子系统的紧密相关性, 当城市系统中的任何一个子系统遭受到自然灾害打击, 尤其当受到大范围、长时间、高强度的自然灾害事件的打击时, 很容易产生崩溃的连锁反应, 从而打乱了城市系统内部经济、社会、自然(或生态系统)三大子系统正常有序的互动关系, 导致城市系统功能紊乱, 甚至是崩溃。中国城市虽然与洪涝灾害有 4000 多年的斗争史, 但在洪涝灾害面前, 人类依然显得渺小与脆弱, 仅 1998 年洪涝灾害就造成 3000 人丧生, 1500 万人无家可归, 并造成了 200 亿美元的经济损失(Smith, 2001; Nott, 2006)。目前, 城市洪涝灾害极大地束缚了城市的正常运行, 并有愈演愈烈之势, “逢暴雨必涝”已成为中国城市的真实写照。

城市作为引领一个国家或地区社会经济发展的示范区域, 荟萃了地区或国家政治、

① 世界卫生组织紧急事件数据库. <http://www.emdat.be/>

② 新华网. [http://news.xinhuanet.com/newscenter/2008208/25/content\\_9708314.htm](http://news.xinhuanet.com/newscenter/2008208/25/content_9708314.htm)

经济和文化的精华,人口、财富大量集聚,基础设施、生命线工程密布,但却常年受到洪涝灾害的侵袭,给人民正常的生产生活带来严重影响,造成巨大的经济损失并可能引发一系列的社会问题。

世界城市发展的一般规律表明当一个国家或地区的人均 GDP 处于 1000~3000 美元的发展阶段时,该国家或地区就进入了“非稳定状态”的危机频发期(徐扬和姜敏,2004)。目前,我国人均 GDP 已经超过 1000 美元,许多城市人均 GDP 已经达到或超过 3000 美元,这标志着我国许多城市已经迈入了“非稳定状态”的危机频发期(宋雅杰和李健,2008)。这是我国包括城市洪涝灾害风险研究、管理面临的大背景。

《中国 21 世纪议程》(1994 年)<sup>①</sup>指出,中国约有 70%以上的大城市分布在气象灾害、海洋灾害、洪水灾害和地震灾害都十分严重的沿海及东部平原丘陵地区,灾害损失较大;并且随着社会经济的快速发展、城市化水平的不断提高,高密度的人口分布、林立的高层建筑、不合理的城市空间布局、不配套(建设标准低)的基础设施、人口财富过于集中于城市中心区、不健全的城市灾害风险管理体系,以及初具规模的城市群的出现(如北京、天津城市群,长江三角洲特大城市群和珠江三角洲特大城市群),使得我国城市暴雨内涝灾情呈现出复杂性、多样性、连锁性和放大性的特点。

20 世纪 50 年代以来,我国城市水灾呈上升趋势,洪涝灾害对城市发展已构成了严重威胁(吴庆洲,1998),未来,灾害对人类社会的影响将会更加显著(Alexander, 2006)。而且从 20 世纪 80 年代以来,我国暴雨日数、极端降水事件呈增加趋势,并且在经济相对发达的长江中下游地区表现显著(丁一汇等,2009),城市暴雨内涝灾害威胁与日俱增。现在,全球化趋势越来越明显、地区间联系越来越紧密,城市对整个区域、国家乃至全球的社会经济发展起着关键作用。城市一旦发生灾害性的破坏,其影响不仅仅是一个城市,还会迅速波及整个国家甚至全世界。政府应对各种灾害时表现出的行为与效能,已成为评估政府和社会工作及其进步程度的一个重要标志(段华明,2010)。城市是国家或地区减灾防灾的中心和重心,如何对城市灾害风险进行高精度的科学分析,并建立一套比较完善的城市灾害风险管理机制,以更好地应对包括内涝灾害在内的各类自然灾害,减轻或避免其带来的损害,已经成为城市灾害风险管理与可持续发展领域亟待解决的热点问题和学术前沿课题。

## 第二节 研究意义

随着科技水平的不断发展,对灾害成灾机理、风险的定量表征,以及风险预警与应急管理方面的研究不断深入,人类对自然灾害认识水平不断提高,人类社会的防灾减灾能力不断增强。灾害学作为由自然科学和社会科学交叉持续发展而成的一个新兴学科,其学科综合性不断扩展,它重在揭示自然灾害、人为灾害的成灾机理与演化规律,并精确定量各种灾害风险大小,从而为防灾减灾工作提供科学依据,为实现人类与环境的和

<sup>①</sup> 中国 21 世纪议程. [http://www.ctc-health.org.cn/file/20070228\\_CN21.pdf](http://www.ctc-health.org.cn/file/20070228_CN21.pdf)

谐相处及人类可持续发展服务。

开展城市洪涝灾害风险研究,符合国家的相关需求。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》、《国家综合减灾“十一五规划”》、《国家综合减灾“十二五规划”征求意见稿》和《国家防灾减灾科技规划(2010~2020年)》都将自然灾害风险评估与风险防范示范研究作为国家重点开展和支持的工作。

根据城市独特的自然地理特征,分析城市洪涝灾害的特征,建立高分辨率的灾害风险数据库,构建洪(内)涝模型,从本质上揭示洪(内)涝灾害的形成机理与发展过程,并在高风险区域开展洪(内)涝灾害风险分析评估示范研究,形成城市洪(内)涝灾害风险分析评估示范体系,并为城市建立洪(内)涝灾害的风险防范提供科技支撑,有助于提高城市居民的风险意识,有助于建立健全有效的城市灾害(风险)管理机制,有助于有针对性的开展城市洪(内)涝灾害的风险管理,有助于提高城市内涝灾害风险管理水平,有助于公众生产生活的正常进行,有利于城市可持续发展的实现。

城市洪涝灾害系统作为典型的城市自然灾害系统之一,当前学术界对其研究尚十分薄弱,研究的理论框架、分析思路和评估方法都亟待发展与完善。本书构建的城市洪涝灾害系统框架、风险理论框架、分析思路与评估方法,开拓了城市洪涝灾害的研究视野,大大丰富了城市自然灾害风险评估与管理體系。

### 第三节 灾害风险研究进展

20世纪30年代美国田纳西河流域管理局(TVA)初步探讨了洪水灾害风险分析和评估的理论和方法,开创了自然灾害风险评估的先例(杨郁华,1983)。2005年《兵庫行动框架》中已将灾害风险辨识、评估、灾害风险监测与预警列为未来10年减灾的五个优先领域之一(United Nations, 2005)。

#### 一、国际计划

在全球和洲际尺度上,联合国下属机构、地区间合作组织、政府部门、金融组织、科研院所等已经深入开展了广泛的自然灾害风险研究项目。

1986年成立的政府间合作组织——亚洲备灾中心(Asian Disaster Preparedness Center, ADPC)是一个区域性的灾害管理机构,旨在减少亚太地区自然灾害造成的危害,以维护社会安全与可持续发展(来红州,2005)。该中心1995年实施了亚洲都市减灾计划(Asian Urban Disaster Mitigation Program, AUDMP),以增强都市居民和基础设施的抗灾能力,促进该地区减灾措施的成功实施,并在孟加拉国、老挝、斯里兰卡、柬埔寨、印度尼西亚、越南等东南亚国家开展了一些国家示范项目<sup>①</sup>。

自2001年起,在美国国际开发署(United States Agency for International Development,

<sup>①</sup> 亚洲备灾中心. <http://www.adpc.net>

USAID)和美国国家海洋和大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)、美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)、国际山地综合发展中心(International Center for Integrated Mountain Development, ICIMOD)、湄公河委员会(Mekong River Commission, MRC)的支持与协调下,阿富汗、孟加拉国、缅甸、中国、印度、尼泊尔和巴基斯坦开展了亚洲洪水网络计划(Asia Flood Network, AFN)以降低山洪灾害风险(ToKar et al., 2006)。

自 2003 年起,世界气象组织(WMO)开展了降低灾害风险项目(Disaster Risk Reduction, DRR),并于 2007 年在世界气象组织成员国代表大会上通过了其战略目标:发展并改善具有可持续性的预警系统,特别是与研究、观测、预报预警气象灾害、水文灾害和气候灾害相关的预警系统;发展并改善具有可持续性的系统、方法、工具,加强现代技术的应用,如将地理信息技术应用到信息记录与分析,并将该信息作为风险评估、部门规划及其他形式决策的依据;发展预警信息的传递能力等;通过加强、整合国家气象部门的产品(服务)在降低灾害风险(阶段)的应用以促进备灾文化的形成,并开展长期的面向公众的宣传教育活动;增强世界气象组织和各国家气象部门合作与伙伴关系,以实现在国家、地区和国际 3 个不同尺度的降低灾害风险的目标<sup>①</sup>。

2004 年,联合国发展计划署(UNDP)与联合国环境规划署(UNEP)合作开展了“灾害风险指数”(Disaster Risk Index, DRI)计划(Pelling et al., 2004; Pelling, 2004),并对全球灾害进行了风险评估。该计划的目标是论证发展对风险和脆弱性的贡献,并提供一定数量的案例以支持对灾害风险管理、决策和计划的重新定位,但该计划存在一定的局限性,如灾害风险指数(DRI)代表死亡风险,仅对生命损失提出风险,并不能推断出风险的物理、社会和经济等其他方面的情况。

世界银行(World Bank)和美国哥伦比亚大学(Columbia University)发起并由英国国际发展部资助的“全球自然灾害风险热点计划”(Global Natural Disaster Risk Hotspots Project),提出了 3 个灾害风险指标,即灾害相关的死亡风险(以评估全球格网化的人类风险)、经济总损失风险(以每个单元内全球格网化 GDP 风险)和经济损失风险(以每个格网内每个单元 GDP 的百分比表达),并绘制了全球 6 种自然灾害(气旋、干旱、洪水、地震、火山、滑坡)风险分布图(Dilley et al., 2005)。

ProVention 联盟自 2000 年成立后,在国际红十字会(International Red Cross)、国际红新月会(International Red Crescent)等国际组织支持下,实施了一系列风险研究计划或项目,以促进灾害风险识别、降低风险、风险转移及相关知识的共享,如降低主要灾害风险系列项目(Mainstreaming Risk Reduction)、风险分析与应用系列项目(Risk Analysis and Application)、恢复阶段的降低风险系列项目(Reducing Risk in Recovery)、风险转移与私营部门投资系列项目(Risk Transfer and Private Sector Investment)、风险研究与学习的扩展系列项目(Expanding Risk Research and Learning)等<sup>②</sup>。

泛美发展银行(或称美洲开发银行)(Inter-American Development Bank, IADB)和哥伦

① 世界气象组织. [http://www.wmo.int/pages/prog/drr/index\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/prog/drr/index_en.html)

② 灾害防御协会. <http://www.proventionconsortium.org/?pageid=35>

比亚大学环境研究所(Institute of Environmental Studies of the National University of Colombia)在2003~2005年开展了旨在为决策者提供风险交流工具以达到降低和管理地区自然灾害风险的“拉丁美洲和加勒比计划”(Program for Latin America and the Caribbean),并提出了灾害赤字指数(disaster deficit index, DDI)、区域灾害指数(local disaster index, LDI)、普遍脆弱性指数(prevalent vulnerability index, PVI)和风险管理指数(risk management index, RMI)等4个国家灾害风险指数,并提出了亚国家级风险评估指标(亚国家级的灾害赤字指数、亚国家级区域灾害指数和亚国家级普遍脆弱性指数)和城市级别的风险评估指标体系(Cardona et al., 2005)。

2000年联合国成立了国际减灾战略(International Strategy for Disaster Reduction, ISDR)指导并协调各会员国开展减灾、建设弹性的国家、社区等工作,以利于可持续发展的实现,并于2005年通过了由168个国家签署的《兵库行动框架》(Hyogo Framework for Action, HFA)以达到减灾、保护生命和保障民生的最终目的<sup>①</sup>。

2007年ProVention Consortium联盟与UNDP正式启动“全球风险辨识计划”(Global Risk Identification Program, GRIP),集风险辨识、评估为一体,为世界各国降低灾害风险提供决策服务,并在莫桑比亚、斯里兰卡、土耳其、亚美尼亚、老挝和厄瓜多尔等国开展了改善风险管理与决策的项目<sup>②</sup>。

联合国粮食及农业组织(FAO)开展了一系列针对全球气候变化以及全球化影响下粮食安全研究计划、救济与恢复计划,如应对粮价飞涨计划(Initiative on Soaring Food Prices)、紧急救济和恢复活动(FAO and Emergency)、粮食安全计划(Food Security Programme)及全球粮食和农业信息及预警系统计划(Global Information and Early Warning System)等<sup>③</sup>。

2008年国际科学理事会(International Council of Scientific Unions, ICSU)提出了一个关于灾害风险综合研究科学计划(Integrated Research on Disaster Risk, IRDR),强调在风险研究和降低灾害风险研究中,需要对各种灾害(链)进行多学科、多尺度的综合探讨,其主要目标是在全球、区域及地方尺度开展自然灾害风险识别与评估,发展预报灾害事件的能力,在复杂且不断变化的风险背景下决策以降低风险、遏制损失<sup>④</sup>。

2009年全球环境变化人文因素计划(IHDP)在德国波恩正式启动了以我国专家学者为主导的新一轮国际核心科学计划——综合风险防范计划(Integrated Risk Governance, IRG)。该计划以达到建立满足可持续发展需要的综合灾害风险方法科学体系为目标,聚焦相关风险的“转入与转出”及完善防范巨灾风险的模型与模拟工具,并强调通过一系列案例比较研究(特别是一些巨灾事件)来总结综合风险防范的范式,提高人类防范各类新兴风险及各种灾害不确定性的能力(IHDP, 2010)。

① 联合国国际减灾战略. [http://www.unisdr.org/eng/about\\_isdr/isdr-mission-objectives-eng.htm](http://www.unisdr.org/eng/about_isdr/isdr-mission-objectives-eng.htm)

② 全球风险识别计划. <http://www.gripweb.org/grip.php?ido=37424481&lang=eng>

③ 联合国粮食及农业组织. <http://www.fao.org/>

④ 国际科学理事会. <http://www.icsu.org/what-we-do/interdisciplinary-bodies/irdr/>

## 二、风险评估方法进展

综合国内外洪涝灾害研究状况,洪涝灾害风险研究逐渐从定性、半定性研究转向定量研究,研究方法从粗犷型(宏观)的关注灾害成因机理及灾情数理统计方法转向注重灾情实时动态变化、高精度(微观)的基于情景模拟分析方法,基于情景(模拟)分析的危害风险实时动态研究将成为今后自然灾害风险研究发展的必然趋势(Office of Science and Technology, 2004; Renn, 2008),并且灾害风险研究越来越重视人类社会、经济与灾害之间的相互作用关系,越来越重视人的主观能动性在风险管理中的作用。此外,自然灾害风险研究逐渐表现出多元化趋势,多灾种多时空尺度风险研究、灾害链研究、多灾种多时空尺度风险复合研究、风险转移,以及风险管理中的投入-产出(成本效益)研究等一系列研究领域逐渐受到政府和专家学者的关注。

总结归纳国内外相关研究成果采用的风险分析评估的方法、思路与模式,我们将洪涝灾害风险评估的方法可以分为四种类型。

### (一) 基于历史灾情数理统计的灾害风险评估

国内外学者采用此方法对不同研究区域的洪涝灾害灾情特征与风险进行了分析与探讨。方修琦(1989)以内蒙古呼和浩特及其邻区 1851~1950 年共 100 年的历史灾害资料为基础,对灾情序列的震动幅度、变化阶段性、周期性,以及灾情与降水和温度的关系进行了分析。郭涛(1991)以 2000 多年的历史资料为基础,对四川城市水灾的规律特征进行了分析研究。程根伟和陈桂蓉(1996)根据自公元 7 世纪以来 1300 多年的历史洪水资料,对长江上游地区洪水灾害的特点、危害和成因进行了分析,并提出了一些防灾减灾措施。李吉顺等(1996)基于历史灾情数据对全国暴雨洪灾的危险性进行了评估。刘新立和史培军(2001)以 1736~1911 年的长江流域历史洪涝灾害数据为基础,选择“受灾县、次”为指标,应用马尔科夫链,计算 1911~1915 年长江流域洪涝灾害风险。秦年秀和姜彤(2005)选取 3 种不同重现期及 10 次历史洪水灾情资料对长江中下游地区洪灾危险性进行了初步研究。Benito 等(2004)开发了基于长时间序列历史洪灾数据(过去 1000 年)和规范记录(过去 30~50 年),整合多学科方法(地质、历史等),构建了评估洪水风险的方法。Nott(2006)提出将长时间序列的历史洪水资料作为评估区域洪涝灾害风险的重要参考依据。

基于历史灾情数理统计的洪涝灾害风险评估方法的理论基础是认为灾害风险评估由灾害危险性评估和脆弱性评估两部分组成,灾害风险评估是将危险性评估结果和脆弱性评估结果以一定的标准或方式进行叠加后生成的。这种方法主要分三大步:第一步针对研究自然灾害类型,选取科学的洪涝灾害风险数学分析模型(或公式);然后收集研究区域相关历史资料,如地方志、灾害大典、历史洪涝灾害图集等,并整理、提取出洪涝灾害发生次数、受灾面积、成灾面积、受灾人口、死亡人口等数据;最后对研究区域洪涝灾害风险进行分析、评估。

基于历史灾情数理统计的洪涝灾害风险评估方法计算简单、思路清晰,不需要详尽的地理背景数据(如地形、地貌、地质、水系等);其不足之处在于:这种方法需要长时间