

- ◎ 国家自然科学基金重大项目 (71790615) 资助
- ◎ 教育部人文社会科学研究青年项目 (13YJCZH145) 资助
- ◎ 湖南省自然科学基金面上资助项目 (2018JJ2198) 资助
- ◎ 湖南省哲学社会科学基金资助项目 (12YBA195) 资助
- ◎ 湖南商学院学术著作出版基金资助

不确定环境下城区雨涝风险 多准则评估研究

Research on Multi-criteria Evaluation for Waterlogging Risk
in Urban Areas under Uncertain Environment

◎ 任 剑 欧阳资生 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

- ◎ 国家自然科学基金重大项目 (71790615) 资助
- ◎ 教育部人文社会科学研究青年项目 (13YJCZH145) 资助
- ◎ 湖南省自然科学基金面上资助项目 (2018JJ2198) 资助
- ◎ 湖南省哲学社会科学基金资助项目 (12YBA195) 资助
- ◎ 湖南商学院学术著作出版基金资助

不确定环境下城区雨涝风险 多准则评估研究

Research on Multi-criteria Evaluation for Waterlogging Risk
in Urban Areas under Uncertain Environment

◎ 任 剑 欧阳资生 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

图书在版编目 (CIP) 数据

不确定环境下城区雨涝风险多准则评估研究 / 任剑, 欧阳资生
著. — 徐州: 中国矿业大学出版社, 2018.10

ISBN 978-7-5646-4206-8

I. ①不… II. ①任… ②欧… III. ①城市—暴雨—水灾—风
险评价—研究—中国 IV. ① P426.616

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 239138 号

书 名 不确定环境下城区雨涝风险多准则评估研究
著 者 任 剑 欧阳资生
责任编辑 章 毅
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516) 83884103 83885105
出版服务 (0516) 83995789 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 湖南省众鑫印务有限公司
开 本 710×1000 1/16 印张 10.5 字数 150 千字
版次印次 2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷
定 价 68.00 元
(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)

任 剑 1979年生，男，中国共产党员，湖南岳阳人，中南大学博士，湖南大学博士后，湖南省青年骨干教师培养对象，湖南商学院麓山青年学者、副教授、内聘教授、计算机与信息工程学院分党委委员、工程管理实验室主任、智能信息处理研究所所长、工程管理研究中心副主任，湖南商学院、湖南农业大学硕士生导师，兼任中国自动化学会、湖南省人工智能学会会员及湖南省工程管理学会理事，是“移动电子商务”湖南省协同创新中心、“移动商务智能”湖南省重点实验室、“新零售虚拟现实技术”湖南省重点实验室、湖南省重点建设学科“管理科学与工程”等科研平台的骨干成员，长期从事大数据与智能决策、互联网征信、城市计算等研究。发表30余篇省级以上学术期刊论文，其中SCI、EI 11篇、CSSCI 8篇、CSCD 15篇；主持与参与出版学术专著3部；主持国家级项目1项、省部级项目9项、厅级项目2项、校级项目若干项，主持设计和参与开发近10个信息系统；参与获得计算机软件著作权1项；曾获省优秀硕士学位论文奖1项，校级优秀科研成果奖1项，省教育科学研究工作者协会年度优秀论文一等奖1项，省教育改革发展研究优秀论文二等奖1项；主编1本专业规划教材、参编1本国家级规划教材、副主编1本省级规划教材。

欧阳资生 1967年生，男，九三学社社员，湖南邵阳人，中国人民大学博士，湖南大学博士后，湖南省新世纪121人才第三层次人选、学科带头人、青年骨干教师，湖南商学院教授、科研处处长，湖南商学院、湖南师范大学硕士生导师，兼任教育部金融学类教学指导委员会、湖南省政协、九三学社湖南省委、湖南商学院学术委员会委员及中国投资学会、中国风险管理与精算学会、湖南省保险学会理事，长期从事金融风险管理与保险精算、极值统计等研究。主持国家级及省部级项目10余项；出版专著3部；在《Quality & Quantity》、《统计研究》、《运筹与管理》等期刊上公开发表学术论文40余篇，其中被SSCI、SCI检索各1篇，CSSCI和CSCD 20余篇，人大复印杂志《统计与精算》、《劳动经济与劳动关系》全文转载10余篇；获全国统计科研优秀成果二等奖、三等奖各1项。



前 言

.....

改革开放以来，我国经历了世界历史上规模最大、速度最快的城镇化进程，常住人口城镇化率从1978年的18%上升到2017年的58.52%，城市发展成就举世瞩目。然而，灾害频发、环境污染、交通拥堵、管理粗放、应急迟缓等“城市病”问题逐渐凸显，给我国经济发展、社会治理、生态安全带来了诸多阻碍，影响了人民生活质量的改善。党中央和国务院以促进人的城镇化为核心，以提高质量为导向，提出新型城镇化战略，致力根治“城市病”。2016年，《长江经济带发展规划纲要》提出，围绕“生态优先、绿色发展”的基本思路，确立长江经济带“一轴两翼三极多点”的发展新格局。2017年，《长江经济带生态环境保护规划》强调，共抓大保护，不搞大开发，努力把长江经济带建成水清地绿天蓝的绿色生态廊道和生态文明建设的先行示范带。2018年，习近平在深入推动长江经济带发展座谈会上强调，要加强改革创新、战略统筹、规划引导，以长江经济带发展推动经济高质量发展。新型城镇化战略是新时代中国特色社会主义发展的重要实践，是建设现代化国家的关键举措，也是实施“两步走”发展战略的有力支撑。新型城镇化高质量发展，须要优化城市空间布局，高标准建设城市基础设施，促进城市工业、商业、办公、住宅、休闲等功能区相互交织，完善级配合理、枢纽发达、配套齐备的城市交通网络系统，建设多

中心紧凑型网络城市。同时，以资源环境承载能力为硬约束，统筹推进旧城改造与新城开发，推进生态修复城市修补，加强排涝管网、地下综合管廊等设施建设，创建具有城市特色风貌的森林城市和生态园林城市。

近年来，全球气候变化引起极端降雨天气高发，同时我国城市开发长期以来采取粗放式、“摊大饼”、高能耗的建设模式，致使大中城市雨涝灾害频发，常表现为一定的结构性特征：一个或多个城区被淹；雨涝与缺水交替频现。这种现象给人民生命财产带来巨大损失，值得高度重视和深入研究。《国家新型城镇化规划(2014—2020年)》提出，健全防灾减灾救灾体制，应着眼抵御洪涝等自然灾害，加强城市防洪、排水防涝等设施 and 救援救助能力建设，提高城市建筑灾害设防标准，合理规划布局和建设应急避难场所，强化公共建筑物和设施应急避难功能，完善灾害监测、分析和预警体系，健全突发公共事件应急预案和保障体系，加强城市防灾减灾能力建设。党的十九大报告要求，要坚决打好防范化解重大风险等攻坚战。

新型智慧城市建设，以智慧生活、智慧经济、智慧治理、智慧政务等为重点，以网络泛在、应用融合、服务智敏为特征，利用移动互联网、云计算、大数据、物联网、人工智能、区块链等新一代信息技术，推进城市治理智慧化，加强精细化管理、人性化服务，为我国大中城市雨涝灾害治理提供了有力手段。2016年，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》提出建设一批新型示范性智慧城市；《“十三五”国家信息化规划》确定了新型智慧城市的建设行动目标；《国家信息化发展战略纲要》要求分级分类推进新型智慧城市建设；国家发展改革委、中央网信办及国家标准委共同发布《新型智慧城市评价指标(2016)》。2016年，习近平总书记在网络安全和信息化工作座谈会上提出，要以信息化推进国家治理体系和治理能力现代化，分级分类推进新型智慧城市建设，更好地用信息化手段感知社会态势、辅助科学决策。2017年，国家新型智慧城市建设部际协调工作组编著并发布《新型智慧城市发展报告2017》，公开了首次国家新型智慧城市评价结果，指出存在以下不足：整体

处于起步阶段；市民获得感有待提高；发展总体不均衡；信息资源基础保障作用没有充分发挥。2018年，中国工程院与深圳市人民政府在深圳举办以“智慧城市建设与工程管理”为主题的“2018中国工程科技论坛暨第十二届中国工程管理论坛”。同年，首届新型智慧城市建设国际峰会在山东济南开幕，以“智慧让城市更美好”为主题，突出“政务服务、城市治理、民生需求、经济发展”四大领域，共同探讨新型智慧城市建设的新思路、新模式、新技术。未来智慧城市建设将会实现万物的感知、互联、智能，更好地破解各种城市发展难题，提升城市治理的现代化水平。

本著作遵循新型智慧城市的建设思路，以不确定环境下智能评估技术为主要研究目标，在深入分析我国大中城市城区雨涝的成灾要素及其作用机制基础上，确立大中城市城区雨涝成灾模式，考虑灾情的不确定性与复杂性，从评估准则、评估方法、评估仿真等方面整体形成大中城市城区雨涝风险评估体系，从微观、中观、宏观等层面系统探讨大中城市城区雨涝风险治理政策，从而为相关管理部门出台相应措施和相关政策提供支撑，以完善国家大中城市自然灾害风险管理体系。主要工作及创新如下：

(1) 对城区雨涝风险评估的基础理论进行初步探讨，取得一些阶段性成果。根据相关国家标准，阐释城区雨涝风险评估的内涵、目的、作用、特点及难点；通过构建 DPSIR 分析框架，揭示城区雨涝的成灾模式(包含影响因素之间的静态关系和动态机制)；遵循科学原则，构建城区雨涝风险、城区雨涝风险承受能力以及城区雨涝风险控制能力的评估准则体系。上述成果形成本著作研究的前提条件。

(2) 针对模糊随机环境下城区雨涝风险承受能力或风险控制能力的多准则评估问题，基于多准则决策的最新成果，考虑评估者的不同风险偏好，根据不同类型模糊随机变量的特征，拓展多准则决策方法、随机占优、粗糙集、信息集结算子、云模型、余弦贴近度及群体共识度的应用范围，提出一系列智能评估方法，并通过仿真实验检验其可行性与有效性。上述方法为本著作研究的重

点内容，为城区雨涝风险智能评估提供技术手段。

(3)为综合治理城区雨涝风险，遵循“微观优化、中观协调、宏观调控”的系统原则，从物防、技防、人防、制防等方面，提出设施提质、理念更新、技术改造、服务优化、机制联通、应急适应及队伍支持等政策建议。这一政策建议体系的提出体现本著作研究的社会服务价值。

本著作的研究工作得到了国家自然科学基金重大项目(71790615)、教育部人文社会科学研究青年项目(13YJCZH145)、湖南省自然科学基金面上资助项目(2018JJ2198)、湖南省哲学社会科学基金资助项目(12YBA195)的资助。本著作的出版还得到了湖南商学院学术著作出版基金以及湖南省科技计划专项项目(2014FJ6075)、中国博士后科学基金面上资助项目(2013M531784)、湖南省教育厅优秀青年项目(15B129)、湖南商学院青年教师创新驱动计划项目(17QD07)、中国矿业大学出版社的大力支持，在此一并表示诚挚的感谢。

我们在本著作撰写过程中参考了大量文献资料，已尽可能地将这些文献资料列举到参考文献中，并在文中引用处进行了标注。但难免有所遗漏，这里特向漏列的作者表示歉意，并向所有参考文献的作者们表示谢意。

本著作既是我们在不确定环境下城区雨涝风险多准则评估研究领域的理论创新与咨询建议，也是对前期相关研究成果的归纳总结。希望本著作的成果能够对国家城市自然灾害风险管理以及智慧城市生态安全管理的创新实践有所帮助，也希望本书提出的理论、方法及对策能够在实际应用中得到修订、补充和完善。

鉴于我们水平有限，书中难免存在不当或错误之处，恳请同行、读者批评指正。



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究目的与意义	3
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 城市雨涝风险分析与评估	4
1.2.2 随机多准则决策	7
1.2.3 正态随机多准则决策	9
1.2.4 模糊多准则决策	10
1.2.5 正态云多准则决策	13
1.2.6 群决策一致性分析	16
1.3 主要研究内容与逻辑结构	17
1.4 本章小结	21
第 2 章 理论基础	22
2.1 城区雨涝风险评估的推动作用	22

2.2	准则权重与不完全确定信息	24
2.2.1	准则权重	24
2.2.2	准则权重的确定方法	25
2.2.3	准则权重的不完全确定信息形式	27
2.3	准则值规范化	28
2.3.1	准则的类型	28
2.3.2	准则值规范化的方法	28
2.3.3	随机准则值的规范化	29
2.4	随机占优	30
2.4.1	随机占优的提出	30
2.4.2	随机占优中概率分布的确定	30
2.4.3	随机占优的类型	31
2.5	有序加权算子	34
2.5.1	有序加权平均算子	33
2.5.2	有序加权几何算子	34
2.5.3	正则单调递增量子	35
2.6	云模型	35
2.6.1	基本概念	36
2.6.2	云发生器	37
2.6.3	逆向云发生器	37
2.7	本章小结	38
第3章	城区雨涝风险评估准则体系设计	39
3.1	城区雨涝成灾模式分析	39
3.2	城区雨涝风险评估准则体系的设计原则	43

3.3	城区雨涝风险的评估准则体系设计	44
3.4	城区雨涝风险承受能力的评估准则体系设计	45
3.5	城区雨涝风险控制能力的评估准则体系设计	46
3.6	本章小结	47
第 4 章	随机环境下城区雨涝风险多准则评估方法	48
4.1	基于 PROMETHEE II 的随机多准则评估方法	48
4.1.1	问题描述	49
4.1.2	模型符号	49
4.1.3	双阈值模型	49
4.1.4	偏好关系	50
4.1.5	方法步骤	51
4.2	基于粗糙集的多准则随机占优方法	52
4.2.1	问题描述	52
4.2.2	多准则随机占优的定义	53
4.2.3	偏好信息的形式化	53
4.2.4	准则约简方法	53
4.2.5	偏好信息集结的净流分值方法	55
4.3	本章小结	56
第 5 章	正态不确定环境下城区雨涝风险多准则评估方法	57
5.1	基于 IPOWA 算子的正态随机多准则评估方法	57
5.1.1	问题描述	58
5.1.2	正态随机变量	59
5.1.3	IPOWA 算子	59
5.1.4	风险态度的可能性系数	61

5.1.5	方法步骤	61
5.2	基于区间余弦贴近度的正态云多准则评估方法	62
5.2.1	问题描述	62
5.2.2	正态云的 3σ 原则	62
5.2.3	最优准则权重向量	63
5.2.4	区间余弦贴近度	64
5.2.5	方法步骤	65
5.3	本章小结	66
第 6 章	不确定群决策环境下城区雨涝风险多准则评估方法	68
6.1	基于信息集结算子的四枝单值中智多准则群评估方法	68
6.1.1	问题描述	68
6.1.2	四枝单值中智集	69
6.1.3	四枝单值中智数	71
6.1.4	四枝单值中智数的信息集结算子	71
6.1.5	方法步骤	75
6.2	基于群体共识度的正态云多准则群评估方法	75
6.2.1	问题描述	75
6.2.2	正态云的线性组合方法	76
6.2.3	泛型正态随机变量的余弦贴近度	77
6.2.4	群体共识度	80
6.2.5	方法步骤	80
6.3	本章小结	81
第 7 章	城区雨涝风险综合评估仿真实验	83
7.1	仿真实验一	83

7.2	仿真实验二	90
7.3	仿真实验三	95
7.4	仿真实验四	100
7.5	仿真实验五	104
7.6	仿真实验六	107
7.7	本章小结	113
第 8 章	城区雨涝风险治理政策建议	115
8.1	完善排蓄设施建设	115
8.2	推进海绵城市建设	117
8.3	扩大综合管廊建设	119
8.4	加快智慧气象建设	121
8.5	促进人员机构调整	123
8.6	健全应急救援体系	124
8.7	确保人才智力支持	125
8.8	本章小结	126
第 9 章	结论	127
	参考文献	129



第1章 绪 论

.....

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

在全球城市人口数量快速增长的大背景下(如图1-1所示^[1]),中国大量农业转移人口涌入城市(如图1-2所示^[2]),一些城市空间无序开发、人口过度集聚,重经济发展、轻环境保护,重城市建设、轻管理服务,“建设性”破坏不断蔓延,资源环境约束趋紧,植被遭到破坏,城中河道、湖泊被填屡见不鲜,导致生态系统自有的渗、排水机制被打破^[3]。同时,一些城市建设“重显绩、轻潜绩”“重面子、轻里子”“重地上、轻地下”,将政治、新城、商业、产业、道路等地标建筑物、构筑物建造得富丽堂皇,对地下管线等民生基础设施投入相对不足(如图1-3所示^[4])。

近年来,中国城市雨涝呈现发生范围广、积水深度大、滞水时间长的特点,造成严重的社会经济损害,危及人民群众生命,已成为城市化进程中凸显的新难题。据中国住建部2010年专项调研显示:在国内351个城市中,2008~2010年间,有62%的城市发生过不同程度的内涝,其中137个城市超过3次以上,57个城市的最大积水时间超过12 h。2011年夏,北京、上海、

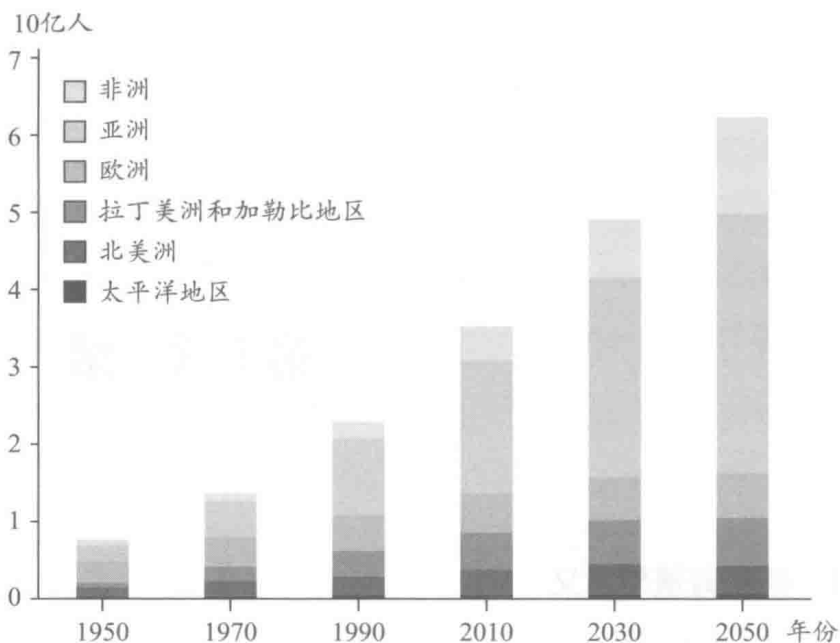


图 1-1 1950~2050 年全球城市人口数量增长态势

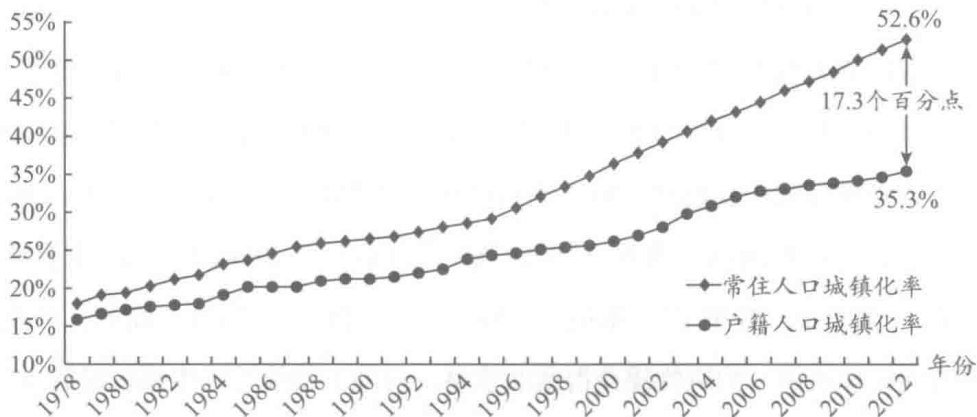


图 1-2 1978~2012 年中国常住人口城镇化率与户籍人口城镇化率

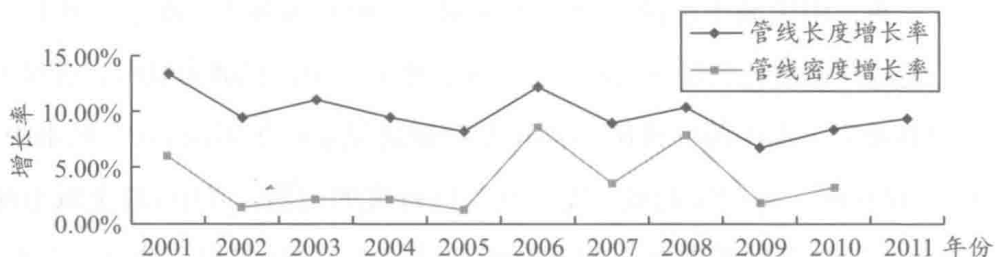


图 1-3 2001~2011 年中国地下管线长度与密度增长率

南京、武汉、西安、长沙、杭州、南昌、合肥、成都等近20座城市因暴雨积涝成灾。2012年夏，南北方多地普降大雨，上海、广州、重庆、深圳、大连、武汉、合肥等城市不同程度地发生内涝，北京甚至遭遇61年最强暴雨，市内发生严重内涝，损失惨重。2015年，联合国环境规划署在《全球环境展望：地区评估》报告中指出，亚太地区是2015年世界上受自然灾害影响最严重的地区，预计到2070年，广州、上海等亚洲沿海人口密集城市将受洪涝的严峻威胁。2016年，国家气候中心称，受2015年、2016年超强厄尔尼诺和近期赤道中东太平洋拉尼娜状态的影响，2016年暴雨频数和强度大，城市内涝等气象灾害重，汛期强对流天气过程次数(59次)为2010年以来同期最多，强降水导致全国26个省(区、市)出现城市内涝，如北京、天津、武汉、西安、太原、石家庄、葫芦岛等城市。在城市雨涝中，水漫全城的情形较为罕见，通常表现为一个或多个城市片区被淹；同时，有些城市雨涝与缺水问题交替频现。这种结构性现象值得高度重视和深入研究。

1.1.2 研究目的与意义

本著作拟根据城市结构性雨涝的成灾特点，综合评估各个城市片区遭遇雨涝的风险程度，分清轻重缓急，提出综合配套政策，着力解决系统性不强、标准不高、局部地区隐患严重的问题，以降低城市结构性雨涝风险。

在习近平新时代中国特色社会主义思想的指导下，建立和完善中国内陆大中城市结构性雨涝灾害风险的多元化治理政策，对促进城镇新型化发展、自然灾害综合防治和水生态持续改善，推进“两型”社会、和谐社会和全面小康社会建设具有重要的理论价值和实践意义。

本著作提出的中国内陆大中城市结构性雨涝灾害的成灾模式、风险评估体系以及风险的多元化治理政策，理论上，可进一步丰富和完善城市自然灾害

风险管理的理论体系；实践上，对城市园林、水利、气象、民政、环保、国土资源以及“两型”办等管理部门加强城市雨涝灾害风险管理和城市建设统筹规划具有重要的决策参考作用，进而提供有益的经验借鉴。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 城市雨涝风险分析与评估

针对城区雨涝风险管理中的关键问题和薄弱环节，提出评估准则，确定评估水平，有利于在雨涝引起城区经济、生态严重破坏前，分清轻重缓急，准确发布预警信息，从而及时采取针对性的预防措施，化解警情，否则将阻滞城市可持续发展。目前，国内外对城市雨涝灾害风险分析与评估已取得一定研究成果主要有以下几方面：

(1) 损失评估与预测。冯平等(2001)建立洪灾直接经济损失的评估与预测模型，并应用于天津滨海新区^[5]。黄琰等(2011)构建极端降水对道路交通造成经济损失的估算模型，并应用于上海地区^[6]。姜玲等(2014)认为城市洪涝灾害的间接经济损失主要由产业关联损失与资源关联损失构成，利用关联分析评估间接经济损失^[7]。

(2) 易损性分析与评估。毛德华等(2002)总体诊断湖南城市的洪涝易损性，运用模糊综合评判对其进行定量评估^[8]。朱聪等(2005)将投影寻踪模型应用于湖南29个城市的洪涝易损性分类与诊断^[9]。谢云霞等(2012)建立分形模糊集对分析模型，评估湖南29个城市的洪涝易损性^[10]。

(3) 脆弱性分析与评估。石勇等(2009)利用灾损曲线评估2008年遭受南方洪涝灾害的居住建筑的脆弱性^[11]。陆敏等(2010)揭示上海受暴雨灾害的脆弱性演化特征^[12]。张华等(2011)对上海浦东新区8种土地利用类型在不同重现期