

前 言

21 世纪以来,受全球气候变化与城市化进程双重驱动的影响,城市洪涝灾害呈现出频次增多、强度增大、影响范围更广的严峻态势,成为制约城市可持续发展的全球性挑战。在我国,城市洪涝灾害的影响尤为突出,“逢暴雨必涝”已成为影响城市公共安全和可持续发展的突出问题。洪涝灾害防控已成为国际国内亟须解决的重大课题,也是我国城市水安全保障体系建设和经济社会可持续发展的核心需求。2024 年 12 月 18 日,中国工程院发布全球工程前沿重要研究方向,将大中城市洪涝灾害风险评价与调控体系纳入土木、水利与建筑工程行业的重点关注课题。随着韧性城市理念被纳入国家战略规划,在国家政策的支持和学术界的推动下,城市洪涝灾害逐渐成为社会各界关注的核心议题。

本书在国家重点研发计划“揭榜挂帅”项目课题“城市洪涝组合致灾机理与复杂承载体特性”(2022YFC3090601)、国家自然科学基金面上项目(52579025)、国家自然科学基金青年项目(52509031)等资助下,以城市洪涝多维致灾风险与防灾决策为核心,构建“致灾机理揭示—洪涝风险区划—洪涝风险防控”的全链条研究体系。除绪论外,主要内容可分为三部分。

第一部分包括第 2、3 章,旨在建立城市洪涝过程溯源模拟模型,揭示城市洪涝致灾机理。第 2 章多角度分析降雨—潮位之间的关联特性及其变化趋势,探讨参数估计方法、联合重现期类型和组合设计方法对降雨—潮位联合设计值的影响,提出沿海城市降雨—潮位遭遇设计实践中更为安全的方法,为城市洪涝模型中多维致灾因子边界输入提供依据。第 3 章建立融合水量示踪溯源的城市洪涝过程模拟模型,提出基于结构方程模型的城市洪涝致灾机理解析模型,为城市协同防灾策略及治理措施布设提供了理论基础。

第二部分包括第 4、5 章,旨在提出精细化城市洪涝风险评估与空间区划方法。第 4 章提出沿海城市洪涝多维致灾因子致灾作用度量化方法,开展沿海城市洪涝灾害致灾因子风险空间区划,评估不同风险区划排涝措施的适应性。第 5 章提出基于改进熵权和聚类分析的城市洪涝风险评估方法,解决风险评估中等级划分阈值不易确定的难题,为城市洪涝风险评价提供新的途径。

第三部分包括第 6、7 章,旨在建立城市洪涝风险适应性防控与优化配置模型。第 6 章考虑气候变化及模型不确定性,建立基于分期优化策略的城市洪涝风险防控模型,在满足规划期防洪排涝标准的前提下,使决策者可根据气候及城市实际情况分期实施减灾工程。第 7 章运用证据理论与多属性匹配模型,建立洪涝治理措施与城市特征、治理目标之

间的适应性配置模型，提出兼具效果和效益的城市洪涝防控措施配置方案，为城市洪涝灾害防控提供决策技术支撑。

本书的第一完成单位为郑州大学，天津大学和天津理工大学参与完成。主要完成人包括许红师、王慧亮、齐文超、马超，研究生薛万杰、徐山仑、管永乐、张家豪、尹梦琦、邓宇赫、周永杰、周志宏、卢安镇、张子扬、郜立龙等参与了资料收集及图文编辑等工作。

因时间有限及作者理论水平的局限性，写作过程中难免有所疏漏，恳请广大读者海涵并不吝赐教！

作 者
2026 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 本书的研究对象	12
第 2 章 城市洪涝多维致灾因子关联特征及其组合生成方法	15
2.1 研究方法	15
2.2 城市洪涝多维致灾因子关联特征分析	28
2.3 城市洪涝多维致灾因子组合设计	34
2.4 小结	46
第 3 章 城市洪涝多维致灾示踪模拟模型及成因分析	48
3.1 城市洪涝过程数值模拟原理	48
3.2 耦合水流示踪方法的城市洪涝过程模拟模型	52
3.3 典型区域洪涝过程模拟及积水示踪溯源	60
3.4 基于水量示踪的城市洪涝致灾成因分析	67
3.5 小结	74
第 4 章 城市洪涝致灾因子风险区划及措施适应性评估	75
4.1 城市致灾因子致灾作用度量化及其区划方法	76
4.2 基于致灾因子区划的排涝措施适应性评估方法	78
4.3 实例应用	79
4.4 小 结	88
第 5 章 基于改进熵权和聚类分析的城市洪涝风险评估	90
5.1 研究方法	91
5.2 基于情景分析的城市洪涝风险评估指标选取及量化	98
5.3 实例应用	100
5.4 小结	106

第 6 章 考虑不确定性的城市洪涝风险分期优化防控 107

 6.1 气候变化下设计降雨标准分析方法 107

 6.2 洪涝模型不确定性分析方法 109

 6.3 考虑不确定性的城市洪涝风险分期优化防控模型 112

 6.4 实例应用 115

 6.5 小结 125

第 7 章 基于多属性匹配模型的城市洪涝措施适应性配置 127

 7.1 研究方法 128

 7.2 典型区域洪涝措施特性及适应性分析 133

 7.3 基于多属性匹配模型的典型区域洪涝措施适应性配置方案 146

 7.4 小结 152

参考文献 154

第 1 章 | 绪 论

1.1 研究背景与意义

联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告指出：1901 ~ 2010 年全球平均海平面上升了 0.19m，1880 ~ 2012 年全球海陆表面平均温度升高了约 0.85℃。全球气候变化异常，将会使极端降雨、台风、海平面上升等极端事件频繁发生。Beniston（2009）指出，全球变暖导致大尺度上极端暴雨事件增加，将加重城市的洪涝灾害。Adger 等（2005）与 Kelly 和 Adger（2000）认为气候变化会导致极端暴雨事件的强度增大、频率增加，从而引发全球范围内高频率的洪水灾害。

在全球气候变化发生的同时，人类社会也在以前所未有的速度进行着另一场变革——城市化。图 1-1 为我国自 1978 年以来历年城市化率的变化情况，由图可知，中国城市化率逐年升高。城市化会导致城市不透水面积增加，使得城市产汇流出现洪峰流量增大、行洪历时缩短、洪水总量增加等特征，从而增加了洪涝灾害发生的频率；同时城市化进程导致人口和经济资源不断向城市范围内聚集，使暴露于洪水灾害中的人口数量和资源量显著增加，城市洪涝灾害带来的损失也大大增加。

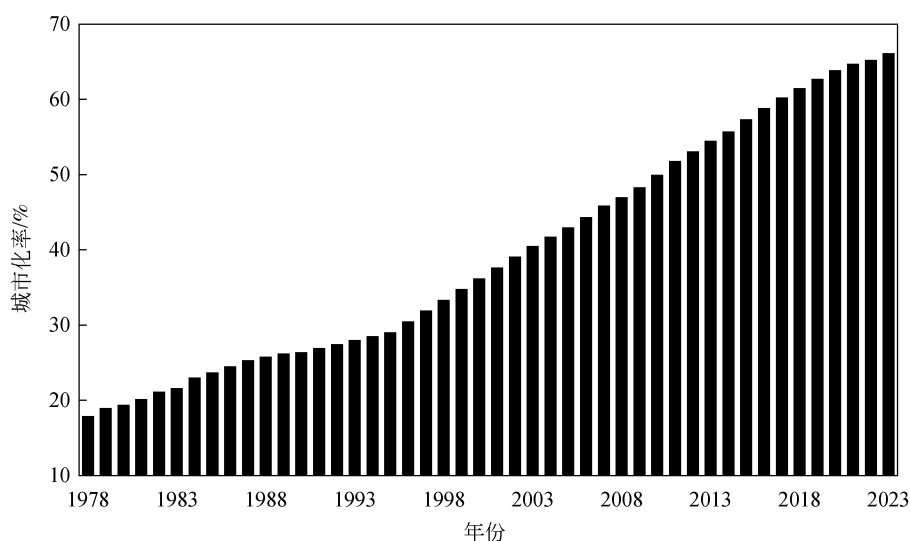


图 1-1 1978 年以来中国历年城市化率

近 20 年来，全球气候变化与城市化对洪水灾害的耦合效应不断凸显，使得洪水灾害发生频率增加，灾害损失加大。从世界范围内来看，洪水灾害是特别常见且影响范围特别大的灾害之一，而我国是世界上受洪水灾害影响特别严重的国家之一。世界卫生组织紧急事件数据库资料显示，1900 ~ 2011 年的 100 多年间，全球死亡人数最多的十大洪灾事件有 7 次发生在我国；全球受影响人数最多的十大洪灾事件有 9 次发生在我国；全球经济损失最严重的十大洪灾事件有 3 次发生在我国。我国城市洪涝灾害呈上升趋势，尤其是 1980 年以来，暴雨日数与极端降水事件数均呈增加趋势。2000 年以后，我国洪水灾害呈现出受灾范围广、人员伤亡重、直接经济损失大（图 1-2）等特征。据《中国水旱灾害公报》统计，2010 ~ 2018 年我国年均 165 座城市发生严重洪涝，“逢暴雨必涝”已成为影响我国城市公共安全和可持续发展的突出问题。联合国教育、科学及文化组织政府间水文计划第八阶段将“与水有关的灾害与水文变化”作为阶段重点“水安全：应对地方、区域及全球挑战”的六大主题之一，我国“十四五”规划、国家重点研发计划“重大自然灾害防控与公共安全”重点专项等也将城市洪涝问题相关研究作为国家重点开展和支持的工作。因此，城市洪涝灾害防控是国际国内急需解决的问题，也是我国城市水安全保障体系建设和经济社会可持续发展的重大需求。

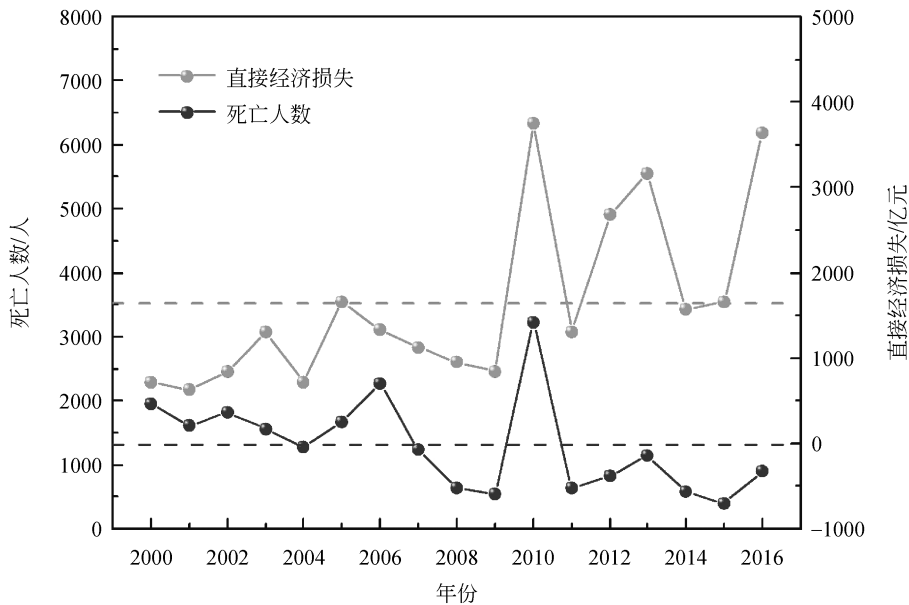


图 1-2 2000 ~ 2016 年中国历年洪涝灾害损失

数据来源：《中国水旱灾害公报》

沿海地区是人口、经济和社会发展的重点区域与集聚中心，占我国陆地面积的 13.4%，承载着 44.5% 的人口，创造了 54.9% 的 GDP。沿海城市人口众多，经济发达，其致灾风险源更加复杂，承灾体的暴露性更加明显，灾害脆弱性更加显著。在沿海城市，

洪涝灾害受降雨和潮位等多维致灾因子联合影响。区域强降雨或者风暴潮均可直接造成沿海城市洪涝，或者降雨条件下高潮位阻碍城市排水系统导致洪涝。以沿海城市海口市为例，2010年10月3~18日海口市发生长历时强降雨，造成城区全面受灾，平均淹没水深为0.7m，最大淹没水深为1.2m，严重受淹城区面积达8.95km²，约占主城区面积的18.3%，倒塌房屋45间，大量房屋商铺受损，造成城区直接经济损失3.3637亿元。2014年，受9号超强台风“威马逊”影响，海口市普降大暴雨，局部特大暴雨，且受高潮位(3.83m)顶托影响严重，从而导致全市洪涝灾害损失严重，受灾人口85.59万人，转移人口4.53万人，造成直接经济损失约136.27亿元。另外，研究表明，随着全球进一步变暖，沿海地区海平面将会进一步上升以及西北太平洋也会出现更多的强台风事件。增强的台风叠加快速上升的海平面，将导致风暴潮、洪水等灾害在强度与频率上进一步加大，沿海城市洪涝灾害将会进一步加重。

对于沿海城市，洪涝灾害受暴雨、外江洪水/潮位等多维致灾因子联合影响，多维致灾因子的联合作用将显著加剧洪涝风险和损失程度。本书围绕城市洪涝多维致灾风险与调控问题，分析城市洪涝多维致灾因子关联特性，提出城市洪涝多维致灾因子组合情景生成方法；建立耦合粒子示踪的城市洪涝多维致灾模拟模型，揭示城市洪涝多维致灾成因；提出城市多维致灾因子致灾作用度及风险区划方法，分析不同致灾因子风险区划排涝措施适应性；提出基于改进熵权和聚类分析的城市洪涝风险评估方法，建立考虑不确定性的城市洪涝风险分期优化防控模型，推选城市洪涝风险调控措施分期实施方案；构建表征治理措施洪涝防治效果的防灾适应性指标和表征治理措施建设可行性的区域适应性指标，建立城市洪涝治理措施适应性配置的多属性双边匹配模型，形成洪涝治理措施最佳适应的双边匹配方案。研究成果有利于推动城市水文学科多风险源致灾理论的发展，可为我国城市洪涝灾害防控提供重要理论方法支撑。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 城市洪涝多维致灾研究进展

1.2.1.1 多维致灾因子水文频率分析方法

传统的水文频率分析以单变量分析为主，但是沿海城市洪涝致灾因子往往是多变量的，因此单变量水文频率分析难以达到设计要求，研究多变量的水文频率模型非常重要。目前，水文领域常用的多变量分析方法主要有特定边缘分布构成的联合分布、非参数方法、基于经验频率的EFM法、正态变换法（Moran法）、将多维转化为一维的费永法

(FEI 法) 以及 Copula 函数法等。

1) 特定边缘分布构成的联合分布。该方法一般用于二维情景, 其假定各变量具有相同的边缘概率分布函数。在水文分析计算中常用的此类联合分布包括: 两变量对数正态分布模型、两变量指数分布模型、两变量 Gumbel 分布模型、两变量 P-Ⅲ型分布模型、两变量 Gumbel-logistic 模型等。但是实际上不同的水文变量不一定服从相同的概率分布, 所以该方法应用过程中存在一定的误差。

2) 非参数方法。非参数方法不必假定各变量的边缘分布函数, 可以直接根据观测数据对总体的概率分布函数进行估计。该方法的主要优点在于避开边缘分布函数选择不确定性的问题, 能够较好地拟合实际数据, 但是其数据外延及预测的准确性较弱。最常用非参数估计方法为核密度估计方法, 目前已有许多研究运用多维核密度估计方法进行多变量频率分析和随机模拟等。

3) 基于经验频率的 EFM 法。当随机变量数据系列较长, 且其中的变量个数比较少时, 可以运用经验频率法进行联合分布计算。在水文分析中, 因其计算原理简便, 经验频率法应用较为广泛, 但和非参数方法一样, 二者均存在数据外延准确性较差的问题, 仅能对实测资料进行分析。

4) 正态变换法 (Moran 法)。正态变换法是指将各变量的原始数据通过正态化变换工具变换为正态分布变量, 然后根据特定边缘分布构成联合分布的方法, 推求各变量间的联合正态概率分布。采用此方法进行多维联合分布计算的关键问题是选取合适的正态化变换工具, 目前常用的正态化变换工具包括多项式正态变换 (PNT) 和 Box-Cox 变换两种变换方法。戴昌军和梁忠民 (2006) 研究表明 Box-Cox 变换后样本的正态性比多项式正态变换后的正态性好。正态变换法的缺点主要集中于原始数据正态化转化过程中, 一方面正态化变换过程数据计算量较大, 另一方面可能会导致原始数据失真。

5) 将多维转化为一维的费永法 (FEI 法)。费永法运用时间积原理提出了将二维、多维变量转换为一维变量, 从而进行频率分析的方法。目前该方法已成功运用到洪水遭遇频率分析中。FEI 法的优点在于可以避免烦琐的计算, 大大简化工作量, 但是该方法不能给出联合概率密度函数的数学表达式, 数据外延时同样存在问题。

6) Copula 函数法。Copula 函数为一种连接函数, 可以连接两个不同的边缘分布构造联合概率分布。与其他方法相比, Copula 函数法的优势主要在于边缘分布可以根据变量特征进行选取, 不需要假定各变量边缘分布相同, 形式灵活多样, 求解比较简单, 且对正、负相关的情形都适用。Copula 理论的提出最早可追溯到 1959 年, 但直到 2003 年, Copula 函数才由 De Michele 和 Salvadori (2003) 引入水文领域, 此后十余年越来越多的水文学者对其开展研究。2007 年, *Journal of Hydrologic Engineering* 开设专刊, 综述介绍了 Copula 函数理论及其在水文领域中的应用。2018 年, 为纪念 Copula 函数引入水文领域十五年, De Michele 和 Salvadori 在 *Water* 上开设专刊以探讨 Copula 函数在水文领域的最新应用及其存

在的问题。在多变量频率分析方面, Salvadori 和 De Michele (2004a) 运用 Copula 函数对降雨特征(强度和历时)开展研究; Salvadori 和 De Michele (2004b) 以及 Zhang 和 Singh (2007) 通过比选得到最优 Copula 函数, 以此构建降雨特征间的联合概率分布函数, 为降雨的频率分析提供了新的途径; Favre 等 (2004) 运用 Copula 函数分析了洪峰和洪量的联合概率分布以及洪水遭遇概率; Karmakar 和 Simonovic (2009) 运用混合边缘分布函数构建 Copula 函数, 进而对洪峰、洪量及洪水历时开展二元频率分析; 陈璐等 (2010) 从洪水量级和发生时间两方面联合考虑, 运用 Copula 函数提出了一种新的分期设计洪水计算方法; 侯芸芸等 (2010) 利用 Copula 函数构建洪峰、洪量和历时三变量的联合概率分布与条件概率分布; 闫宝伟等 (2013) 基于多维联合分布建模的思想, 采用 Copula 函数构建了长江和清江洪水过程遭遇的风险计算模型; 李天元等 (2014) 运用 Copula 函数构建洪峰和洪量联合分布函数, 计算得出了同频率组合和条件期望组合两种条件下洪峰、洪量的设计组合值; 林炯等 (2017) 基于 Copula 函数原理, 利用武江流域实测水文资料, 以广义 GDP 为洪峰洪量边缘分布, 构建了洪水组合变量 Copula 概率分布模型, 分析了洪峰与洪量、洪量与洪水历时、洪峰与洪水历时的联合概率分布; 尹家波等 (2018) 通过建立基于 Parametric Bootstrap 方法的 Copula 模型, 考虑了设计洪水估计不确定性对水库防洪安全的影响。

综上所述, 目前国内外学者提出了一系列多变量水文事件联合分析方法, 各有优缺点, 其中 Copula 函数法应用最为广泛。

1.2.1.2 沿海城市洪涝多维致灾因子联合分析研究进展

沿海城市受气候条件、地理位置及地形地势等影响, 降雨和潮位均为洪涝灾害的致灾因子。近年来, 国内外学者从降雨和潮位的关联性与联合分布两方面展开了研究。Pugh (1987) 发现在风力和低气压的作用下, 强降雨和风暴潮是有关联性的, 这两种极端事件可以同时发生。Coles 等 (1999) 研究了英格兰南部的牛津与沃辛地区的降雨和潮位的统计关联性, 指出极端降雨和极端风暴潮在统计上的显著相关性。Svensson 和 Jones (2002) 利用 8 个潮位站与 20 个雨量站的数据, 研究了英国东部高潮位、河流流量和降雨之间的关联性, 结果表明极端风暴潮事件与极端降雨事件发生在同一天的条件概率为 20%。随后, Svensson 和 Jones (2004) 运用 1963 ~ 2001 年 19 个潮位测站与 27 个降雨测站数据, 分析了英国南部与西部高潮位、河流流量和降雨之间的关联特性, 研究表明降雨和高潮位间存在明显的相关性, 且二者发生在同一天时相关性较高(无时滞)。White (2009) 研究了英国东萨塞克斯一个易受潮位顶托与洪水泛滥影响的镇的河流流量、天文潮和风暴潮的关联性强度。在这个区域发现了河流流量和天文潮位存在低却显著的关联性, 但是河流流量与风暴增水之间存在着一种较高的关联性。Zheng 等 (2013) 利用 49 个潮位站、4890 个日降雨量站资料, 通过构建 Logistic 型二元超阈值模型对澳大利亚海岸线上极端降雨和

潮位的相关性进行了详细的分析。研究发现由于降雨、潮位的相关性,二者同时超阈值的风险最大可提高 35 倍。Zheng 等 (2014) 分析了超阈值方法、点过程方法及条件方法构建降雨和潮位联合分布的适应性,研究发现当降雨和潮位具有强相关关系时,点过程方法比较适合,当二者相关关系较弱时,三种方法都不太适合。Wahl 等 (2015) 以美国海岸城市为例,研究了降雨和风暴潮联合致涝事件的变化趋势,相关研究成果发表在 *Nature* 子刊上。研究结果表明,近年来大部分美国沿海岸城市降雨和潮位联合致涝事件呈现显著增加趋势。长期海平面上升是洪涝灾害增加的一个诱因。风暴潮天气模式的转变也是联合致涝事件增加的一个原因。Moftakhari 等 (2017) 在世界四大名刊之一 *PNAS* 上发表了未来情景下河流流量和潮位对洪涝灾害联合作用的研究。研究运用 RCPs 预测模型,考虑未来情景下 (2030 年和 2050 年) 海平面上升的影响,运用二元 Copula 函数分析河流流量和潮位对洪涝灾害的联合致灾作用。研究表明,海平面上升不仅增加了失效概率,而且增强了洪涝致灾因子 (河流洪水和潮位) 间的联合影响。

就国内而言,21 世纪初国内学者开始关注到沿海城市降雨和潮位间的关联特性,通过构建二者的联合分布研究降雨和潮位间的遭遇概率及其对沿海城市排涝工程设计值的影响。林荣和李国芳 (2000) 采用正态变换法得到了黄浦江潮位和降雨的遭遇概率,并推求出了相应组合概率下的设计水面线。刘曾美等 (2010) 运用 Copula 函数研究了中山市坦洲镇涝区的暴雨和外江潮水位遭遇的联合分布,发现两者的相关性较高,提出了基于两者遭遇概率的沿海地区治涝标准确定方法。任锦亮等 (2013) 基于 1970 ~ 2011 年上海徐家汇气象站日降雨资料和黄浦江吴淞潮位站日潮位资料,采用 P-III 型分布拟合了台风降雨和潮位的概率分布,建立了基于 Copula 函数的台风降雨与潮位联合分布模型,并分析了台风降雨与潮位的组合风险概率及两变量重现期。Lian 等 (2013) 利用水动力模拟及 Copula 函数研究了暴雨和潮位的联合作用对洪涝灾损的影响,得出福州市主城区洪涝灾害的灾生条件,并指出福州市洪涝灾害的主要致灾因子为降雨,但高潮位会增加潜在洪涝风险,沿海城市洪涝防治标准的制定应充分考虑降雨和潮位双致灾因子。Xu 等 (2014) 通过比选后的 Copula 函数得到了环境变化对暴雨和潮位的联合风险率的影响,自 1985 年以来,福州市极端事件组合平均增长率超过 300%。武传号等 (2014) 运用 Archimedean Copula 函数构建了广州市雨潮组合风险概率模型,得到了雨潮组合的条件风险概率、同现风险概率、致涝风险概率及重现期,分析表明基于 Copula 函数的雨潮联合分布拟合较好。练继建等 (2015) 基于不同标准下的暴雨潮位组合,采用排水数学概化模型和城市水系数值模拟模型计算了各种组合工况下沿海城市不同区域的淹没范围,提出了识别、量化不同区域暴雨和潮位致灾作用度的方法,并进行了暴雨和潮位致灾风险区划;随后, Lian 等 (2017) 对暴雨潮位致灾作用度识别量化方法进行了进一步优化,并从减灾效应和成本效益两方面综合评估了不同因子下排涝措施的适用性。黄锦林等 (2017) 采用最大熵-AMH Copula 方法构建了年最大潮位和相应 1h 降雨量与年最大 1h 降雨量和相应潮位关联性分析模型,对

雨潮组合的致涝风险概率、同现风险概率、组合风险概率、遭遇风险概率进行了比较分析,指出在实际工程设计中,适当提高潮位设计值可有效降低致涝、遭遇和组合风险概率值。范嘉炜和黄锦林(2017)以江门市三江口水文站1985~2010年的历年最大1h降雨量与相应时段的潮位为基础数据,运用G-H Copula函数构建降雨和潮位的联合分布函数,验证了Kendall重现期的合理性。万永静等(2017)基于1959~2010年滁河中下游暴雨资料及南京下关站潮位资料,采用Copula函数得到了超阈值暴雨和潮位、超阈值潮位和暴雨间的遭遇概率。许红师(2018)运用三维Copula函数构建了台风-降雨-潮位联合分布函数,综合运用水动力模型及风险分析模型评估了台风对降雨和潮位联合致涝作用的影响。

综上所述,降雨和潮位均为沿海城市洪涝灾害的致灾因子,且二者具有显著的关联特性,因此在相关研究中得到了普遍的关注。目前,关于沿海城市多维致灾因子的分析多运用Copula函数构建二者的联合分布,进而研究二者间的相关性、遭遇概率、条件概率和组合设计等。

1.2.2 城市洪涝风险评估研究进展

在洪涝灾害预防、防备和减灾三项工作中,洪涝灾害预防工作最为重要,而灾害风险评估作为灾害预防的重要工具,成为人类社会预防自然灾害、控制和降低自然灾害风险的重要基础研究。精确的洪涝风险评估对洪涝灾害管理、灾害预警与防洪减灾规划具有重要作用。国外关于洪涝灾害风险评估方面的研究始于1933年,我国从20世纪80年代末期才开始开展洪涝灾害风险研究。通过对国内外洪涝风险评估研究成果的梳理,现阶段比较常见的洪涝风险评估方法包括以下四种。

(1) 基于历史灾情数理统计的洪涝灾害风险评估

该评估方法根据历史洪水记载的相关信息,对历史灾害的数据进行统计分析,建立起灾害发生概率与其影响因素的统计模型,从而确定洪涝灾害风险。该方法计算简单,不需要详尽的水系、地形、地貌、地质等数据,但是该方法也存在一定的不足,如该方法需要长时间历史灾害数据,由于城市洪涝灾害的灾情数据较少且难以获取,因此在应用上具有一定的局限性;该方法的风险评估结果为区域整体风险水平,难以反映洪涝灾害的空间分布规律;而且该方法得到的评估结果是历史灾情的反映,在气候变化和城市化的背景下,历史灾情未必能代表未来灾害发生的风险。郭涛(1991)基于2000多年的历史洪水资料,分析了四川洪涝灾害的分布规律,指出了防洪减灾方面的有利及不利条件。程根伟和陈桂蓉(1996)基于长江上游1300多年的灾害损失数据,得出了洪涝灾害发生的频率和面积分布,并据此提出了一些防灾减灾措施。刘新立和史培军(2001)以长江流域历史洪涝灾害资料(1736~1911年)作为风险评估的基础数据,应用马尔可夫链模型分析了长江流域1911~1915年的洪涝灾害风险。许月卿等(2001)基于521年的河北省水旱灾害资料,

分析了河北省水旱灾害发生情况。Barredo (2007) 根据慕尼黑再保险和 EM-DAT 两大全球性公共自然灾害数据库, 基于经济损失和死亡人口两个指标制作了全欧洲范围内的洪水灾害目录清单和重大洪涝灾害分布图。Yu 等 (2009) 根据近 100 年长江中下游地区历史洪水和降雨资料 (1860 ~ 1985 年), 分析了研究区域历史洪水特性与降雨之间的关系, 提出长江洪涝的重复周期。王静静等 (2010) 选取上海、浙江、福建、广东四省市为研究区域, 统计研究区域 50 年的暴雨洪涝资料 (1951 ~ 2000 年), 利用 ArcView 的空间分析和叠加功能, 将不同阶段各省市的受灾分布图进行叠加, 得到了东南沿海地区暴雨洪涝灾害风险性评价图。

(2) 基于指标体系的洪涝灾害风险评估

该评估方法是现阶段国内外应用最为广泛的洪涝灾害风险评估方法。该方法首先需要借鉴国内外基于指标体系的灾害风险评估的研究成果, 依据科学性、合理性、可靠性、数据可获取性以及研究区域特点, 构建洪涝灾害风险评估指标体系; 选取合适的评估指标后, 需要考虑不同指标对计算结果的贡献程度, 对其赋予不同的权重, 权重赋值的方法主要包括专家打分法、层次分析法、熵权法、主成分分析法等; 然后根据选择的洪涝风险综合评估模型进行洪涝风险评估, 目前常用的基于指标体系的洪涝风险综合评估模型包括模糊综合评价法、投影寻踪模型、TOPSIS 模型和灰色系统方法等。近年来, 在指标体系的基础上又有一些新兴的洪涝风险评估方法涌现出来, 如赖成光等 (2015a) 和 Wang 等 (2015) 依据灾害理论选取降雨、坡度、高程等 10 个评价指标, 构建了基于随机森林智能算法的洪灾风险评价模型。该模型的数据挖掘能力更强, 其风险评判精度、分级结果均优于支持向量机的计算结果。随后, 赖成光等 (2015b) 又提出了一种基于蚁群规则挖掘算法的洪灾风险区划模型, 以解决指标变量与风险级别间的非线性关系, 研究结果表明, 与 BP 神经网络模型相比, 基于蚁群规则挖掘算法的洪灾风险区划模型分类性能更好, 对洪灾风险区划具有更好的适用性。王贺等 (2014) 选取降雨量、淹没水深、历时等指标, 运用云模型定量评价洪涝风险的等级, 建立基于正态云模型的极端雨洪下城市洪水风险综合评价模型, 对景德镇极端雨洪引发的洪水风险进行评价, 得到了 1990 ~ 2012 年景德镇每年的洪水风险等级。石晓静等 (2017) 在实地调查的基础上, 选取 8 个代表性的指标, 建立评价指标体系; 采用熵权法计算指标的权重, 引入云模型的方法获取洪灾风险隶属度; 将权重和隶属度进行转化计算, 按照最大隶属度原则, 得到了安康市 2010 年和 1983 年的洪涝风险等级。

基于指标体系的洪涝灾害风险评估计算相对简单, 可以从宏观上反映区域洪涝风险状况, 同时该方法也存在一些缺点, 如现阶段洪涝风险评估指标体系的选取没有统一的标准, 且受可获取数据的影响较大; 不能反映灾害风险系统各要素间的内部联系和演化过程, 可能会导致一定的风险估值不准确, 不太适合在小尺度区域开展。

(3) 基于情景分析的洪涝灾害风险评估

该评估方法是运用洪涝模拟数值计算, 推求不同情景下洪水演进过程, 从而得到相应

的洪水淹没范围、历时、水深等资料，然后依据一定的分级标准，给出该区域的洪涝灾害风险分布。该方法的关键是通过成熟的水文水动力模型模拟不同暴雨条件下的洪涝灾害情景。在水文水动力模型开发方面，欧美发达国家科研机构和公司开发的模型比较成熟，在城市洪涝灾害情景分析中应用广泛，如 SWMM、MIKE URBAN 等，国内的城市暴雨洪涝模型研究相比国外起步较晚，但是也取得了一定的成果，国内外城市雨洪模型研究进展如图 1-3 所示。随着城市雨洪模型的完善，国内外学者基于情景模拟分析的思路对不同地区洪涝灾害成灾机理与风险进行了探索。张犁（1995）基于 GIS 构建了城市洪水分析与模拟信息系统，并应用该系统对 1994 年 5 月 3 日福建三明市的洪水过程进行了模拟与分析。

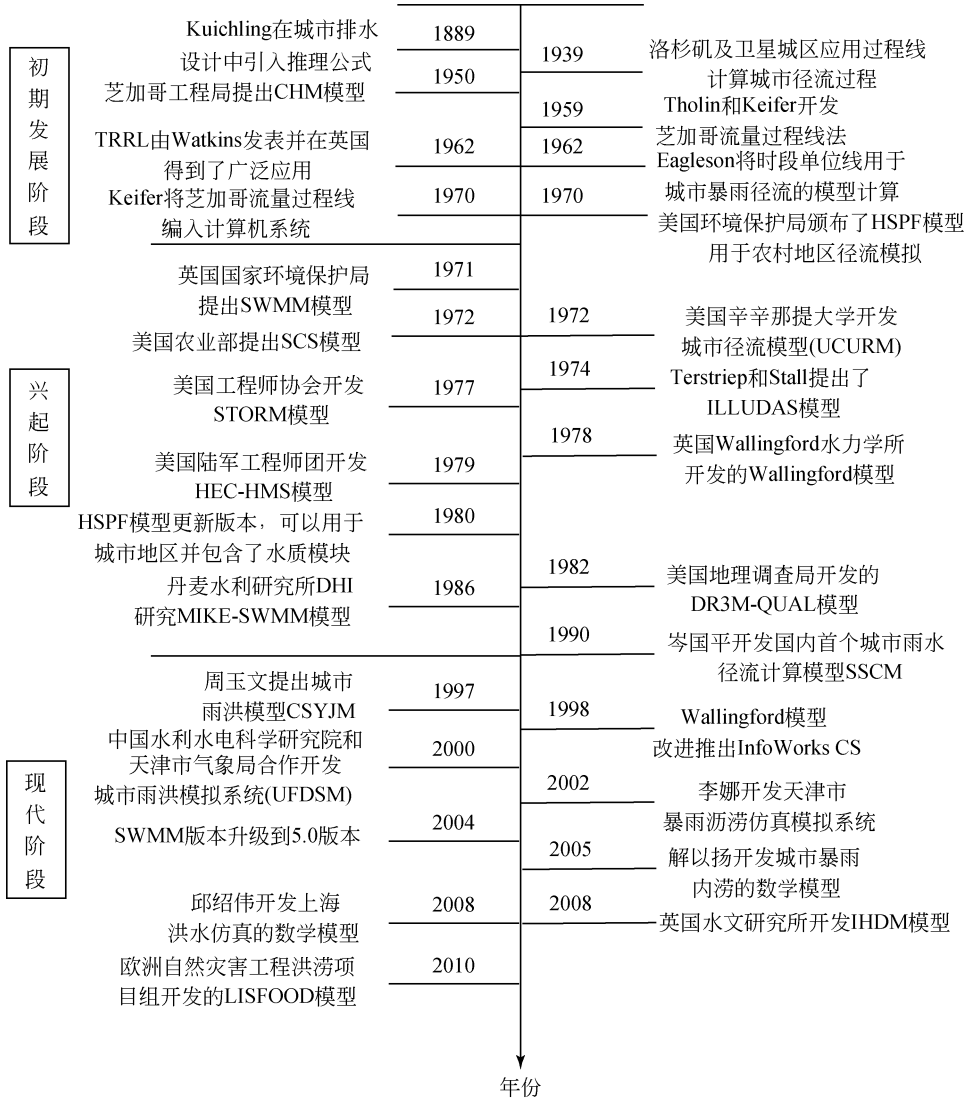


图 1-3 城市雨洪模型研究进展图

Suarez 等（2005）以波士顿市区交通系统为例，采用情景模拟的方法分析了洪灾和气候变化对其造成的影响。王建鹏等（2008）基于西安市强降雨洪涝预警系统对西安市洪涝成因进行了深入分析。Shi 等（2010）对两种暴雨情景下上海市中心城区旧式住宅的暴雨洪涝暴露度进行了分析评估。孙阿丽（2011）通过构建水文模型选取 20 年一遇和 50 年一遇暴雨情景，对上海市黄浦区主要承载体的洪涝危险性进行分析。权瑞松（2012）基于简化的城市暴雨洪涝模型对不同暴雨情景下上海市中心城区住宅的洪涝风险进行分析评估。黄国如等（2015）结合 GIS 工具运用 SWMM 模型构建了排水管网水力模型，评估了海口市海甸岛在 1 年、2 年、5 年、10 年、20 年设计暴雨情形下的洪涝风险。黄国如等（2017）基于 InfoWorks ICM 构建了海口市主城区综合排水模型，对 1 年、2 年、5 年、10 年、20 年重现期下海口市主城区排水管网系统的排水能力和积水深度进行模拟。任梅芳等（2018）采用 MIKE URBAN 模型和 MIKE 21 FM 模型，以济南市历下区立交桥为例，模拟评估了 2007 年 7 月 18 日暴雨发生时研究区域的洪涝风险。

总的来说，基于情景分析的评估方法能够形成对灾害风险的可视化表达，直观、高精度地反映一定概率的致灾因子导致的灾害事件的影响范围和程度，风险信息较为丰富全面，实现了洪水风险的时空动态表现。但是，该方法也存在一些不足，如该方法由于需要构建城市洪涝模拟模型，对模型构建的基础数据要求较高，不适合大尺度区域洪涝风险评估；另外，该方法在进行风险评估过程中主要考虑致灾因子对风险的影响，未全面考虑承载体和孕灾环境对洪涝风险的影响。

（4）基于遥感和 GIS 技术的洪涝灾害风险评估

该评估方法主要是利用 GIS 强大的数据挖掘提取功能，对不同阶段洪涝灾害发生时的遥感数据进行淹没水深、范围、承载体等信息的提取，分析研究区域洪涝风险大小。Islam 和 Sado（2002）利用 GIS 技术结合最大似然法对 NOAA AVHRR 影像所包含的洪水淹没深度数据进行提取，以此评价孟加拉国的洪水风险。Sanyal 和 Lu（2005）运用 GIS 技术对 2000 年 9 月发生于印度西孟加拉邦的洪水遥感图像进行提取，并将其中的淹没信息用于居民定居点洪水灾害脆弱性的评估。唐川和师玉娥（2006）提出基于 GIS 技术以高分辨率遥感影像为数据源进行城市土地覆盖类型解译，以此作为城市山洪易损体类型和数量统计的依据，进而进行城市山洪灾害损失评估和风险评价。郑伟等（2007）通过提取灾害中和灾害前遥感影像数据，得到洪水的淹没范围。Huang 等（2008）运用 GIS 技术提取 1991 年、2003 年、2007 年江苏里下河地区洪涝灾害时 NOAA AVHRR 和 MODIS 遥感影像中的淹没范围信息，以淹没次数为标准对江苏里下河地区洪涝风险进行评估。沈定涛（2017）对洞庭湖共双茶垸蓄滞洪区机载 LiDAR 点云和高分辨率航空遥感数据进行洪水灾害孕灾承灾信息提取，进而对蓄滞洪区洪水风险进行评估。

基于遥感和 GIS 技术的洪涝灾害风险评估方法能够清晰地展示洪涝的空间分布，具有方便快捷、客观准确、灵活机动的特点，同时也可用于灾情的实时监控。但是，该方法受