

《山地城市超标降雨径流风险预控技术导则》

编制说明

（征求意见稿）

《山地城市超标降雨径流风险预控技术导则》编制组

二〇二六年七月

目录

一、制定标准的背景、必要性、目的和意义	1
（一）制定标准的背景	1
（二）制定标准的必要性	1
（三）制定标准的目的	2
（四）制定标准的意义	2
二、编制组简况	3
（一）起草单位及人员分工	3
（二）工作过程	3
三、标准编制依据和原则	4
（一）编制依据	4
（二）编制原则	5
四、适用范围	5
五、国内外现状	6
（一）国内现状	6
（二）国外现状	7
（三）国内外现状比较分析	7
六、贯彻 CQSES 标准的要求和措施	8
七、与现行法律法规、强制性标准和其他标准的关系	8
八、重大意见分歧的处理经过和依据	9
九、标准实施的环境效益和经济技术分析	9
（一）环境效益	9
（二）经济技术分析	9
十、其他应予以说明的事项	10
十一、主要技术内容与参数依据	11
（一）公式及参数来源说明	11
（二）关键技术方法说明	12

一、制定标准的背景、必要性、目的和意义

（一）制定标准的背景

近年来，在全球气候变化与快速城市化双重驱动下，极端暴雨事件频发，传统排水系统设计标准难以应对超标降雨引发的复合型内涝风险。据中国气象局统计，2020-2025年间，我国年均极端降雨事件较前十年增加了约23%，超标降雨（超过排水系统设计重现期的降雨）引发的城市内涝灾害造成的直接经济损失年均超过500亿元。

山地城市因地形复杂、地表高差大、汇流速度快，内涝过程呈现更强的空间异质性与聚集性，风险特征显著区别于平原城市。重庆市作为典型山地城市，中心城区竖向高差可达200m以上，坡面纵坡普遍大于5.0%、局部超过15.0%，地表径流流速常超过1.5m/s，降雨空间分布不均匀性系数显著偏高。这些特征导致山地城市在超标降雨工况下面临三重叠加风险：高位径流无序下泄冲击低位建成区、陡坡行泄通道高流速冲刷致灾、滨水区域外洪顶托与本地涝水叠加复合致灾。

为应对上述挑战，国家重点研发计划设立了“城市超标降雨风险预控预警与蓄排联调技术”项目（项目编号：2022YFC3800500），旨在构建“风险预控—预测预警—联动蓄排—装备研发—综合应用”全链条城市超量径流风险预控预警与蓄排联调体系。项目中设立了山地城市综合应用研究任务，负责山地城市应用示范与标准编制。在此背景下，编制《山地城市超标降雨径流风险预控技术导则》成为项目的核心考核指标之一。

（二）制定标准的必要性

1. 现有标准体系对超标降雨场景覆盖不足。现行GB 50014-2021《室外排水设计标准》和GB 51222-2017《城镇内涝防治技术规范》主要面向设计重现期范围内的排水防涝，对超标降雨（超过内涝防治设计重现期）情形下的径流风险预控缺乏系统性技术规定。目前国内相关协会正在编制城市超量涝水风险预控技术导则，但其内容侧重于通用城市场景，对山地城市特有的竖向地形驱动风险缺乏针对性条款。

2. 山地城市内涝风险特征需要专门技术导则。山地城市的降雨空间分布不均匀性、高流速径流冲刷致灾机制、阶梯式竖向地形导致的径流能量传递链、滨水区域外洪顶托复合风险等特征，均无法被平原城市导向的通用标准有效覆盖。项目研究成果已系统揭示了山地城市内涝影响因子的非线性阈值效应，亟需将这些技术发现转化为标准化规定。

3. 山地城市“山—水—城”空间格局的独特性需要分类分级预控。山地城市存在高地型、坡面型、滨水型三大基本格局类型及其 8 种典型组合模式，每种格局对应不同的核心风险特征和推荐预控模式。缺乏专门标准将导致规划设计中忽视格局差异而采用不适配的防涝方案。

（三）制定标准的目的

1. 规范山地城市超标降雨径流风险预控工作，建立从降雨时空特征校核、致灾因子定量归因、风险动态评估定级到空间布局优化、监测预警、运行维护的全链条技术体系；

2. 为山地城市新建、改建和扩建城区（含增量开发地区与存量老旧城区）超标降雨径流风险预控系统的规划、设计、建设、运行维护与应急管理提供系统性、自适应的整体解决方案与技术支撑；

3. 建立“空间规划为体、静态布局优化、应急自适应控制相结合”的山地城市防涝风险预控技术路径，填补山地城市超标降雨径流风险预控领域的技术标准空白。

（四）制定标准的意义

1. 保障人民生命财产安全与城市安全运行。通过规范山地城市超标降雨工况下的风险识别、评估、预控和应急响应全流程，有效减少内涝灾害造成的人员伤亡和经济损失。项目研究表明，在重庆某典型山地城市区域内在 100—300 年一遇超标降雨工况下，约 65% 节点仍可保持无积水，系统具有显著韧性，但高风险“高一高”聚类热点集中于中部北部老城区，需要针对性预控。

2. 推动山地城市韧性排水系统建设。本导则提出的“源头减排、竖向错峰、蓄排协同、智慧预控、分区设防、新老并重”原则和“截-蓄-行-泄”多维立体布局策略，为山地城市排水防涝系统的韧性提升提供了系统性技术路径。相关研究表明，竖向设计策略可有效提升径流削减率，蓄水池布局优化后高频覆盖节点比例显著增加。

3. 为国家重点研发计划项目成果转化提供标准载体。本导则将项目各研究任务的技术成果（降雨时空特征解析、致灾因子定量归因方法、灰绿基础设施多目标布局优化方法、蓄排联调系统平台等）转化为可推广应用的技术标准，实现科研成果向行业实践的转化。

4. 补充和完善我国城镇防涝标准体系。本导则作为 T/CQSES 团体标准，在 GB 50014-2021、GB 51222-2017 等国家标准框架下，填补山地城市超标降雨径流风险预控的技术标准空白，为后续国家标准或行业标准的修订提供经验和技術储备。

二、编制组简况

（一）起草单位及人员分工

本标准由重庆大学作为主要起草单位，依托国家重点研发计划项目“城市超标降雨风险预控预警与蓄排联调技术”（项目编号：2022YFC3800500）山地城市综合应用研究任务编制。

起草单位：重庆大学

项目负责人：何强

主要起草人：马海元、何强、肖子杰、程呈、陈磊、刘浩、邱周华、何进朝、卢浩、司帅等。

单位分工概要如下：

角色	单位	主要分工
项目负责人	重庆大学	导则总体架构设计、核心条款起草与审核
风险评估研究团队	重庆大学、重庆交通大学	超标降雨内涝影响因素及风险评估方法起草（第 5 章）
布局优化研究团队	重庆大学、北京建筑大学	灰绿基础设施布局优化方法起草（第 6 章）
其他参与人员	重庆西科水运工程咨询有限公司	监测预警与运行维护章节起草、文献调研与数据整理

（二）工作过程

1. 立项阶段（2022 年）

国家重点研发计划项目“城市超标降雨风险预控预警与蓄排联调技术”正式立项，山地城市综合应用研究作为项目重要组成部分，承担编制“山地城市超标降雨径流风险预控技术导则”的考核任务。课题组开始收集国内外相关标准、文献和技术资料。

2. 前期调研与技术研发阶段（2023 年）

课题组在重庆某典型山地城市区域开展实地调研与模型构建工作：构建 SWMM 地表—管网双排水水力耦合模型；完成多种重现期的降雨情景模拟；基于随机森林算法与 SHAP 可解释性分析揭示内涝影响因子的非线性阈值效应；完成 AHP-熵权法-机器

学习三源综合赋权风险评估方法开发。同期，项目灰绿基础设施布局优化研究团队完成 SWMM-NSGA-II 灰绿基础设施多目标布局优化方法研究。

3. 初稿编制阶段（2024 年）

基于项目各研究任务的技术成果，编制组完成导则初稿，确立 8 章结构：范围、规范性引用文件、术语和定义、基本规定、超标降雨径流风险评估、风险预控系统空间布局与优化、监测预警与综合应用平台接口、运行维护与管理。初稿提出了“源头减排、竖向错峰、蓄排协同、智慧预控、分区设防、新老并重”的总体原则和“截-蓄-行-泄”多维立体布局策略。

4. 内部研讨与修改完善阶段（2025 年）

编制组组织多次内部研讨，对初稿进行逐章逐条审核与修改。重点完善了：降雨空间不均匀性系数 η 的定量表征与应用规则；地表积水危险性指数 DI 的分级标准；“山一水一城”3 种基本类型 8 种典型组合模式及其推荐预控模式对照表；灰绿基础设施地形适配性约束条款；存量老旧城区自适应弹性控制策略。

5. 初审阶段（2026 年 7 月）

导则初审版提交重庆市环境科学学会团体标准审查委员会进行初审，本编制说明作为配套材料一并提交。

三、标准编制依据和原则

（一）编制依据

1. 法律法规依据

- （1）《中华人民共和国标准化法》（2017 年修订）；
- （2）《团体标准管理规定》（国家标准化管理委员会，2019 年）；
- （3）《重庆市环境科学学会团体标准管理办法》。

2. 标准规范依据

- （1）GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》；
- （2）GB 50014-2021《室外排水设计标准》；
- （3）GB 51222-2017《城镇内涝防治技术规范》；
- （4）GB 50015-2019《建筑给水排水设计标准》；
- （5）GB/T 50280-1998《城市规划基本术语标准》。

3. 科研成果依据

国家重点研发计划项目“城市超标降雨风险预控预警与蓄排联调技术”（2022YFC3800500）研究成果。

（二）编制原则

1. 科学性原则

导则各项技术指标和方法的确定均基于项目实证研究成果，采用数学模型模拟、机器学习定量归因、多目标优化算法等科学手段，确保技术规定的客观性和可靠性。例如，降雨空间不均匀性系数的分级阈值、内涝影响因子非线性阈值效应、灰绿基础设施最优布局参数等，均源自实际研究数据和模型验证结果。

2. 实用性原则

导则注重技术规定的可操作性，提供定量化指标、分级评定标准、计算公式和典型工程对照表等实用工具，便于规划设计人员和管理者直接应用。如“山—水—城”典型空间格局与防涝空间预控模式工程对照表（表 5.1），直接将空间格局类型映射到推荐预控模式和典型工程措施。

3. 协调性原则

导则与 GB 50014-2021、GB 51222-2017 等现行国家标准保持协调一致，在其框架基础上针对山地城市超标降雨场景补充细化条款，避免技术规定冲突或重复。同时关注国内相关技术导则的编制进展，本导则侧重山地城市的针对性技术补充。

4. 前瞻性原则

导则纳入了机器学习定量归因、SWMM-NSGA-II 灰绿基础设施多目标优化、AHP-熵权法-机器学习综合赋权风险评估等前沿技术方法，为山地城市超标降雨径流风险预控提供面向未来的技术储备，兼顾当前应用可行性和技术发展空间。

四、适用范围

本导则适用于山地城市新建、改建和扩建城区（含增量开发地区与存量老旧城区）超标降雨径流风险预控系统的规划、设计、建设、运行维护与应急管理。

丘陵地区或地形起伏较大、竖向高差显著、地表径流具有快速汇流特征的城镇城区，可参照本导则执行。

适用范围界定考虑了以下因素：

1. 地形特征适配性。本导则的技术规定专门针对山地城市竖向地形驱动的内涝风险特征（高流速径流、阶梯式能量传递、降雨空间不均匀性等），丘陵地区虽竖向高差相对较小，但地表径流快速汇流特征与山地城市类似，参照适用具有技术合理性。

2. 超标降雨工况针对性。本导则聚焦超过城市排水系统设计重现期和内涝防治设计重现期的降雨情形，对设计重现期范围内的排水防涝问题仍适用 GB 50014-2021 和 GB 51222-2017 等现行标准。

3. 新老城区兼顾性。导则既覆盖增量开发地区的强制性规划布局要求，也覆盖存量老旧城区的自适应弹性控制策略，体现“新老并重”原则。

五、国内外现状

（一）国内现状

1. 国家标准层面

我国城镇排水防涝领域的核心国家标准包括：GB 50014-2021《室外排水设计标准》，规定了雨水管网设计重现期（一般地区 1—3 年、重要地区 3—5 年、特别重要地区 5—10 年）和内涝防治设计重现期（特大城市 50—100 年、大城市 30—50 年、中等城市 20—30 年、小城市 10—20 年）；GB 51222-2017《城镇内涝防治技术规范》，规定了内涝防治技术措施、内涝风险评估方法和积水深度控制标准（道路横向最低点水深不超过 30cm，机动车道积水深度不超过 15cm，水深与流速乘积不超过 $0.5\text{m}^2/\text{s}$ ）。上述标准主要面向设计重现期范围内的排水防涝，对超标降雨情形下的径流风险预控缺乏系统性技术规定。

2. 协会标准层面

国内相关协会正在编制城市超量涝水风险预控技术导则，旨在建立城市超量涝水风险预控通用技术体系。但该导则侧重通用城市场景，对山地城市特有的竖向地形驱动风险的系统性技术规定尚有不足。

3. 地方标准层面

部分省市已出台地方性排水防涝技术标准，但尚无专门针对山地城市超标降雨径流风险预控的技术标准。

4. 科研成果层面

在国家重点研发计划项目支持下，项目研究团队已产出丰富的山地城市内涝研究成果：完成 150 个山地城市风险分布图、27 种蓄排联调模式、SWMM 双排水模型构建、

随机森林+SHAP 致灾因子定量归因方法、灰绿基础设施 NSGA-II 多目标布局优化方法、蓄排联调综合应用系统平台等。这些成果为本导则的编制提供了坚实的技术基础。

（二）国外现状

1. 欧盟

欧盟《洪水风险评估与管理指令》（Floods Directive 2007/60/EC）要求成员国开展洪水风险初步评估、编制洪水风险地图和洪水风险管理计划，建立了“预防—保护—准备—应急响应—恢复”全周期风险管理框架。但该指令侧重河流洪水，对城市内涝特别是山地城市超标降雨径流风险的技术规定较少。

2. 美国

美国联邦应急管理署（FEMA）通过国家洪水保险计划（NFIP）和洪水风险地图（FIRM）体系管理洪水风险，部分城市制定了超标降雨应急响应方案。但美国排水防涝标准体系主要面向平原城市，缺乏山地城市针对性技术规定。

3. 日本

日本在城市内涝防治方面积累了丰富的经验，建立了综合治水对策（包括流域治水、河道整治、排水设施建设、地下调蓄设施等）和“水害预防—危险回避—紧急应对”三级应急体系。日本部分山地城市的阶梯式排水设计和坡面消能技术具有借鉴价值。

4. 其他国家

澳大利亚《雨水手册》（ARR 2019）提供了降雨设计标准和洪水风险评估方法；英国《洪水与水管理法案》（2010）建立了洪水风险管理框架。但上述国家的技术体系同样主要面向通用场景，缺乏山地城市超标降雨径流风险预控的专门规定。

（三）国内外现状比较分析

综合国内外现状，目前存在以下技术标准空白：

1. 现有标准体系对“超标降雨”场景的系统性技术覆盖不足，大多仅涉及设计重现期范围内的排水防涝；
2. 现有标准对山地城市竖向地形驱动的内涝风险特征缺乏针对性规定，包括降雨空间不均匀性、高流速径流冲刷、阶梯式能量传递链、滨水外洪顶托复合风险等；
3. 现有标准缺乏基于机器学习等先进方法的致灾因子定量归因和风险评估定级技术规定；

4. 现有标准缺乏山地城市“山—水—城”空间格局分类与差异化预控模式的技术规定。

本导则的编制正是针对上述技术标准空白，在 GB 50014-2021、GB 51222-2017 等国家标准框架基础上，补充山地城市超标降雨径流风险预控的系统性、针对性技术规定。

六、贯彻 CQSES 标准的要求和措施

为确保本标准发布后能够有效贯彻实施，拟采取以下要求和措施：

1. 宣贯培训。标准发布后，由重庆市环境科学学会组织面向山地城市排水防涝规划设计单位、城市建设管理部门、市政运维单位的宣贯培训会，重点解读导则的核心技术条款及其应用方法。

2. 示范应用。依托项目在重庆市高新区的示范应用实践，验证导则各项技术规定的可操作性和实际效果，为标准的推广提供实证案例支撑。

3. 配套工具开发。配合导则实施，开发蓄排联调信息化平台软件工具，提供风险评估计算模块、空间格局识别辅助工具、灰绿基础设施多目标优化辅助工具等，降低导则应用的技术门槛。

4. 持续修订完善。建立标准实施效果跟踪评估机制，根据山地城市排水防涝技术发展和实践经验积累，定期修订完善导则内容。

七、与现行法律法规、强制性标准和其他标准的关系

本导则与现行法律法规和标准的关系如下：

1. 与 GB 50014-2021《室外排水设计标准》的关系。本导则是在 GB 50014-2021 框架基础上的补充和细化。GB 50014-2021 规定了雨水管网设计重现期和内涝防治设计重现期范围内的排水防涝技术要求，本导则针对超过上述重现期的超标降雨情形，补充径流风险预控的系统性技术规定。两者在适用范围上衔接互补，不产生技术规定冲突。

2. 与 GB 51222-2017《城镇内涝防治技术规范》的关系。GB 51222-2017 规定了内涝防治技术措施、内涝风险评估方法和积水深度控制标准，本导则在此基础上补充了山地城市特有的技术条款：降雨空间不均匀性校核、致灾因子定量归因识别、基于危险性指数 DI 的积水区域危险度分级、“山—水—城”格局分类预控模式等。两者协调一致，本导则细化补充不替代。

3. 与 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则》的关系。本导则的编制格式、结构和起草规则遵循 GB/T 1.1-2020 的要求。

4. 与《中华人民共和国标准化法》和《团体标准管理规定》的关系。本导则作为 T/CQSES 团体标准，其制定程序、编号规则、发布实施等均符合《中华人民共和国标准化法》和《团体标准管理规定》的要求。

八、重大意见分歧的处理经过和依据

本导则目前处于初审阶段，编制过程中尚未出现重大意见分歧。在内部研讨阶段，曾就以下技术问题进行讨论并形成一致意见：

关于存量老旧小区自适应控制策略的技术定位。部分成员倾向于将存量老旧小区改造要求与增量开发地区同等严格，但考虑到存量老旧小区竖向地形已固化、管网改造难度大的现实约束，最终确定采用“微地形改造、地表导流、原位防护、微型阻滞”等低影响、自适应的弹性控制策略，体现“新老并重”而非“新老同等”的技术定位。

九、标准实施的环境效益和经济技术分析

（一）环境效益

1. 减少内涝灾害损失。通过规范山地城市超标降雨径流风险预控全流程，可有效减少内涝灾害造成的人员伤亡、财产损失和基础设施损毁。

2. 保护山地城市水生态环境。导则提出的“截-蓄-行-泄”多维立体布局策略和灰绿基础设施协同优化方法，有助于减少超标降雨工况下的地表径流冲刷和泥沙输移，保护山地城市河湖水生态环境。

3. 提升山地城市生态韧性。导则强调尊重自然竖向、顺应山体脊线和水系脉络的分区防御原则，有助于保护和利用山地城市自然生态系统的防洪减灾功能，提升城市整体生态韧性。

（二）经济技术分析

1. 投入成本方面。导则实施涉及的主要投入包括：风险评估模型构建与参数率定、致灾因子定量归因分析、灰绿基础设施建设、感知监测装备布设等。其中，灰绿基础设施建设是主要成本项，其投资规模与区域面积、削减目标及地形条件密切相关，总体投入水平与现行排水防涝设施建设投资具有可比性。导则提倡的“灰绿协同”策略通过多目标优化方法寻求成本与效益的平衡，避免过度投资。

2. 效益方面。导则实施的主要效益包括：（1）内涝损失削减效益，通过针对性防控策略可有效降低超标降雨内涝灾害造成的经济损失；（2）基础设施保护效益，重要基础设施防淹设防提升，避免重大安全事故；（3）规划优化效益，基于空间格局分类的差异化预控策略避免“一刀切”式防涝投资浪费；（4）运维效率提升效益，感知监测与预警联动机制减少应急响应时间，提升防灾响应效率。总体而言，导则的实施可在适度投入基础上显著提升山地城市超标降雨工况下的安全韧性和防涝效益。

3. 技术可行性。导则各项技术规定均基于项目实证研究成果，技术方法已通过实际验证：SWMM 双排水模型已完成率定验证；随机森林致灾因子归因模型精度满足应用要求；NSGA-II 灰绿基础设施多目标优化已完成多种重现期梯度验证；蓄排联调综合应用平台已在综合应用区域部署运行。

十、其他应予以说明的事项

1. 标准性质。本导则为 T/CQSES 团体标准，属于推荐性标准，供山地城市排水防涝规划设计、建设管理部门和运维单位自愿采用。

2. 后续修订计划。根据团体标准管理规定和项目实践经验积累，拟在导则发布实施 2~3 年后组织第一次修订，重点修订方向包括：

（1）补充更多山地城市类型的应用验证数据（如不同气候区、不同规模山地城市）；

（2）纳入项目重要基础设施内涝风险阈值和临近预警技术的最新研发成果；

（3）完善灰绿基础设施布局优化参数库和典型设计图集；

（4）提升蓄排联调信息化平台与导则技术规定的衔接度。

3. 知识产权说明。本导则涉及的技术方法（随机森林+SHAP 致灾因子定量归因方法、NSGA-II 灰绿基础设施多目标布局优化方法、AHP-熵权法-ML 综合赋权风险评估方法等）源自国家重点研发计划项目资助的研究成果，相关知识产权归项目承担单位所有。导则引用上述技术方法仅限于标准规定的技术路径指引，不涉及具体算法和软件代码的知识产权转移。

十一、主要技术内容与参数依据

（一）公式及参数来源说明

1. 降雨空间不均匀性系数 S_h （正文公式 1）。采用变异系数法（Coefficient of Variation, CV），计算公式为 $S_h = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i - \bar{P}}{\bar{P}} \right)^2}$ ，式中 N 为排水分区内降雨监测点数量， P_i 为第 i 个监测点降雨量， $\bar{P}$ 为各监测点降雨量的空间平均值。该系数为无量纲比值，不乘以 100%，本文件将其引入山地城市降雨空间不均匀性定量表征，相关计算与率定基于项目 SWMM 双排水耦合模型及雷达测雨/站点监测数据分析。

2. 地表积水危险性指数 H_{risk} （正文公式 2）。 $H_{risk} = \alpha \cdot \frac{d}{d_{max}} + \beta \cdot \frac{v}{v_{max}}$ ，参数取值依据：

—— $d_{max} = 0.4 \text{ m}$ ：取值综合考虑了以下依据：GB 51222—2017《城镇内涝防治技术规范》规定机动车道积水深度不超过 15 cm、道路横向最低点积水深度不超过 30 cm；0.4 m 作为超标降雨工况下容许的极限积水深度，已超出常规排水设计标准上限，体现了山地城市在超标降雨条件下重要基础设施的高设防要求。

—— $v_{max} = 2.0 \text{ m/s}$ ：取值参考了 GB 50014—2021《室外排水设计标准》关于严重内涝条件下流速控制的要求，以及排水防涝工程实践中对行人涉水安全（成人行走困难临界流速约 2 m/s）和车辆通行稳定性的通行认知。

—— α 、 β 权重：本文件不作固定取值规定，由排水分区地形地貌、汇流特性及历史内涝数据经专家判断或数据校核确定（见正文 5.3.2）；原因在于不同分区致灾机制差异显著，固定权重不具普适性。

3. 调蓄容积 $V_{storage}$ （正文公式 3）。 $V_{storage} = 10 \cdot F \cdot (\Psi_{excess} \cdot P_{excess} - q_{drain} \cdot t) \cdot \eta$ ，本质为水量平衡法，源自 GB 50014—2021 调蓄容积公式 $W = 10F(\Psi P - 3.6qt)$ 的山地适配版； η 为安全系数，按工程重要性等级确定，不作统一数值规定。式中 3.6 为 $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2) \rightarrow \text{mm}/\text{h}$ 单位换算系数。

4. “山-水-城”空间格局分类（正文表 1）。3 种基本类型 $\times$ 8 种典型组合模式的划分依据为项目在重庆典型山地城市区域的实证研究成果，经 SWMM 双排水耦合模型模拟与 NSGA-II 多目标优化验证。

（二）关键技术方法说明

1. 致灾因子定量归因方法。采用随机森林（Random Forest）集成学习算法，以排水分区内涝积水深度为响应变量，以降雨量、地形坡度、不透水率、管网排水能力、竖向高差等为候选致灾因子，构建非线性回归模型。利用 SHAP（SHapley Additive exPlanations）可解释性分析方法，量化各致灾因子对内涝积水深度的边际贡献（SHAP 值），揭示山地城市降雨空间不均匀性、地形竖向梯度、不透水率等关键因子的非线性阈值效应，识别不同重现期下各排水分区的主导致灾因子类型和贡献度排序。该方法经重庆典型山地城市区域实测数据验证，为风险评估指标选取和权重确定提供了定量依据。

2. 风险综合赋权方法。综合采用层次分析法（AHP）、熵权法和机器学习特征重要度三源赋权技术：AHP 法基于专家判断构造判断矩阵，确定危险性、脆弱性、暴露性等各层级指标的主观权重；熵权法基于指标数据的信息熵和离散度确定客观权重；机器学习模型（随机森林）输出特征重要度作为数据驱动权重。三源权重通过最小偏差法进行融合，兼顾专家经验、数据统计特性和模型学习能力，避免单一赋权方法的偏倚，提高风险综合评估结果的稳健性和可信度。该方法在重庆典型山地城市区域完成了多情景验证，能够有效区分不同排水分区的风险等级排序。

3. 灰绿基础设施布局优化方法。建立 SWMM（Storm Water Management Model）一维管网-二维地表耦合水力模型，模拟不同降雨重现期和超标降雨工况下的汇流与内涝过程，输出各节点的积水深度、流速、积水历时等水力参数。以最大化超标降雨径流削减率、最小化内涝风险等级、最小化全寿命周期成本为三个优化目标，采用非支配排序遗传算法（NSGA-II）在多维决策空间（绿色屋顶面积、透水铺装率、生物滞留设施容积、调蓄池容积等）内搜索帕累托最优解集，确定灰绿基础设施的最优空间布局和规模配置。该方法已通过 2 年、5 年、10 年、20 年、50 年、100 年六种重现期的梯度模拟验证。