

北京市地方标准



编 号：DB11/T 2074—2022

城镇排水防涝系统数学模型 构建与应用技术规程

Technical specification for construction and application of
mathematical model of urban flooding prevention
and control system

2022-12-29 发布

2023-07-01 实施

北京市规划和自然资源委员会
北京市市场监督管理局

联合发布

北京市地方标准

城镇排水防涝系统数学模型 构建与应用技术规程

Technical specification for construction and application of
mathematical model of urban flooding prevention
and control system

DB11/T 2074—2022

主编单位：北京市城市规划设计研究院

批准部门：北京市规划和自然资源委员会

北京市市场监督管理局

实施日期：2023 年 07 月 01 日

2022 北京

前 言

为贯彻落实国务院、住房和城乡建设部以及市委、市政府近年来关于城镇排水防涝工作的指示精神、推动《北京城市总体规划（2016年-2035年）》实施与体检评估，根据《北京市“十四五”时期规划和自然资源标准化工作规划（2021年-2025年）》和北京市市场监督管理局《2021年北京市地方标准制修订项目计划（第一批）》（京市监发〔2021〕19号）的要求，编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，充分吸取科研成果，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程的主要技术内容是：1.总则；2.术语；3.基本规定；4.模型构建与测试；5.参数率定与模型验证；6.模型应用；7.模型成果编制。

本规程由北京市规划和自然资源委员会、北京市市场监督管理局共同负责管理，由北京市规划和自然资源委员会归口并负责组织实施，北京市规划和自然资源标准化中心负责日常管理，北京市城市规划设计研究院负责具体技术内容的解释。（地址：北京市西城区南礼士路60号；邮政编码：100045；电子邮箱：szs@bjucd.com）。

本规程执行过程中如有意见和建议，请寄送至北京市规划和自然资源标准化中心，以供今后修订时参考。（地址：北京市通州区承安路1号院；邮政编码：101117；邮箱：bjbb@ghzrzyw.beijing.gov.cn）

本规程主编单位：北京市城市规划设计研究院

本规程参编单位：北京师范大学

北京市水科学技术研究院

北京市市政工程设计研究总院有限公司

北京市水文总站

北京工业大学

本规程主要起草人员：张晓昕 徐宗学 王 强 刘子龙 庞 博 于 磊
吕志成 王 昊 杜龙刚 曾玉蛟 叶婉露 初 祁
李永坤 杨京生 王亚娟 陈 浩 叶陈雷 李 鹏
石树兰 郑自琪 张书函 邸苏闯 武彦杰 席广朋
王 伟 王槿妍 赵洪岩 黄俊雄 李洪博 王巍皓

本规程主要审查人员：周玉文 任希岩 李 娜 赵冬泉 刘兴坡 李树平

王文亮 白 宇 张 楠

目 次

1 总 则.....	1
2 术 语.....	2
3 基本规定.....	4
4 模型构建与测试.....	5
4.1 一般规定.....	5
4.2 资料收集.....	5
4.3 模型构建.....	6
4.4 模型测试.....	9
5 参数率定与模型验证.....	10
5.1 一般规定.....	10
5.2 率定与验证标准.....	10
6 模型应用.....	12
7 模型成果编制.....	14
7.1 一般规定.....	14
7.2 专题报告及模型附件.....	14
附录 A 源头减排设施模型参数.....	15
附录 B 北京市设计降雨计算方法及附表.....	18
本规程用词说明.....	38
引用标准名录.....	39
附：条文说明.....	40

CONTENTS

1	General provisions	1
2	Terms.....	2
3	Basic regulations	4
4	Model development and test	5
4.1	General regulation.....	5
4.2	Data collection	5
4.3	Model development	6
4.4	Model test.....	9
5	Parameter calibration and model validation	10
5.1	General regulation.....	10
5.2	Calibration and validation criteria	10
6	Model application	12
7	Formulation of model results	14
7.1	General regulation.....	14
7.2	Special report and model accessories	14
	Appendix A Parameters of source control facilities model	15
	Appendix B Design rainfall and schedules in Beijing.....	18
	Explanation of wording in this specification	38
	List of quoted standards	39
	Addition: Explanation of provisions	40

1 总 则

1.0.1 为提升北京市城镇排水防涝系统规划、设计和管理水平及成果质量，指导和规范城镇排水防涝系统数学模型构建和应用，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于北京市行政区域内新建、改建、扩建城镇排水防涝系统的规划、设计和评估。

1.0.3 城镇排水防涝系统数学模型除应符合本规程外，尚应符合国家及北京市现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 城镇排水防涝系统数学模型 mathematical model of urban flooding prevention and control system

用于城镇排水防涝系统规划、设计及评估的数学模型，包括产流模型、汇流模型、管渠（河道）水动力学模型、地表漫溢模型及地表漫流模型等。

2.0.2 产流模型 flow generation model

模拟降雨通过地表下垫面下渗、填洼、截留、蒸发等降雨损失后形成地表径流过程的数学模型。

2.0.3 汇流模型 flow routing model

模拟净雨形成汇水区域出口断面径流过程的数学模型。

2.0.4 管渠（河道）水动力学模型 storm sewer/river hydrodynamic model

模拟水流在管渠或河道中随时间运动及演进过程的数学模型。

2.0.5 地表漫溢模型 overflow model

模拟雨水从雨水口、管渠检查井或河道漫溢出，在地表坡面运动过程的数学模型。

2.0.6 地表漫流模型 overland flow model

模拟净雨在地表坡面运动过程的数学模型。

2.0.7 框架模型 framework model

主要基于地形特征进行地表漫流模拟的数学模型。

2.0.8 概化模型 simplified model

基于城镇排水防涝系统主要要素特征进行概化模拟的数学模型。

2.0.9 详细模型 detailed model

基于城镇排水防涝系统全要素特征进行详细模拟的数学模型。

2.0.10 雨量径流系数 volumetric runoff coefficient

设定历时内降雨产生的径流深与降雨量之比。

2.0.11 流量径流系数 discharge runoff coefficient

形成高峰流量的历时内产生的径流深与降雨量之比。

2.0.12 模型测试 model test

对排水防涝系统构成要素空间分布和连接性进行核实, 及对模型计算的稳定性进行评判的过程。

2.0.13 参数率定 parameter calibration

合理调整模型参数使模型模拟结果与监测数据相吻合的过程。

2.0.14 模型验证 model validation

根据独立于参数率定选用的监测数据检查模型准确性的过程。

3 基本规定

3.0.1 在城镇排水防涝系统规划、设计工作中应构建数学模型，分析内涝风险、评估方案预期效果，优化规划、设计方案。

3.0.2 根据规划、设计不同阶段和模型应用目的，城镇排水防涝系统数学模型可分为三种类型：框架模型、概化模型和详细模型。模型的选用宜符合下列规定：

- 1 辅助编制城市总体规划方案、识别低洼易涝区域宜选用框架模型；
- 2 辅助编制详细规划及排水防涝专项规划方案、分析规划区域内涝风险、评估主要排水防涝设施能力宜选用概化模型；
- 3 辅助编制排水防涝工程设计方案宜选用详细模型；
- 4 在同一项目中可同时采用其中 1 种及以上模型。

3.0.3 模型的构建和应用应明确设计工况、模型方法、参数选取和边界条件设置。

4 模型构建与测试

4.1 一般规定

4.1.1 城镇排水防涝系统数学模型应符合下列规定：

- 1 模型工具宜具备输入输出、数值模拟和计算结果可视化的功能；
- 2 数学模型宜包括产流模型、汇流模型、管渠（河道）水动力学模型、地表漫溢模型和地表漫流模型，应根据应用目的选择适宜的模型；
- 3 考虑源头海绵设施的影响时，数学模型宜包括源头减排设施模型，模型参数选取可参照本规程附录 A 执行；
- 4 模型应具有良好的稳定性，在合理初始条件下模拟结果精度应满足城镇排水防涝系统规划、设计需求。

4.1.2 当模型资料范围和精度不能满足城镇排水防涝系统数学模型构建要求时，应开展补充测量和测验工作。

4.2 资料收集

4.2.1 模型基础数据资料宜包括降雨资料、地面高程资料、下垫面资料、排水管渠（设施）资料、城镇河道（蓄滞区）资料、流量和水位监测资料、设施运行资料和其他边界条件。

4.2.2 模型应收集的降雨资料通常包括长序列历史降雨资料、场次监测降雨资料和设计降雨，并应符合下列规定：

- 1 长序列历史降雨资料主要用于分析降雨特征及演变规律，有效时间段内数据间隔不宜大于 1h；
- 2 场次监测降雨资料主要用于参数率定和模型验证，应包括完整的一次降雨发生过程，数据间隔宜采用 5min~10min；
- 3 设计降雨常用于分析一定重现期标准下的城镇排水防涝系统特征，辅助编制城镇排水防涝系统规划、设计方案，数据间隔不应大于 5min，并应符合本规程附录 B 的规定。

4.2.3 地面高程数据的精度应根据模型类型确定。详细模型的地面高程数据测图比例尺不宜小于 1:500，概化模型不宜小于 1:5000，框架模型不宜小于 1:10000。

4.2.4 排水管渠（设施）资料宜包括：

- 1 排水流域范围及相应排水体制；
- 2 排水管渠、检查井、雨水管渠排放口、合流制溢流排放口、污水截流井、排水（涝）泵站、调蓄水池等设施的空间布局、拓扑关系、结构物理属性和运行管理数据；
- 3 排水管渠的混接、淤积、入流、入渗等情况；
- 4 项目范围内排水防涝规划、系统化实施方案、工程设计文件和竣工资料等。

4.2.5 城镇河道（蓄涝区）资料宜包括：流域范围、河道断面高程数据、河道断面分区粗糙系数；蓄涝区底部地形、水深-容积关系曲线；水闸、桥梁、涵洞、堰坝、泵站等设施结构尺寸和运行控制规则；水文站监测断面水位、流速和流量资料等。

4.2.6 流量和水位监测资料应符合现行国家标准《城市排水防涝设施数据采集与维护技术规范》GB/T 51187 的有关规定，并应符合下列规定：

- 1 流量和水位监测数据时间段应覆盖一场完整的降雨过程，包括降雨停止后系统的退水过程，并宜记录雨前无雨天数；
- 2 降雨时段内，流量和水位监测数据采样时间间隔不宜大于 5min；
- 3 流量和水位监测数据成果使用前，应进行数据质量评估、问题数据甄别及修正，确保数据的准确性和时效性。

4.3 模型构建

4.3.1 模型数据整理与导入过程应包括数据导入模型软件、评估缺失数据和可疑数据、拓扑结构检查、数据推断、数据修改、数据标签设置等。

4.3.2 模型中的设计降雨应根据城市气象规律、汇水区域特征以及规划、设计需求等综合确定，并应符合下列规定：

1 应用于排水管渠规划、设计和评估时宜采用短历时设计降雨，短历时设计降雨历时宜取 1h~3h，最小时间步长宜为 5min；

2 应用于城镇内涝防治系统规划、设计和评估时应采用长历时设计降雨，长历时设计降雨历时宜取 24h，并应覆盖系统完整汇流时间和退水时间，最小时间步长宜为 5min；

3 应用于城镇排水管渠系统和内涝防治系统衔接能力评估时，可采用长、短历时设计降雨相互校核。

4.3.3 产流模型选择及参数设置应符合下列规定：

1 应根据模型使用目的以及可获取的基础资料实际情况，合理选择产流模型类型，并对模型的适用条件和参数做详细分析和评估。

2 可采用固定径流系数法、降雨径流相关图法或初损后损法进行净雨过程计算，各种方法涉及主要参数详见表 4.3.3。

表 4.3.3 产流模型方法及其参数选择表

产流模型方法	方法概述	主要参数
固定径流系数法	降雨落到地面后按照径流系数进行净雨量折减	流量径流系数； 雨量径流系数； 径流系数修正系数
降雨径流相关图法	通过选取北京市中心城区次降雨 70mm 以上降雨，共 13 场，126 站次降雨资料；共 13 个水文流量站，151 站次流量资料，建立以不透水面积百分比为参数的降雨径流相关图	不透水面积比例（%）； 次降雨量（mm）； 次径流深（mm）
初损后损法	降雨产流以前的总损失水量称为初损，通常包括植物截留、填洼及产流前下渗的水量；后损即流域产流后下渗的水量。通常将流域分为透水区域和不透水区域，认为在透水区域前、后损过程都会发生，而在不透水区域则只会发生前损	植物截留量（mm）； 初始填洼量（mm）； 下渗速率（mm/h）：可采用下渗曲线描述（如霍顿下渗曲线），涉及参数包括初始下渗率、稳定下渗率以及衰减常数

3 宜运用实测资料对产流模型参数进行率定，并满足参数率定与模型验证相关标准和要求。

4.3.4 汇流模型选择及参数设置应符合下列规定：

1 应根据汇水区域的概化情况以及可获取的基础资料实际情况，合理选择汇流模型类型，并对模型的适用条件和参数做详细分析和评估。

2 可采用等流时线法、非线性水库法、时段单位线法等进行地表汇流模拟，各种方法涉及主要参数详见表 4.3.4。

表 4.3.4 汇流模型方法及其参数选择表

汇流模型方法	方法概述	主要参数
等流时线法	将汇水区域划分成为有限个等流时块，每一个等流时块在汇流时段内的降雨径流累加到达出口断面	汇流速度（汇流时间）； 汇流曲线类型
非线性水库法	把地表汇流看作是非线性水库的调蓄过程	特征宽度； 平均坡度； 地表粗糙系数
时段单位线法	单位时段均匀分布的单位净雨量在出口断面形成的流量过程线	单位时段、单位净雨量

3 宜运用实测资料对汇流模型参数进行率定，并满足参数率定与模型验证相关标准和要求。

4.3.5 管渠(河道)水动力学模型构建及参数设置应符合下列规定：

1 管渠内的水流运动模拟应采用基于一维圣维南方程组的数值模拟计算，河道宜采用基于一维或二维圣维南方程组的数值模拟计算。

2 管渠（河道）粗糙系数应依据实测数据确定，缺乏资料时可按表 4.3.5-1、表 4.3.5-2 选取。

表 4.3.5-1 不同类型材质的管渠粗糙系数（曼宁粗糙系数 n 值）取值表

管渠类别	曼宁粗糙系数 n	管渠类别	曼宁粗糙系数 n
混凝土管、钢筋混凝土管、水泥砂浆抹面渠道	0.013~0.014	土明渠（包括带草皮）	0.025~0.030
水泥砂浆内衬球墨铸铁管	0.011~0.012	干砌块石渠道	0.020~0.025
石棉水泥管、钢管	0.012	浆砌块石渠道	0.017
UPVC 管、PE 管、玻璃钢管	0.009~0.010	浆砌砖渠道	0.015

表 4.3.5-2 不同表面特征的河道粗糙系数（曼宁粗糙系数 n 值）取值表

河道表面特征	曼宁粗糙系数 n
抹光的水泥抹面	0.012
光滑的护面	0.015
粗糙的护面	0.017
紧密黄土或细砾土渠，有薄淤泥层	0.018
紧密粘土、黄土、壤土的渠道，养护条件在中等以上的渠道	0.02
紧密粘土、黄土、壤土的渠道，有薄淤泥层，开凿的很好的岩石渠道	0.0225

河道表面特征	曼宁粗糙系数 n
良好的干砌石渠道，养护条件中等的土渠	0.025
养护条件低于一般标准的土渠	0.0275
条件较差的土渠	0.03
自然植被覆盖的渠道	0.035
多杂草、有深潭或林木滩地过洪的渠道	0.075

3 采用圣维南方程组模拟管渠（河道）水流运动过程，宜采用动力波方法进行模拟。

4 应根据实测数据和模型目的，合理设置管渠（河道）水动力学模型的出口水位边界条件。

4.3.6 地表漫溢模型和地表漫流模型构建应符合下列规定：

1 地表漫溢模型和地表漫流模型宜进行地表网格划分，并采用二维水动力学方法进行模拟；

2 地表漫溢模型宜与管渠（河道）水动力学模型相互耦合模拟；

3 地表漫流模型宜考虑雨水口空间布局和实际收水能力，对地表径流量进行扣损计算。

4.4 模型测试

4.4.1 在模型应用前，应对模型中排水防涝系统构成要素空间分布和连接情况进行核实，可采用异常值检查和拓扑关系抽查方法，并通过现场勘察、人工经验判断方式对发现的问题进行处理。

4.4.2 在模型应用前，应对模型运行的稳定性进行测试和修正，修正后模型应符合下列规定：

1 模型计算应能够正常收敛，计算过程应基本稳定；

2 节点水量连续性相对误差不宜大于 10%；

3 系统总水量连续性相对误差不宜大于 5%；

4 当模型中存在泵站、水闸、堰等附属构筑物时，其运行调度方式应符合实际情况或设计工况。

5 参数率定与模型验证

5.1 一般规定

5.1.1 参数率定与模型验证数据宜采用现场实测数据、调研数据、遥感数据等。

5.1.2 参数率定与模型验证前，应根据模型方法确定率定参数，并开展参数灵敏度分析。

5.1.3 参数率定与模型验证步骤应包括：

1 评估实测数据可用性,确保用于参数率定和模型验证的数据满足质量和数量要求；

2 采用一套或多套独立数据进行参数率定，对比模型结果与实测数据，合理调整模型参数；

3 采用另外一套或多套独立数据进行模型验证。

5.1.4 基于规划、设计数据构建城镇排水防涝系统数学模型时，模型参数应根据相关设计工况和当地气候、地理、水文等条件合理确定，不需进行参数率定与模型验证。

5.2 率定与验证标准

5.2.1 基于实测数据进行参数率定与模型验证时，应满足至少两场独立降雨事件的模拟结果与实测数据拟合程度符合相应标准。

5.2.2 框架模型开展参数率定与模型验证时，应确保模型模拟的积水内涝区域与实际基本相符。

5.2.3 概化模型开展参数率定与模型验证时，应满足下列要求：

1 模拟与实测的最大积水深度偏差不应大于 20%，积水持续时间偏差不应大于 20%，最大积水持续时间偏差不应大于 1h；

2 管渠（河道）关键节点和断面水文过程模拟与实测的总水量偏差不应大于 20%，峰现时间偏差不应大于 1h，峰值偏差不应大于 25%。

5.2.4 详细模型开展参数率定与模型验证时，除了满足本规程第 5.2.3 条中的相关规定外，还宜满足下列要求：

1 管渠关键位置未满管时，模拟与实测的水位差在 $\pm 0.1\text{m}$ 以内；

2 管渠关键位置满管后，模拟与实测的水位差在 $-0.1\text{m}\sim+0.5\text{m}$ 范围内。

6 模型应用

6.0.1 框架模型模拟对象应包括地形，模拟计算应考虑排水防涝系统的能力；框架模型宜包括产流模型和地表漫流模型。主要应用场景可包括：

- 1 辅助划定汇水区域范围，确定模型模拟边界；
- 2 快速识别低洼易涝区域，快速评估城镇内涝风险；
- 3 辅助编制城市总体规划方案。

6.0.2 概化模型模拟对象应包括地形、河道、蓄涝区、雨水管渠干线、雨水泵站、调蓄水池等主要排水防涝设施，概化模型应对模拟对象进行概化处理；概化模型宜包括产流模型、汇流模型、管渠（河道）水动力学模型和地表漫溢模型。主要应用场景可包括：

- 1 评估河道、蓄涝区、主要雨水管渠、雨水泵站、调蓄水池等排水防涝设施能力，开展区域积水内涝风险定量分析；
- 2 辅助编制详细规划及排水防涝专项规划方案。

6.0.3 详细模型模拟对象应包括地形、河道、蓄涝区、雨水管渠、雨水泵站、调蓄水池及其附属设施；详细模型宜包括产流模型、汇流模型、管渠（河道）水动力学模型和地表漫溢模型。除本规程第 6.0.1 条、第 6.0.2 条的应用情景外，详细模型还可应用于：

- 1 评估建筑小区等地块内排水防涝设施能力，开展地块积水内涝风险定量分析；
- 2 辅助编制建设项目排水防涝工程设计方案。

6.0.4 传统雨水管渠规划、设计方案宜采用数学模型法进行校核；当汇水面积大于 2km^2 时，应符合现行国家标准《室外排水设计标准》GB 50014 的有关规定，采用数学模型法确定雨水设计流量。数学模型法在雨水管渠规划、设计中的应用场景及其判定标准应符合下列规定：

- 1 判断管渠满足设计标准时，以管渠模拟充满度小于 1 为判定标准；
- 2 判断管渠为瓶颈管渠时，以管渠超载且模拟水力坡度大于管渠坡度为判定标准；

3 判断管渠发生溢流时，以管渠模拟水位线高于地面高程为判定标准。

7 模型成果编制

7.1 一般规定

- 7.1.1 模型成果应包括专题报告及模型附件两部分。
- 7.1.2 模型成果编制过程中应遵循“完整真实、简洁高效”的原则。

7.2 专题报告及模型附件

- 7.2.1 专题报告应包含项目概况、资料收集、模型构建与测试、参数率定与模型验证、模拟工况、模拟结果分析及应用结论等主要章节。
- 7.2.2 模型附件应包括模型说明文件和模型工程文件，可附加模型数据记录、监测数据记录和模型过程数据。
- 7.2.3 模型说明文件内容应包括基础数据说明、模型参数取值、模拟工况及模拟结果。
- 7.2.4 模型工程文件应包括模型空间及属性数据、时间序列数据、模型运行结果及其他模型文件。
- 7.2.5 模型数据记录宜包括系统原始数据记录、修改增补数据记录、模型参数设置表、时间序列数据表及其他数据记录。
- 7.2.6 模型监测数据记录宜包括测点分布图、测点现场情况记录及各测点的水位、流量、积水等监测数据记录。
- 7.2.7 模型过程数据宜包括参数率定与模型验证、工况分析等各阶段过程结果数据图表。

附录 A 源头减排设施模型参数

A.0.1 依据源头减排设施的主要功能，其类型可分为：

- 1 渗透设施：透水铺装、绿色屋顶、生物滞留池、雨水花园；
- 2 转输设施：植草沟、渗透渠；
- 3 调蓄设施：雨水桶、调蓄水池。

A.0.2 依据源头减排设施类型，其模型宜包括：生物滞留池、雨水花园、绿色屋顶、渗透渠、透水铺装、雨水桶、植草沟等 7 种单体模块，通过对调蓄、渗透及蒸发等水文过程的概化，结合汇流模型和水质模型，实现源头减排设施对径流量、峰值流量及径流污染控制效果的模拟。

A.0.3 源头减排设施模型各单体模块可由表面层、蓄水层、路面透水层、土壤层、排水材料层和管渠层组合构建形成，各单体模块的结构组成详见表 A.0.3。

表 A.0.3 源头减排设施模型各单体模块结构组成表

单体模块	表面层	蓄水层	路面透水层	土壤层	排水材料层	管渠层
生物滞留池	√	√		√		*
雨水花园	√			√		
绿色屋顶	√			√	√	
渗透渠	√	√				*
透水铺装	√	√	√	*		*
雨水桶						√
植草沟	√					

注：√为必选，*为可选。

A.0.4 源头减排设施模型各结构层主要参数详见表 A.0.4-1，其各项参数应根据实测资料或设计施工图纸确定，缺乏资料时，可按表 A.0.4-2-A.0.4-7 选取。

表 A.0.4-1 源头减排设施模型各结构层主要参数表

结构层	参数（单位）
表面层	护坡高度（mm）
	植被容积
	地表粗糙系数
	表面坡度
	边坡坡度
蓄水层	厚度（mm）
	孔隙比

结构层	参数（单位）
	渗透系数（mm/h）
	堵塞因子
路面透水层	厚度（mm）
	孔隙比
	非透水面比例
	渗透系数（mm/h）
	堵塞因子
土壤层	厚度（mm）
	孔隙率
	田间持水量
	凋萎点
	导水率（mm/h）
	导水坡度
	吸入水头（mm）
排水材料层	厚度（mm）
	孔隙比
	粗糙系数
管渠层	流量系数
	流量指数
	偏移高度（mm）

表 A.0.4-2 绿色屋顶部分参数取值参考

参数（单位）	参数取值范围
土壤层厚度（mm）	300~600
孔隙率	0.5~0.6
田间持水量	0.3~0.4
凋萎点	0.05~0.2
导水率（mm/h）	100~300
吸入水头（mm）	88.9
排水材料层厚度（mm）	20~50

表 A.0.4-3 生物滞留设施部分参数取值参考

参数（单位）	参数取值范围
蓄水层厚度（mm）	200~300
土壤层厚度（mm）	300~1000
导水率（mm/h）	50~150
孔隙率	0.4~0.6
田间持水量	0.10~0.25
凋萎点	0.04~0.15
吸入水头（mm）	88.9
排水材料层（砾石）厚度（mm）	200~300

表 A.0.4-4 植草沟部分参数取值参考

参数（单位）	参数取值范围
护坡高度（mm）	150~250
宽度（mm）	500~2000
表面坡度（%）	0.3~5.0
边坡坡度（水平：垂直）	2.5:1~4:1
地表粗糙系数（曼宁粗糙系数）	0.03~0.2

表 A.0.4-5 下凹式绿地部分参数取值参考

参数（单位）	参数取值范围
蓄水层厚度（mm）	50~150
导水率（mm/h）	50~150
孔隙率	0.4~0.6

表 A.0.4-6 透水铺装部分参数取值参考

参数（单位）	参数取值范围
铺装厚度（mm）	75~200
路面透水层渗透系数（mm/h）	125~3500
土壤层（砂滤）厚度（mm）	300~500
土壤层（砂滤）孔隙率	0.4~0.6
土壤层（砂滤）导水率（mm/h）	100~200

表 A.0.4-7 不同土壤类型参数取值参考

土壤类型	孔隙率	田间持水量	凋萎点	导水率 （mm/h）	吸入水头 （mm）
砂土	0.437	0.062	0.024	120.396	49.022
壤质砂土	0.437	0.105	0.047	29.972	60.96
砂质壤土	0.453	0.19	0.085	10.922	109.982
壤土	0.463	0.232	0.116	3.302	88.9
粉质壤土	0.501	0.284	0.135	6.604	169.926
砂质黏壤土	0.398	0.244	0.136	1.524	219.964
黏质壤土	0.464	0.31	0.187	1.016	210.058
粉质黏壤土	0.471	0.342	0.21	1.016	270.002
砂质黏土	0.43	0.321	0.221	0.508	240.03
粉质黏土	0.479	0.371	0.251	0.508	290.068
黏土	0.475	0.378	0.265	0.254	320.04

附录 B 北京市设计降雨计算方法及附表

B.0.1 北京市设计降雨计算方法应符合北京市现行地方标准《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》DB11/T 969 的相关规定。

B.0.2 短历时设计降雨的总历时应为 3h，时间步长应为 5min，依据北京市现行 2 个暴雨分区，分别构建 I 区和 II 区的短历时设计降雨不同时段雨量分配表 B.0.2-1 和表 B.0.2-2。

表 B.0.2-1 I 区短历时设计降雨不同时段雨量分配表 (%)

序号	H180-H150	H150-H120	H120-H90	H90-H60	H60-H45	H45-H30	H30-H15	H15-H5	H5
1	13.64								
2	17.88								
3	16.06								
4	22.12								
5	16.67								
6	13.63								
7		13.93							
8		14.84							
9			19.24						
10			15.64						
11			21.78						
12			12.90						
13			10.99						
14			19.45						
15				25.73					
16				19.08					
17				20.23					
18				13.92					
19				8.58					
20				12.46					
21								47.43	
22									100.00
23								52.57	
24							38.54		
25							37.72		
26							23.74		
27						41.85			
28						26.69			
29						31.46			

序号	H180-H150	H150-H120	H120-H90	H90-H60	H60-H45	H45-H30	H30-H15	H15-H5	H5
30					38.50				
31					36.63				
32					24.87				
33		14.61							
34		21.24							
35		19.63							
36		15.75							

表 B.0.2-2 II 区短历时设计降雨不同时段雨量分配表 (%)

序号	H180-H150	H150-H120	H120-H90	H90-H60	H60-H45	H45-H30	H30-H15	H15-H5	H5
1						29.29			
2							39.69		
3								46.67	
4									100.00
5								53.33	
6							34.55		
7							25.76		
8						49.88			
9						20.82			
10					41.02				
11					30.79				
12					28.19				
13				17.52					
14				15.06					
15				19.12					
16				26.12					
17				10.93					
18				11.25					
19			16.02						
20			14.86						
21			16.80						
22			13.88						
23			19.74						
24			18.71						
25		25.23							
26		15.73							
27		12.46							

序号	H180-H150	H150-H120	H120-H90	H90-H60	H60-H45	H45-H30	H30-H15	H15-H5	H5
28		16.76							
29		13.63							
30		16.19							
31	20.90								
32	18.21								
33	13.24								
34	12.88								
35	15.14								
36	19.64								

B.0.3 短历时设计降雨各历时雨量计算应根据现行北京市暴雨强度公式计算确定。分别计算Ⅰ区和Ⅱ区不同重现期的3h历时、5min步长设计降雨过程表B.0.3-1和表B.0.3-2。

表 B.0.3-1 Ⅰ区不同重现期 3h 历时、5min 步长设计降雨过程表 单位：mm

时段	10 年一遇	5 年一遇	3 年一遇	2 年一遇
1	0.19	0.17	0.14	0.13
2	0.25	0.22	0.19	0.17
3	0.23	0.19	0.17	0.15
4	0.31	0.27	0.23	0.21
5	0.24	0.20	0.18	0.16
6	0.19	0.17	0.14	0.13
7	0.25	0.22	0.19	0.17
8	0.27	0.23	0.20	0.18
9	0.48	0.41	0.36	0.31
10	0.39	0.33	0.29	0.26
11	0.54	0.46	0.40	0.36
12	0.32	0.27	0.24	0.21
13	0.27	0.23	0.20	0.18
14	0.48	0.41	0.36	0.32
15	0.98	0.84	0.73	0.65
16	0.73	0.62	0.54	0.48
17	0.77	0.66	0.58	0.51
18	0.53	0.45	0.40	0.35
19	0.33	0.28	0.24	0.22
20	0.48	0.41	0.35	0.31
21	5.78	4.93	4.30	3.80
22	12.69	10.82	9.44	8.35

时段	10 年一遇	5 年一遇	3 年一遇	2 年一遇
23	6.41	5.46	4.77	4.21
24	3.22	2.75	2.40	2.12
25	3.15	2.69	2.35	2.07
26	1.98	1.69	1.48	1.31
27	1.89	1.62	1.41	1.25
28	1.21	1.03	0.90	0.79
29	1.42	1.21	1.06	0.94
30	1.14	0.97	0.85	0.75
31	1.09	0.93	0.81	0.71
32	0.74	0.63	0.55	0.49
33	0.27	0.23	0.20	0.17
34	0.39	0.33	0.29	0.25
35	0.36	0.30	0.27	0.23
36	0.29	0.24	0.21	0.19
累计雨量	50.28	42.87	37.40	33.07

表 B.0.3-2 II 区不同重现期 3h 历时、5min 步长设计降雨过程表, 单位: mm

时段	10 年一遇	5 年一遇	3 年一遇	2 年一遇
1	2.94	2.49	2.16	1.89
2	5.93	5.02	4.35	3.82
3	7.93	6.72	5.82	5.11
4	14.45	12.24	10.61	9.31
5	9.06	7.67	6.65	5.84
6	5.16	4.37	3.79	3.32
7	3.85	3.26	2.82	2.48
8	5.00	4.24	3.67	3.22
9	2.09	1.77	1.53	1.35
10	3.15	2.67	2.31	2.03
11	2.36	2.00	1.73	1.52
12	2.16	1.83	1.59	1.39
13	2.04	1.73	1.50	1.32
14	1.76	1.49	1.29	1.13
15	2.23	1.89	1.64	1.44
16	3.05	2.58	2.23	1.96
17	1.27	1.08	0.94	0.82
18	1.31	1.11	0.96	0.84
19	1.43	1.21	1.05	0.92
20	1.33	1.12	0.97	0.86

时段	10 年一遇	5 年一遇	3 年一遇	2 年一遇
21	1.50	1.27	1.10	0.97
22	1.24	1.05	0.91	0.80
23	1.76	1.49	1.29	1.14
24	1.67	1.42	1.23	1.08
25	1.86	1.57	1.36	1.20
26	1.16	0.98	0.85	0.75
27	0.92	0.78	0.67	0.59
28	1.23	1.04	0.90	0.79
29	1.00	0.85	0.74	0.65
30	1.19	1.01	0.87	0.77
31	1.32	1.12	0.97	0.85
32	1.15	0.97	0.84	0.74
33	0.84	0.71	0.61	0.54
34	0.81	0.69	0.60	0.52
35	0.96	0.81	0.70	0.62
36	1.24	1.05	0.91	0.80
累计雨量	98.35	83.28	72.17	63.35

B.0.4 长历时设计降雨的总历时应为 24h，时间步长应为 5min，依据北京市现行 2 个暴雨分区，分别构建 I 区和 II 区的长历时设计降雨不同时段雨量分配表 B.0.4-1 和表 B.0.4-2。

表 B.0.4-1 I 区长历时设计降雨不同时段雨量分配表 (%)

序号	H1440-H720	H720-H360	H360-H240	H240-H180	H180-H150	H150-H120	H120-H90	H90-H60	H60-H45	H45-H30	H30-H15	H15-H5	H5
1	0.33												
2	0.23												
3	0.39												
4	0.36												
5	0.44												
6	0.49												
7	0.36												
8	0.16												
9	0.23												
10	0.42												
11	0.29												
12	0.16												
13	0.26												
14	0.36												
15	0.21												
16	0.31												

序号	H1440- H720	H720- H360	H360- H240	H240- H180	H180- H150	H150- H120	H120- H90	H90- H60	H60- H45	H45- H30	H30- H15	H15- H5	H5
17	0.93												
18	1.69												
19	1.43												
20	1.32												
21	1.61												
22	1.95												
23	1.01												
24	0.86												
25	0.73												
26	0.93												
27	0.93												
28	1.43												
29			2.81										
30			3.42										
31			5.78										
32			5.17										
33			4.79										
34			1.21										
35			1.81										
36			1.89										
37			2.13										
38			2.58										
39			1.98										
40			2.89										
41			4.18										
42			5.78										
43			10.26										
44			5.93										
45			7.22										
46			4.79										
47			5.93										
48			6.23										
49			4.33										
50				8.06									
51				7.64									
52				9.03									
53				9.44									
54				10									
55				9.31									
56				6.67									
57				6.25									

序号	H1440- H720	H720- H360	H360- H240	H240- H180	H180- H150	H150- H120	H120- H90	H90- H60	H60- H45	H45- H30	H30- H15	H15- H5	H5
58				7.36									
59				8.33									
60				9.72									
61				8.19									
62					13.64								
63					17.88								
64					16.06								
65					22.12								
66					16.67								
67					13.63								
68						13.93							
69						14.84							
70							19.24						
71							15.64						
72							21.78						
73							12.9						
74							10.99						
75							19.45						
76								25.73					
77								19.08					
78								20.23					
79								13.92					
80								8.58					
81								12.46					
82												47.43	
83													100
84												52.57	
85											38.54		
86											37.72		
87											23.74		
88										41.85			
89										26.69			
90										31.46			
91									38.5				
92									36.63				
93									24.87				
94						14.61							
95						21.24							
96						19.63							
97						15.75							
98			3.72										

序号	H1440- H720	H720- H360	H360- H240	H240- H180	H180- H150	H150- H120	H120- H90	H90- H60	H60- H45	H45- H30	H30- H15	H15- H5	H5
99			2.74										
100			2.43										
101		1.71											
102		1.62											
103		1.14											
104		1.66											
105		2.52											
106		1.81											
107		1.28											
108		3.28											
109		1.99											
110		1.57											
111		1.52											
112		1.47											
113		1.05											
114		1.57											
115		1											
116		1.28											
117		2.52											
118		2.28											
119		2.76											
120		3.42											
121		3.8											
122		4.94											
123		2											
124		0.62											
125		0.43											
126		0.48											
127		0.48											
128		0.71											
129		0.67											
130		0.71											
131		0.38											
132		0.38											
133		0.52											
134		0.38											
135		0.43											
136		0.33											
137		0.24											
138		0.1											
139		0.24											

序号	H1440- H720	H720- H360	H360- H240	H240- H180	H180- H150	H150- H120	H120- H90	H90- H60	H60- H45	H45- H30	H30- H15	H15- H5	H5
140		0.29											
141		0.9											
142		0.19											
143		0.19											
144		0.24											
145		0.48											
146		0.67											
147		0.33											
148		0.38											
149		0.43											
150		0.38											
151		0.33											
152		0.38											
153		0.33											
154		0.43											
155		0.57											
156		0.37											
157		0.24											
158		0.32											
159		0.42											
160		0.37											
161		0.56											
162		0.61											
163		1											
164		2.04											
165		7.79											
166		7.13											
167		5.04											
168		1.95											
169		3.99											
170		1.52											
171		2.04											
172		2.8											
173	0.8												
174	0.8												
175	0.57												
176	0.36												
177	0.42												
178	0.42												
179	0.44												
180	0.39												

序号	H1440- H720	H720- H360	H360- H240	H240- H180	H180- H150	H150- H120	H120- H90	H90- H60	H60- H45	H45- H30	H30- H15	H15- H5	H5
181	0.31												
182	0.23												
183	0.16												
184	0.18												
185	0.21												
186	0.21												
187	0.16												
188	0.23												
189	0.23												
190	0.23												
191	0.18												
192	0.31												
193	0.34												
194	0.36												
195	0.55												
196	0.29												
197	0.13												
198	0.13												
199	0.16												
200	0.26												
201	0.18												
202	0.26												
203	1.48												
204	0.88												
205	0.47												
206	0.34												
207	0.6												
208	1.79												
209	0.6												
210	0.29												
211	0.39												
212	0.21												
213	0.29												
214	0.86												
215	0.96												
216	0.47												
217	0.34												
218	0.36												
219	0.49												
220	0.6												
221	0.39												

序号	H1440- H720	H720- H360	H360- H240	H240- H180	H180- H150	H150- H120	H120- H90	H90- H60	H60- H45	H45- H30	H30- H15	H15- H5	H5
222	0.47												
223	0.36												
224	0.7												
225	2.49												
226	5.48												
227	3.27												
228	1.3												
229	1.22												
230	0.7												
231	1.12												
232	1.53												
233	1.43												
234	1.22												
235	0.75												
236	0.47												
237	0.34												
238	0.26												
239	0.23												
240	0.42												
241	0.65												
242	0.49												
243	0.44												
244	0.52												
245	0.47												
246	0.31												
247	0.44												
248	0.44												
249	0.34												
250	0.31												
251	0.36												
252	0.42												
253	0.39												
254	0.39												
255	0.55												
256	0.7												
257	0.75												
258	0.78												
259	0.52												
260	0.6												
261	0.86												
262	0.7												

序号	H1440- H720	H720- H360	H360- H240	H240- H180	H180- H150	H150- H120	H120- H90	H90- H60	H60- H45	H45- H30	H30- H15	H15- H5	H5
263	1.43												
264	0.86												
265	0.73												
266	0.52												
267	0.83												
268	0.67												
269	0.91												
270	0.73												
271	1.12												
272	0.99												
273	0.52												
274	0.67												
275	1.12												
276	1.17												
277	0.99												
278	2.99												
279	1.82												
280	0.52												
281	0.16												
282	0.62												
283	1.13												
284	1.05												
285	1.16												
286	0.41												
287	0.38												
288	0.18												

表 B.0.4-2 II 区长历时设计降雨不同时段雨量分配表 (%)

序号	H1440- H720	H720- H360	H360- H240	H240- H180	H180- H150	H150- H120	H120- H90	H90- H60	H60- H45	H45- H30	H30- H15	H15- H5	H5
1	0.00												
2	0.00												
3	0.00												
4	0.00												
5	0.00												
6	0.00												
7	0.00												
8	0.00												
9	0.00												
10	0.00												
11	0.00												

序号	H1440-H720	H720-H360	H360-H240	H240-H180	H180-H150	H150-H120	H120-H90	H90-H60	H60-H45	H45-H30	H30-H15	H15-H5	H5
12	0.00												
13	0.00												
14	0.00												
15	0.00												
16	0.00												
17	0.00												
18	0.02												
19	0.02												
20	0.02												
21	0.00												
22	0.01												
23	0.01												
24	0.01												
25	0.00												
26	0.00												
27	0.00												
28	0.08												
29	0.03												
30	0.01												
31	0.00												
32	0.19												
33	0.04												
34	0.03												
35	0.08												
36	0.02												
37	0.12												
38	0.28												
39	0.27												
40	0.27												
41	0.28												
42	0.03												
43	0.15												
44	0.40												
45	0.54												
46	0.36												
47	1.06												
48	1.46												
49	1.80												
50	1.84												
51	3.32												
52	8.16												

序号	H1440-H720	H720-H360	H360-H240	H240-H180	H180-H150	H150-H120	H120-H90	H90-H60	H60-H45	H45-H30	H30-H15	H15-H5	H5
53	5.57												
54	5.08												
55	3.66												
56	3.89												
57	2.58												
58	2.20												
59	2.11												
60	2.41												
61	3.69												
62	3.86												
63	4.35												
64	4.20												
65	3.32												
66	2.62												
67	2.32												
68	1.28												
69	1.44												
70	0.79												
71	0.59												
72	0.40												
73	0.47												
74	0.92												
75	1.34												
76	0.50												
77	0.52												
78	0.45												
79	0.39												
80	0.47												
81	0.46												
82	0.41												
83	0.41												
84	0.47												
85	0.52												
86	0.52												
87	0.51												
88	0.73												
89	0.73												
90	0.73												
91	0.40												
92	0.39												
93	0.34												

序号	H1440-H720	H720-H360	H360-H240	H240-H180	H180-H150	H150-H120	H120-H90	H90-H60	H60-H45	H45-H30	H30-H15	H15-H5	H5
94	0.34												
95	0.25												
96	0.25												
97	0.25												
98	0.25												
99	0.30												
100	0.07												
101	0.07												
102	0.08												
103	0.21												
104	0.23												
105	0.29												
106	0.37												
107	0.38												
108	0.37												
109	0.30												
110	0.24												
111	0.51												
112	0.49												
113	0.17												
114	0.18												
115	0.18												
116	0.18												
117	0.18												
118	0.17												
119	0.12												
120	0.11												
121	0.06												
122	0.11												
123	0.17												
124	0.19												
125	0.28												
126	0.22												
127	0.27												
128	0.25												
129	0.08												
130	0.50												
131	0.36												
132	0.31												
133	0.31												
134	0.28												

序号	H1440-H720	H720-H360	H360-H240	H240-H180	H180-H150	H150-H120	H120-H90	H90-H60	H60-H45	H45-H30	H30-H15	H15-H5	H5
135	0.29												
136	0.28												
137	0.30												
138	0.03												
139	0.03												
140	0.04												
141	0.03												
142	0.03												
143	0.03												
144	0.04												
145		1.59											
146		2.46											
147		0.71											
148		0.22											
149		0.21											
150		0.36											
151		1.85											
152		0.65											
153		0.39											
154		0.58											
155		0.95											
156		1.11											
157		2.35											
158		4.18											
159		3.62											
160		2.71											
161		0.96											
162		0.53											
163		0.46											
164		0.83											
165		0.75											
166		1.26											
167		1.60											
168		1.61											
169		1.18											
170		1.10											
171		0.96											
172		0.91											
173		0.83											
174		0.91											
175		0.85											

序号	H1440-H720	H720-H360	H360-H240	H240-H180	H180-H150	H150-H120	H120-H90	H90-H60	H60-H45	H45-H30	H30-H15	H15-H5	H5
176		1.06											
177		1.04											
178		1.65											
179		1.23											
180		1.62											
181		3.40											
182		4.26											
183		1.13											
184		1.10											
185		0.90											
186		1.04											
187		0.96											
188		0.88											
189		1.48											
190		0.56											
191		0.63											
192			2.95										
193			3.79										
194			3.13										
195			3.73										
196			5.94										
197			4.66										
198			4.18										
199			3.59										
200			4.94										
201										29.29			
202											39.69		
203												46.67	
204													100
205												53.33	
206											34.55		
207											25.76		
208										49.88			
209										20.82			
210									41.02				
211									30.79				
212									28.19				
213								17.52					
214								15.06					
215								19.12					
216								26.12					

序号	H1440-H720	H720-H360	H360-H240	H240-H180	H180-H150	H150-H120	H120-H90	H90-H60	H60-H45	H45-H30	H30-H15	H15-H5	H5
217								10.93					
218								11.25					
219							16.02						
220							14.86						
221							16.80						
222							13.88						
223							19.74						
224							18.71						
225						25.23							
226						15.73							
227						12.46							
228						16.76							
229						13.63							
230						16.19							
231					20.90								
232					18.21								
233					13.24								
234					12.88								
235					15.14								
236					19.64								
237				13.19									
238				16.19									
239				17.92									
240				11.33									
241				7.71									
242				7.59									
243				5.30									
244				5.37									
245				3.18									
246				4.00									
247				3.64									
248				4.58									
249			4.91										
250			4.19										
251			5.22										
252			5.12										
253			3.84										
254			4.52										
255			4.54										
256			4.05										
257			3.24										

序号	H1440- H720	H720- H360	H360- H240	H240- H180	H180- H150	H150- H120	H120- H90	H90- H60	H60- H45	H45- H30	H30- H15	H15- H5	H5
258			3.26										
259			4.26										
260			4.70										
261			4.86										
262			3.85										
263			2.53										
264		1.63											
265		1.54											
266		1.68											
267		1.43											
268		1.23											
269		2.09											
270		1.82											
271		1.40											
272		1.39											
273		1.90											
274		1.09											
275		1.78											
276		3.18											
277		1.67											
278		2.11											
279		1.64											
280		0.83											
281		1.04											
282		1.08											
283		1.30											
284		1.41											
285		1.77											
286		1.55											
287		1.03											
288		0.79											

B.0.5 长历时设计降雨各历时雨量大小应根据现行《北京市水文手册 第一分册 暴雨图集》进行计算，分别计算中心城区、城市副中心及各新城 24h 设计降雨量表 B.0.5。

表 B.0.5 中心城区、城市副中心及各新城 24h 设计降雨量表

单位：mm

地区	20 年	30 年	50 年	100 年	200 年
中心城区	265	299	343	405	465
城市副中心	239	269	306	358	408

地区		20 年	30 年	50 年	100 年	200 年
新城	顺义	251	283	324	383	440
	亦庄	242	272	309	361	412
	大兴	239	269	305	356	405
	昌平	261	297	343	408	473
	房山	249	279	316	370	421
	门头沟	289	328	378	450	521
	怀柔	270	306	351	416	480
	密云	235	264	300	351	400
	平谷	230	259	294	344	392
	延庆	148	166	189	220	251

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 本规程中指明应按其他有关标准执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《室外排水设计标准》 GB 50014
- 2 《城市排水防涝设施数据采集与维护技术规范》 GB/T 51187
- 3 《城镇内涝防治技术规范》 GB 51222
- 4 《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》 DB11/T 969

北京市地方标准

城镇排水防涝系统数学模型 构建与应用技术规程

Technical specification for construction and application of
mathematical model of urban flooding prevention
and control system

DB11/T 2074—2022

条文说明

2022 北京

目 次

1 总 则.....	42
2 术 语.....	43
3 基本规定.....	44
4 模型构建与测试.....	45
4.1 一般规定.....	45
4.2 资料收集.....	45
4.3 模型构建.....	48
4.4 模型测试.....	60
5 参数率定与模型验证.....	62
5.1 一般规定.....	62
5.2 率定与验证标准.....	64
6 模型应用.....	65
7 模型成果编制.....	75
7.1 一般规定.....	75
7.2 专题报告及模型附件.....	75
附录 A 源头减排设施模型参数.....	77
附录 B 北京市设计降雨计算方法及附表.....	82

1 总 则

1.0.1 近年来，因暴雨积水灾害频发，政府和市民对城镇排水防涝系统规划、设计和管理工作提出了更高的要求。城镇排水防涝系统数学模型是开展上述工作的重要工具和技术手段，为提高规划、设计的质量和管理水平，要求广大规划、设计人员按规定的模型规程辅助开展工作。

1.0.2 本规程规定的模型构建与应用方法、水文和水动力学模型参数，适用于城镇排水防涝系统的规划、设计和评估。用于防汛应急管理的模型可参考本规程。

基于模型辅助开展城镇排水防涝系统规划、设计时，针对新建和改、扩建项目应予以区别对待。现行的城镇排水防涝系统数学模型方法大多是针对实际降雨径流事件模拟的，模型相关分析成果可通过“参数率定与模型验证”进行修正和验证，这种思路可以辅助优化改、扩建工程的规划、设计计算。

针对新建项目，其规划、设计的场景是由一系列设计参数组合而成的特殊场景，是来自实践的经验总结，可通过实际降雨径流事件进行类比、评估，不断修正设计参数，而无法通过“参数率定与模型验证”进行模型分析成果的修正和验证，这种思路适用于新建工程的规划、设计计算。

1.0.3 城镇排水防涝系统数学模型除应执行本规程外，尚应符合国家现行标准及北京市现行地方标准的规定，包括但不限于：《室外排水设计标准》GB50014、《城镇内涝防治技术规范》GB51222、《城市排水工程规划规范》GB50318、《城市排水防涝设施数据采集与维护技术规范》GB/T51187、《城镇内涝防治系统数学模型构建和应用规程》T/CECS 647、《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》DB11/T969、《海绵城市雨水控制与利用工程设计规范》DB11/685、《城镇排水管网在线监测技术规程》T/CECS 869。

2 术 语

2.0.6 地表漫流模型是模拟净雨在地表随地形坡面运动过程的数学模型，通常需根据地形特征和下垫面分布将地表划分为一定大小的离散网格，采用水动力学方法对其运动过程进行描述。由于该物理过程与常规地表漫溢模型不同，本规程考虑地表漫流模型在城镇排水防涝系统规划、设计工作中已广泛应用的实际情况，故定义本术语。

3 基本规定

3.0.1 本条规定了城镇排水防涝系统数学模型应用的前提条件。

我国目前采用推理公式法计算雨水设计流量。推理公式法基于以下假设：降雨在整个汇水面积上分布均匀；降雨强度在选定的降雨时段内恒定不变；汇水面积随汇流时间增长的速度为常数，因此推理公式法适用于较小规模排水系统的设计计算，当应用于较大规模排水系统的设计计算时会产生较大误差。随着城镇规模的扩张、管渠直径的增大、泵站能力的提高，排水系统汇水面积逐步扩大，排水系统流域内往往存在地表渗透性能差异较大、降雨的时空分布不均匀、管网汇流过程较为复杂等情况。发达国家已采用数值模型分析城镇积水内涝形成、发展和消退的整个过程，把城镇排水防涝系统作为一个整体考虑，并利用城镇排水防涝系统数学模型技术进行相关工程的规划、设计和管理。

3.0.2 框架模型应用的主要目的是识别出低洼易涝的高风险区域，可在整个汇水区域或区域的一部分来使用；概化模型应用的主要目的是识别出低洼易涝点，评估主要排水防涝系统及其附属设施的标准和能力，从而确定是否需要进行改造或调整，且对执行该改造或调整方案的预期效果进行评估；详细模型通常应用于片区（或地块）排水方案设计、下凹桥排水防涝方案设计、建设项目水影响评价等。在同一项目中可同时采用其中 1 种及以上模型，上一级的模型也可为下一级更详细的模型提供外部边界条件。

3.0.3 应用于城镇排水防涝系统规划、设计的数学模型区别于防汛调度和日常管理应用模型，需针对设计工况进行模型参数及边界条件的合理假定或类比。根据实际降雨事件对模型参数率定和验证的过程，其结果通常可用于修正规划、设计参数。设计工况通常包括设计降雨过程线、外河水位边界条件、不同类型地表下垫面分布状态以及土壤初始下渗状态等。

4 模型构建与测试

4.1 一般规定

4.1.1 市场上存在各种城镇排水防涝系统数学模型，它们在各种水力条件下的模拟能力、复杂负荷状况的处理、可用输出格式上，具有不同的特点。仅具有计算功能的小型软件或电子表格仍可用于城镇排水系统规划、设计。同时，专为模拟城镇排水防涝系统开发、具有便于操作的图形用户界面和强大数据处理能力的软件包也在不断完善和改进。

模拟工具选择时的注意点包括：考虑为实现建模目的的基础数据条件；了解建模工具目前在解决类似问题中的应用情况；包括购买、更新升级的成本；掌握建模工具操作的必需知识和技能；与目前计算机系统（软件和硬件）的兼容性；数据输入方式；与 GIS、CAD 等软件的数据交换能力；计算结果的表达能力；建模工具提供方可提供的培训和服务情况等。

在实际应用中，城镇排水防涝系统数学模型需满足稳定性好、模拟结果可靠等要求。模型可根据实际边界条件，在合理初始条件下快速计算收敛。

4.1.2 当收集到的地形数据、排水防涝系统设施数据等无法覆盖建模范围或数据精度无法满足建模要求时，应开展数据补充测量工作，并进行数据标准化处理，数据格式和内容应符合现行国家标准《城市排水防涝设施数据采集与维护技术规范》GB/T51187 的有关规定；当收集到的水文序列资料无法满足模型使用需求时，宜在汛期开展水文同步测验工作，并开展水文资料整编，确保水文序列的可靠性、一致性和代表性，排水管网的水文数据监测可参照《城镇排水管网在线监测技术规程》T/CECS 869 执行。

4.2 资料收集

4.2.1 数据资料是构成模型的基本元素，可主要分为八类，即降雨资料、地面高程资料、下垫面资料、排水管渠（设施）资料、城镇河道（蓄涝区）资料、流量和水位监测资料（含积水点资料）、设施运行资料和其他边界条件，各项模型数据需求和主要数据来源详见表 1。

表 1 模型数据需求和主要数据来源

模型数据需求		主要数据来源	框架模型	概化模型	详细模型
类型	数据资料				
降雨资料	降雨强度；降雨量；降雨历时；设计雨型	现场监测；水文统计分析；文献调研	√	√	√

模型数据需求		主要数据来源	框架模型	概化模型	详细模型
类型	数据资料				
地面高程资料	现状和规划地面高程	现场调查与测绘；航拍摄影；激光雷达测量；竖向规划图	√	√	√
下垫面资料	用地性质；土壤类型及渗透属性	现场调查与测绘；航拍影像提取；土地利用现状调查图；土地利用规划图	√	√	√
排水管渠（设施）资料	排水流域；检查井位置；雨水口位置及规格；管渠连接节点；管渠标高、尺寸和材质；检查井标高和尺寸；管渠粗糙系数、水泵特性曲线等	现场调查与测绘；规划、设计和施工图纸；企业信息和资产管理系统；生产厂家的性能规格说明；文献数据		√	√
城镇河道（蓄滞区）资料	河道流域；河道断面；入流方式；常水位；洪水水位变化过程；蓄滞区水位库容曲线等	现场调查与测绘；防洪排涝规划；河道专项规划、设计和施工资料		√	√
流量和水位监测资料（含积水点资料）	管渠流量和水位；河道流量和水位；构筑物过流流量和水位；积水点深度、范围、积水量和积水历时等	现场监测和历史记录；防汛发布数据；网络舆情挖掘		√	√
设施运行资料	水泵运行规则；流量控制设施（闸、阀、堰等）控制规则	运行维护记录和手册；现场调查与走访		√	√
其他边界条件	上游流量及水位边界；下游流量及水位边界；流域地形边界	现场调查与监测；历史水文序列推求、地形特征提取；相关规划和设计资料	√	√	√

注：表中“√”代表不同种类模型应尽量收集该类资料。

4.2.2 本条规定了模型中收集的降雨资料类型和要求。

通过当地气象站或水文站获取实测降雨资料时，应对降雨资料的可靠性、代表性、一致性进行充分评估后合理采用。当研究区域内雨量站较多，分布较均匀，并且各站又有同期观测资料时，可对各站点划分其影响范围（通常可采用泰森多边形进行划分），从而构建面雨量分布情景进行模拟；当研究区域面积较小时，可用点雨量代替；当面积较大，但雨量站稀少，或同期观测资料甚少，无法直接获取面雨量分布情况时，可采用点雨量和点面折减系数间接计算。北京市城近郊平原区不同流域大小的点面折减系数可按表 2 选取。

表 2 北京市城近郊平原区不同流域大小的点面折减系数表

流域面积(km ²)	50	100	300	500	700	1000
折减系数	0.98	0.97	0.95	0.94	0.93	0.92

设计降雨构建应包括各历时设计雨量大小和设计雨型。设计雨量大小应根据北京市现行暴雨强度公式和水文手册进行计算。设计雨型是反映降雨强度随时间变化的典型降雨过程，分为长历时设计雨型和短历时设计雨型。

1 长历时设计雨型宜根据当地不少于 30 年的实测降雨资料，采用不同控制时段设计降雨量同频率缩放确定。北京市长历时设计雨型详见本规程附录 B 中的表 B.0.4-1 和表 B.0.4-2。

2 短历时设计雨型宜根据当地降雨特征，选择芝加哥雨型、三角形雨型和交替区块法等构建雨型。北京市短历时设计雨型详见本规程附录 B 中的表 B.0.2-1 和表 B.0.2-2。

4.2.3 进行城镇排水防涝系统数学模型建模时，需收集研究区域内的高程数据，例如等高线、高程点、DEM（Digital Elevation Model）等数据，数据比例尺应根据模型类型和目的（重点研究区域往往需要更精细的地形刻画）确定。在进行一维管渠建模时，可以根据地形数据辅助划分汇水区域以及提取模型模拟需要的地形因子，如汇水区域的平均坡度、节点地表高程、地表汇流路径等信息。在进行二维地表建模时，由于道路、建筑物、绿地等地形以及路缘石、小区围墙、下凹桥挡墙等微地形都会对水流运动造成影响，所以地形数据还应考虑道路坡度、建筑物高程以及周边不连续的微地形高程变化。DSM（Digital Surface Model）数据相比于传统 DEM 数据，进一步涵盖了除地面以外的其他地表信息的高程，如地表建筑物、道路、铁路、桥梁等，能更真实地表达城市区域的地形特征，因此建议有条件的情况下可优先使用 DSM 数据（但应对 DSM 中的树木等影响进行修正），如果没有详细的 DSM 数据，则应通过建筑物、道路等相应图层并获取对象的高程信息，从而对 DEM 数据进行一定程度的修正。

4.2.5 本条规定了城镇河道和蓄滞区应收集的资料类型和要求。

城镇河道和蓄滞区作为排水管网的受纳水体，与排水管网共同组成城镇排水防涝体系。在建模过程中，不同的受纳水体类型纳入模型的形式不同。对于河道通常可将其构建为一维线性渠道或二维(网格化)平面地形；对于蓄滞区或湖泊，可将其考虑为调蓄水池或者进行网格划分建立二维模型。

（1）城镇河道资料主要包括河道流域、断面高程数据、河道断面分区粗糙系数或综合粗糙系数、水位和流量资料。高程数据用于描述水流流经区域的几何形态（如河道的横、纵断面），以便计算水流运动过程中的各个水力要素；分区粗糙系数是反映水流流经区域因过水断面形状、组成材质、水流状态等因素对水流产生阻力大小的重要参数；水位和流量数据主要用作模型的初始条件和边界条件设置，或者用于模型的参数率定；

(2) 蓄涝区资料主要包括流域范围、起调水位、最高蓄水位及水位库容曲线(水深-容积关系曲线),水位库容曲线可通过数字高程模型计算获取,或通过水深-表面面积进行间接描述;

(3) 涵洞、闸坝、排涝泵站及跨河建(构)筑物资料主要包括:构筑物结构尺寸、运行水位、流量特性曲线、水闸启闭方式、跨河桥墩、基础和拱部距水面距离、水泵运行规则等。

4.2.6 当缺乏积水监测数据或有效数据不足时,可充分利用防汛办发布的历年积水数据,并充分借助网络舆情挖掘手段,获取多源积水数据资料,调查积水深度、积水时间、积水范围等指标,辅助模型进行准确性的验证,明晰重点关注区域和核心问题。积水点调查应重点关注下凹桥区、低洼院落、地铁出入口、主干道路以及城市重要基础设施(如地下式变电站、医院、学校、人防工程)所在的区域。

4.3 模型构建

4.3.1 在模型构建前,应对模型数据进行标准化处理并检查,包括评估缺失和可疑数据以及拓扑结构的连接性检查,必要时可进行数据推断,并记录对数据所作的修改。

拓扑结构的连接性检查的内容应包括管渠错接、节点空间位置偏移、管渠反向、连接管渠缺失、管渠逆坡、管渠重复、环状管网或断头管等常见情况。可疑、缺失数据检查内容通常应关注检查井坐标、井盖高程、上/下游管渠底高程、管渠的尺寸、形状、长度和材质等内容。

在模型数据整理过程中,应当严格遵循资产数据的原始情况,针对其中的问题或可疑数据,提出解决措施,包括通过人工测量、CCTV(Closed Circuit Television)测量、流量测量、现场踏勘或走访相关部门等方式来增补和修正数据。当无法从以上数据来源中获得缺失信息时,可以按照一定原则进行数据推断并记录。

数据推断是指利用专业知识对部分缺失数据进行合理完善,从而使模型能够正常运转的过程,数据推断的内容通常可包括:

- (1) 管长缺失,可根据上下游连接节点坐标推断;
- (2) 管渠形状和尺寸缺失,可根据已知上下游管渠的形状和尺寸推断;
- (3) 检查井和雨水口地面高程缺失,可根据附近检查井和雨水口地面高程,或根据数字高程模型推断;对于积水点处的检查井和雨水口地面高程不宜进行推断;

(4) 管渠高程缺失,可综合考虑管渠坡度、埋深、上下游管渠高程等进行合理推理;针对重要高程信息,如溢流设施高程、截流管渠高程、排水口高程等不宜进行推断。

在模型建立的整个过程中，可通过数据标签对数据的修改、增补、删减、推断等操作进行记录，并能追踪数据源头。

排水防涝系统数学模型中所采用的不同类型数据，在观测和统计的时间、空间尺度和数值精度等方面宜相互匹配。建模工程师和模型审查人员不应过于追求某一项数据或参数的精度，应当根据模型的使用目的，合理控制模型整体质量。

4.3.2 根据水文计算原理，设计降雨总历时不应小于模拟系统的完整汇流时间。根据北京市规划、设计排水管渠的汇流时间统计，其完整汇流时间通常为 1h~3h，可根据本规程附录 B 构建短历时(3h)设计降雨，用于评估管网系统的达标情况、进行雨水设计计算等，其各历时雨量应根据现行北京市暴雨强度公式计算确定。

长历时设计降雨主要用于城镇内涝防治系统规划、设计，包括区域内涝风险分析、行泄通道和调蓄设施的规划、设计计算等。城镇内涝防治系统汇流时间主要取决于城市下垫面特性，包括汇水面积、地面坡度、土地利用性质、河湖调蓄容积等，通常不会超过 24h。可根据本规程附录 B 选用北京市不同区域的长历时(24h)设计降雨进行防涝系统的规划、设计，其各历时雨量应根据现行《北京市水文手册 第一分册 暴雨图集》计算确定。

4.3.3 产流模型主要可分为两大类，一类是参数具有真实物理意义的，其代表为初损后损法；另一类是参数没有真实物理意义的，其代表就是径流系数法(固定径流系数法或者变径流系数法，变径流系数法国内相关基础研究匮乏，应用较少)。从国内外的应用实践来看，两类方法都得到了广泛的应用和推广，而且都取得了良好的效果。推理公式法在产流过程中采用了固定径流系数法，多年来也有效指导了国内的排水管渠系统规划、设计，而且鉴于国内基础数据匮乏，采用径流系数法，可以参照已有规范，有利于模型技术的推广与应用。但是，由于径流系数法是统计意义上的参数，其随降雨历时、降雨强度、流域下垫面等都会发生变化，因此随着基础资料的普及，基于具有真实物理意义参数的模型在使用上将会更为便捷。

(1) 固定径流系数法。

固定径流系数法涉及的主要参数包括流量径流系数、雨量径流系数和径流系数修正系数，流量径流系数通常用于排水防涝设施瞬时流量的模拟和能力大小的评估，雨量径流系数通常用于模拟计算积水内涝水量，评估积水风险和蓄涝设施的调蓄规模等。城市不同种类下垫面的径流系数应依据实测数据确定，缺乏资料时可参考北京市现行地方标准《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》DB11/T 969 和《海绵城市雨水控制与利用工程设计规范》DB11/685 进行经验取值，详见表 3。

表 3 不同种类下垫面径流系数经验取值表

下垫面种类		雨量径流系数	流量径流系数
屋面	绿化屋面（基质层厚度 $\geq 300\text{mm}$ ）	0.3~0.4	0.4
	硬屋面、未铺石子的平屋面、沥青屋面	0.8~0.9	1
	铺石子的平屋面	0.6~0.7	0.8
混凝土或沥青路面及广场		0.8~0.9	0.90~0.95
大块石铺砌路面及广场		0.5~0.6	0.7
沥青表面处理的碎石路面及广场		0.45~0.55	0.65
级配碎石路面及广场		0.4	0.5
干砌砖石或碎石路面及广场		0.4	0.4~0.5
非铺砌的土路面		0.3	0.35~0.4
绿地		0.15	0.3
水面		1	1
地下室覆土绿地（ $\geq 500\text{mm}$ ）		0.15	0.3
地下室覆土绿地（ $< 500\text{mm}$ ）		0.3~0.4	0.4
透水铺装地面		0.08~0.45	0.08~0.45
下沉广场（50 年及以上一遇）		-	0.85~1.0

表 3 中的径流系数为低重现期、短历时降雨条件下的经验取值。随着降雨重现期的提高和降雨历时的增加，径流系数也会增大，而径流系数的选取对内涝防治系统规模的确定影响较大。用于雨水管渠规划、设计的径流系数属于低重现期、短历时降雨条件下的流量径流系数。为提高内涝防治系统的安全性，参考国内外相关研究及实际工程经验，确定低、中、高重现期，短、长历时降雨下的径流系数修正系数详见表 4。

表 4 径流系数修正系数

降雨 重现 期	低重现 期（ ≤ 5 年）	中重现期 （ > 5 年且 ≤ 10 年）	中重现期 （ > 10 年且 ≤ 20 年）	中重现期 （ > 20 年且 ≤ 30 年）	中重现期 （ > 30 年且 ≤ 50 年）	高重现 期（ $>$ 50 年）
短历 时修 正系 数	1.0	1.0~1.05	1.05~1.1	1.1~1.2	1.2~1.3	1.3~1.5
长历 时修 正系 数	-	1.0~1.1	1.1~1.2	1.2~1.3	1.3~1.5	1.3~1.5

注：径流系数修正系数随降雨重现期的提高而增大，当修正后径流系数大于 1 时，应按 1 取值。

（2）降雨径流相关图法。

降雨资料主要选用次降雨量为 70mm 以上的降雨，共 13 场、126 站次降雨资料。二十世纪五十年代选用的雨量站有：三家店、团城湖（颐和园）、五孔桥、气象站、钓鱼台、松林闸、朝外八条、西便门、右安门、左安门、东便门，共 11

个站。二十世纪八十年代选用的雨量站有：三家店、团城湖、长河闸、松林闸、东直门、玉渊潭、右安坝、龙潭闸、乐家园站，共 9 个站。

流量资料共分析了 13 个站、151 站次流量资料。二十世纪五十年代的流量站有：五孔桥、钓鱼台（玉渊潭泄水闸）、玉渊潭电站、西便门（分洪闸）、右安坝、泄洪道（位于右安门）、广渠门、三盆口西闸、松林闸、建国门、林阁闸、车站木桥、乐家花园，共 13 个站。二十世纪八十年代的流量站有：五孔桥、玉渊潭进口闸、玉渊潭泄水闸、玉渊潭电站、西便门二热闸、右安坝、泄洪道、龙潭闸、松林闸、坝河分洪闸、乐家花园，共 11 个站。

流域平均降雨量的计算，采用泰森多边形法。先分析出各雨量站的控制面积及权重，然后根据各雨量站的相同时段的降雨量 P_i 及雨量站权重 w_i ，计算出该时段的流域平均降雨量 P ，其计算公式如式（1）所示：

$$P=P_1 \times w_1 + P_2 \times w_2 + \dots + P_i \times w_i + \dots + P_n \times w_n \quad (1)$$

式中： n ——雨量站数。

为计算径流深，首先将流量过程线的双峰分割成单峰，然后再分割基流。在研究区域内，基流主要是外流域来水和城镇污水等。根据分割基流后的流量过程线，计算出次降雨产生的洪水总量 W ，洪水总量除以流域面积 F 即为次降雨产生的径流深 $R=W/F$ 。

根据以上分析的降雨量、径流深以及下垫面情况，建立次降雨量 P —不透水面积比例 A —一次径流深 R 相关图，分析了不透水面积百分比分别为 10%、20%、61%、77%和 85%的五条相关线，并拟合公式详见表 5。

表 5 次降雨量 P —不透水面积比例 A —一次径流深 R 拟合公式表

序号	不透水面积比例 A	次径流深计算公式	适用范围
1	85%	$R=0.712P-14.8$	$90\text{mm} \leq P \leq 310\text{mm}$
2	77%	$R=0.701P-20.6$	$90\text{mm} \leq P \leq 310\text{mm}$
3	61%	$R=0.648P-23.9$	$90\text{mm} \leq P \leq 310\text{mm}$
4	20%	$R=0.352P-13.5$	$90\text{mm} \leq P \leq 310\text{mm}$
5	10%	$R=0.248P-18.0$	$90\text{mm} \leq P \leq 310\text{mm}$

不透水面积比例应通过流域内的土地利用情况分析计算后获得，表 6 中给出了不同土地利用类型的不透水面积比典型取值，具体取值应根据实测数据或典型样本分析后确定，流域不透水面积比计算公式如式（2）所示：

$$A = \frac{\sum_{i=0}^n A_i F_i}{\sum_{i=0}^n F_i} \quad (2)$$

式中： A ——流域不透水面积比（%）；
 A_i ——不同土地利用类型的不透水面积比（%）；
 F_i ——不同土地利用类型的占地面积（ m^2 ）。

表 6 不同土地利用类型的不透水面积比典型取值表

一级类		二级类	不透水面 积比(%)
编码	名称	名称	
1	耕地	水田、水浇地、旱地	0~10
2	园地	果园、茶园、其他园地	0~10
3	林地	有林地、灌木林地、其他林地	0~10
4	草地	天然牧草地、人工牧草地、其他草地	0~10
5	商服用地	批发零售用地、住宿餐饮用地、商务金融用地、其他商服用地	85~100
6	工矿仓储用地	工业用地、采矿用地、仓储用地	40~75
7	住宅用地	城镇住宅用地、农村宅基地	50~95
8	公共管理与公共服务用地	机关团体用地、新闻出版用地、科教用地、医疗卫生慈善用地、文体娱乐用地、公共设施用地、公园与绿地、风景名胜设施用地	70~100
9	特殊用地	军事设施用地、使领馆用地、监狱场所用地、宗教用地、殡葬用地	60~80
10	交通用地	铁路用地、公路用地、街巷用地、农村道路、机场用地、港口码头用地、管道输送用地	80~100
11	水域及水利设施用地	河流水面、湖泊水面、水库水面、坑塘水面、沿海滩涂、内地滩涂、沟渠、水工建筑用地、冰川及永久积雪	0~10
12	其他用地	空闲地、设施农用地、田坎、盐碱地、沼泽地、沙地、裸地	0~10

注：公共管理与公共服务用地中，公园与绿地不透水面积比典型取值为 0~30%，科教用地不透水面积比典型取值为 50%~80%，风景名胜设施用地不透水面积比典型取值为 30%~60%，其他土地利用类型不透水面积比典型取值为 70%~100%。

降雨径流相关图法中计算的次径流深与净雨的物理意义并不一致，次径流深不仅包括了降雨扣除损耗后形成净雨的过程，也涉及各种径流成分向流域出口断面汇流的过程，因此降雨径流相关图法常用于较大流域（通常为城镇河系流域）的出口断面水文模拟计算。

（3）初损后损法。

对于汇水区域面积较大、透水性地面比例较高的地区，特别是未开发地区，径流系数通常难以准确确定。多个现行的免费和商业模型均包含通过扣损法确定净雨量的模块，可以在合理确定模型参数的基础上进行更加准确的径流量计算。初损后损法将降雨损耗的过程概化为初损和后损两个阶段。初损主要包括植物截留、填洼及产流前下渗的水量，后损即产流后下渗的水量。

植物截留的影响因素较多，通常包括植物本身的特性、气候因素、植被的分布和覆盖度特征等。植物截留的资料获取并不容易，并且都不是精确值，给实际应用带来诸多不便，因此，许多学者给出了一些经验模型来计算植物截留量，如

Horton（霍顿）模型、Linsley-Klhler-Paulhus(LKP)模型、Meriam 模型等，在缺乏实测数据时，可采用霍顿经验公式进行计算，如式（3）所示。

$$S = a + bP^n \tag{3}$$

式中：a、b、n——经验参数；
S——植物截留量（mm）；
P——场次降雨量（mm）。

针对不同的植被类型，参数 a、b 和 n 的经验取值详见表 7。

表 7 不同植被类型的霍顿经验公式参数取值

植被类型	普通草地	普通树林	农作物	饲料植物和苜蓿
a	0.005	0.04~0.05	0.02	0.01
b	0.08	0.18~0.20	0.15	0.10
n	1	0.5~1	1	1
适用植被覆盖系数	1	0.25	0.25	1

注：植被覆盖系数指单位面积上植被覆盖物的面积。

在一次降雨过程中，部分降雨被洼地拦蓄，无法变成地表径流，该部分被拦蓄的水量称为填洼量，拦蓄水量最终通过蒸发进入大气或下渗进入土壤。地表的填洼损失通常可根据经验进行取值，如周玉文教授根据北京百小万庄实测资料得出城市不透水区域损失值通常为 1mm~5mm。Berrett R.E 建议在无资料地区的最大填洼量采用：透水地区为 7.6mm，不透水地区为 1.96mm。美国丹佛地区政府委员会编制了针对城市不同地表类型的填洼量推荐取值详见表 8。

表 8 城市不同地表类型的填洼量经验取值

地表类型	不透水地表	屋顶(平坦)	屋顶(有坡度)	透水草地	树林和耕地
最大填洼量（mm）	1.5~4.6	3.0~9.15	1.5~3.0	6.0~15.3	6.0~18.3
推荐值（mm）	3.0	3.0	1.5	9.0	12.0

土壤下渗损失是降雨产流损失中最主要的损失类型，目前有许多描述土壤下渗的计算模型，如 Horton 下渗模型、Green-Ampt 模型、Richard 方程和 CN（Curve Number）曲线法等。当前国内应用最为广泛的是 Horton 下渗模型，Horton 下渗公式是由 Horton 于 1933 年提出的一个经验水文模型，该公式通过一个数学指数函数描述了土壤从干旱状态转变为含水饱和状态的下渗速率变化过程，但是这一模型不能体现降雨强度对土壤下渗能力的影响，其计算公式如式（4）所示：

$$f_m = f_c + (f_0 - f_c) e^{\frac{-k_0 t_x}{3600}} \tag{4}$$

式中：f_c——稳定下渗率（mm/h）；
f₀——初始下渗率（mm/h）；
t_x——下渗时间（s）；
k₀——衰减常数，可取 2h⁻¹~7h⁻¹。

霍顿（Horton）公式中的土壤下渗参数应通过实测获得。在缺乏资料时，可参考相关已有研究成果。美国国家环保署（EPA）编制的 SWMM 模型建议将土壤分为砂土、壤土和黏土三类，并按土壤湿润程度和植被覆盖情况给出了初始下渗率的参考值（详见表 9）。土壤稳定下渗率可根据土壤饱和状态下的下渗能力取值。SWMM 模型建议采用艾肯和马斯格雷夫（Akan,1993；Musgrave,1955）总结的土壤稳定下渗率参数取值（详见表 10）。由于在不同的土壤类型和降雨历时条件下，衰减常数的变化较大，SWMM 模型建议其取值范围为 $2\text{h}^{-1}\sim 7\text{h}^{-1}$ 。当衰减常数大于 3h^{-1} 时，土壤下渗能力对衰减常数的变化不再敏感，因此，部分研究（如 WQCOSM 模型）建议，蓄水能力较强的土壤衰减常数可取 2h^{-1} ，其他类型的土壤的衰减常数可取 3h^{-1} 。

表 9 SWMM 模型土壤初始下渗率取值

土壤类型	初始下渗率（mm/h）
干燥砂土，基本无植被	127
干燥壤土，基本无植被	76.2
干燥黏土，基本无植被	25.4
干燥砂土，较厚植被	254
干燥壤土，较厚植被	152
干燥黏土，较厚植被	51
湿润砂土，基本无植被	43
湿润壤土，基本无植被	25
湿润黏土，基本无植被	7.6
湿润砂土，较厚植被	84
湿润壤土，较厚植被	51
湿润黏土，较厚植被	1.8

表 10 SWMM 模型土壤稳定下渗率取值

土壤分类	稳定下渗率（mm/h）
A	7.6~11.4
B	3.8~7.6
C	1.3~3.8
D	0.0~1.3

注：A 类土壤是指砂土、沙壤土或壤质砂土；B 类土壤是指粉质壤土或壤土；C 类土壤是指砂质黏壤土；D 类土壤是指黏壤土、粉质黏壤土、砂质黏土、粉质黏土或黏土。

另外，从工程安全性角度，城镇内涝防治系统规划、设计通常有充沛的前期降雨的假设，即认为前期降雨已基本完成洼地填洼，并使土壤含水基本处于饱和状态。因此，在防涝设计工况条件下，可不考虑植被截留量和填洼量损失，下渗过程按稳定下渗率进行扣损（即仅考虑后损），该方法可简单描述为“平割法”，原理如图 1 所示，“平割法”基本步骤为：

(1) 应根据不同种类下垫面的雨量径流系数，按照其各自面积占汇水面积的比例，采用加权平均的方法计算得到汇水区域内的综合雨量径流系数；

(2) 通过试算确定降雨过程的稳定下渗率（mm/h），使得降雨损失量与总雨量的比值正好与已确定的综合雨量径流系数一致，从而满足总水量平衡。

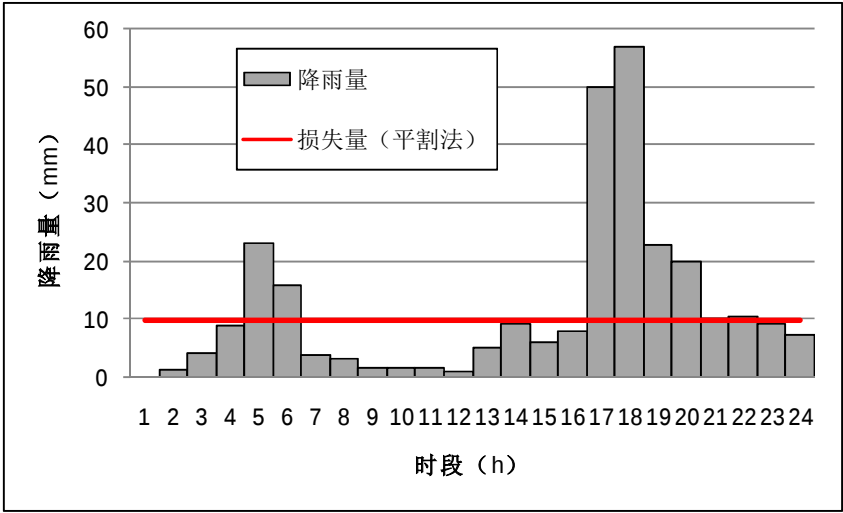


图1 “平割法”原理示意图

4.3.4 流域内的降雨经过扣除损失形成净雨后，从流域各处向流域出口断面汇集的过程称为流域汇流。径流有着不同的径流成分。因此，流域汇流模拟又可分为地表径流汇流模拟和地下径流汇流模拟。汇流模拟包括水文响应单元或汇水区域的汇流计算和洪水演算。洪水演算在当前的模型软件架构中，通常是通过管渠（河道）的水动力学模型实现（详见本规程第4.3.5条），本规程中所指的汇流模拟主要是指水文响应单元或汇水区域内的汇流计算，即对净雨-径流关系的模拟。

由于地表径流和地下径流汇流特性存在较大差异，所以在进行自然流域汇流模拟时，应分别进行地表汇流模拟和地下汇流模拟。在城市区域，针对汇入雨水管渠的小型汇水区域可不考虑地下汇流。

当前，城市地表汇流模拟常用方法包括水文学方法和水动力学方法。地表汇流水文学计算常用的方法包括：等流时线法、时段单位线法；水动力学方法的数学模型属于物理性模型，模型参数具有明确的物理意义，主要根据地形和地貌数据经测量和分析获取，当前应用较多的是非线性水库法。

(1) 等流时线法。

在缺乏流域详细资料时，采用等流时线法比较容易和目前的规划、设计方法和参数体系接近，当前应用较多。等流时线法涉及的参数为汇流速度（或汇流时间）和汇流曲线类型。

汇流速度（或汇流时间）可参考北京市现行地方标准《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》DB11/T 969，其计算方法和建议取值如下：

1) 在平原地区，当雨水汇水区域面积为 $1\text{hm}^2 \sim 2\text{hm}^2$ 时，流速取值 0.4m/s 。当汇水区域面积在 1hm^2 以下时，可按照坡面汇流，采用 Kerby 公式[式(5)]计算，但从排水安全角度，推荐采用平均流速法，流速取值 0.4m/s 。

2) 在山区，因地形坡度较大，推荐采用 Kerby 公式[式(5)]计算汇流时间。但如汇水区域的地形被改造为台地时，推荐采用平均流速法(流速取值 0.4m/s)。

$$t_c = 1.45 \left(\frac{N \times L}{\sqrt{S}} \right)^{0.467} \quad (5)$$

式中： t_c ——地表汇流时间 (min)；

L ——地面流行距离 (m)；

S ——地表平均坡度；

N ——地表种类参数。

对于不同的地表类型， N 的推荐取值详见表 11。

表 11 Kerby 公式不同地表种类参数取值

地表类型	N 值
光滑铺砌地表	0.02
平裸土地表	0.10
稀疏草地或粗糙土地表	0.20
均匀草地	0.40
树林或茂密草地	0.80

当汇水区域存在多种类型地表时，可根据不同类型地表的面积和相应 N 值，进行加权平均后代入式 (5) 进行计算。

等流时块的划分通常需根据汇水区域的形状和影响地表汇流路径的地形地貌特征，描述出一簇传播时间相同的线，从而对汇水区域进行等流时块分割。国外部分模型软件中，根据汇水区域的不同形状，推荐采用不同类型的汇流曲线如图 2 所示。对于正三角形汇水区域，由于其前期汇水面积增长较快而后期较慢，因此采用凸形的汇流变化曲线，而对于倒三角形汇水区域，前期面积增长较慢而后期较快，则推荐采用凹形汇流变化曲线。针对规划、设计中常见的雨水汇水区域面积（一般为 $1\text{hm}^2 \sim 2\text{hm}^2$ ），多数情况下均可简单概化成矩形汇水区域，从而采用线性汇流曲线（即汇水面积随汇流时间呈线性增长）。

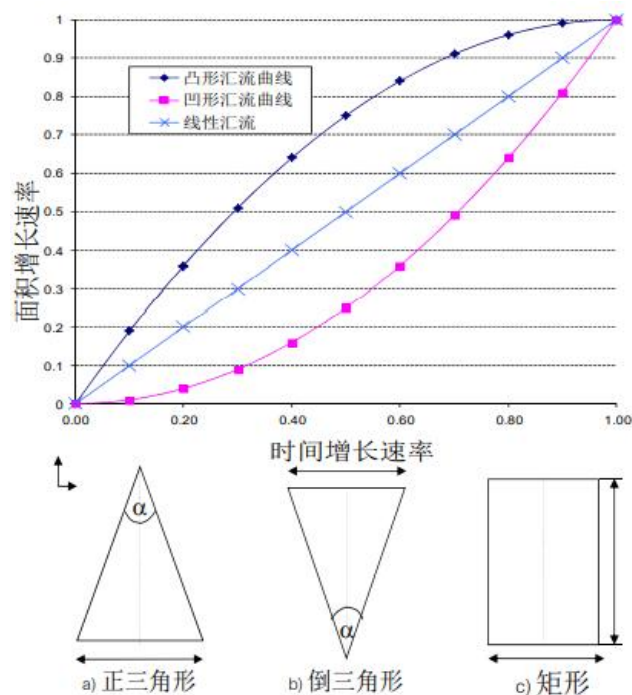


图 2 汇流曲线示意图

(2) 非线性水库法。

非线性水库法通过将汇水区域概化为一个水深较浅的水库，降雨为该水库的入流，土壤下渗和地表径流为水库的出流。地表汇流过程的演算通常采用简化的运动波方法，基于有限差分计算方法求解圣维南方程组，从而获得水库的出流流量过程线。非线性水库法涉及的主要参数包括：概化成矩形汇水区域后的特征宽度、平均坡度以及地表粗糙系数（曼宁粗糙系数）。

特征宽度和平均坡度应通过实测地形地貌，经分析计算后获取，特征宽度为汇水区域面积与汇流路径长度的比值，如果具有多条汇流路径，应采用汇流路径长度的平均值计算特征宽度。平均坡度应采用汇流路径的平均坡度或汇流路径所带汇水区域面积的权重平均坡度。

地表粗糙系数反映了降雨径流通过汇水区域表面时遇到的阻力大小，该系数采用曼宁粗糙系数 n 值表达，根据国外对不同属性地表的降雨-径流试验，不同类型地表的曼宁粗糙系数经验取值详见表 12。

表 12 城市不同类型地表的曼宁粗糙系数 n 经验取值

地表类型	n 取值范围
水泥或沥青地表	0.01~0.013
砂质地表	0.01~0.016
碎石地表	0.012~0.033
裸土地表	0.012~0.033
稀疏草地	0.10~0.20
密草地	0.39~0.63

(3) 时段单位线法。

单位时段内在流域上均匀分布的单位净雨量所形成的出口断面流量过程线，单位净雨量一般取 10mm，单位时段取 1h、3h、6h、12h、24h 等。依据倍比假定、叠加假定推求流域出口断面地面径流过程线。

若无单位线资料，则需利用实测的降雨径流资料来推求，推荐选择时空分布较均匀，历时较短的降雨形成的单峰洪水来分析。根据地面净雨过程 P_t 及对应的地面径流过程线 Q_t ，可以推求单位线。具体步骤为：

- 1) 选择雨洪资料；
- 2) 确定单位时段 Δt ；
- 3) 求地面径流过程；
- 4) 求地面净雨过程；
- 5) 由已知的地面净雨过程 P_t 和地面径流过程 Q_t ，推求单位线。

根据已知的 P_t 和 Q_t ，求解以 q_t 为未知变量的线性方程组。如式(6)~式(8)：

$$Q_1=(P_1/10) \times q_1; \quad (6)$$

$$Q_2=(P_1/10) \times q_2+(P_2/10) \times q_1; \quad (7)$$

$$Q_3=(P_1/10) \times q_3+(P_2/10) \times q_2+(P_3/10) \times q_1 \quad (8)$$

.....

式中： Q_t —— t 时段地面径流 (m^3/s)；

P_t —— t 时段的净雨量 (mm)；

q_t ——所求 t 时段的单位线径流 (m^3/s)，求解 q_t 即为所推求单位线。

当单位时段净雨为 1 个或两个时段时，可用分析法求单位线，即直接求解上述方程组。否则，当单位时段数为 3 个或以上时，需要借助试算法求单位线。另外，上述方法直接求得的单位线有时会存在锯齿状，存在这一问题时需要兼顾前后时段的计算值大小徒手修匀。

4.3.5 管渠内水流运动过程通常可采用完全或简化求解的一维圣维南方程组进行模拟计算。一维圣维南方程组将水流在管内的运动简化为一维运动，忽略垂直方向的速度和加速度，通过分别构建水量平衡方程和能量守恒方程进行运动过程的描述。

河道水流是典型的明渠非恒定流，可通过水文学方法和水动力学方法进行模拟计算。水文学方法需对河道形态特征高度概化，通常可在缺乏详细河道断面测量资料时使用，如采用水文过程线法、模数法等。水动力学方法是采用数值求解一维或二维非恒定流方程的方法，水动力学模型对水流的传播、坦化和变形规律都能很好地模拟，因此，在资料条件允许的前提下，建议采用一维或二维圣维南方程组的数值模拟计算方法。

水动力学模型涉及的主要参数包括管渠/河道粗糙系数和节点局部水头损失系数，粗糙系数应根据管渠材质或河道表面特征合理选用，并充分考虑设施在实

际运行时的排水效率；针对阻水特征明显的构筑物上下游节点（如倒虹吸、闸坝、堰和断面突变处等），其局部水头损失系数应根据实测数据分析确定，不宜将其纳入沿程损失系数概化考虑。

水动力学模型的数值求解一般采用有限差分法或有限体积法，不同软件采用不同求解方法进行迭代求解，但求解都需满足收敛性、稳定性等要求。完整的圣维南方程组求解称为动力波方法，扩散波方法忽略了能量守恒方程中的惯性项，因此忽略了管渠中的回水影响，运动波法忽略了扩散项和惯性项，因此在不考虑下游回水影响的同时，管渠中的流量过程演算将不会产生衰减。应根据模型应用的目的，选择合适的模型计算方法。一般情况下宜采用动力波方法模拟，以提高模型模拟的精度；当降雨数据为长期实测历史降雨数据时，在不影响模型计算稳定性的前提下，为节省模拟时间，可以采用扩散波或运动波方法模拟（需注意运动波方法计算多个下游分支断面时，应规定节点的分流规则）。

在开展高重现期降雨条件下的城镇内涝防治系统规划、设计和风险评估模拟时，尤其是外洪河道水位对城镇排水防涝系统能力带来较大影响时，应合理设置下游出口的水位边界条件。在具备长期的水文观测资料条件下，应根据暴雨分区开展内涝与外洪的遭遇概率分析；当缺乏资料时，应按不利条件考虑，采用内涝与外洪同频率且峰峰遭遇的情景，进行出口水位边界条件设置。

4.3.6 地表漫溢模型和地表漫流模型一般需先构建规则网格的地形数字高程模型（DEM）或非结构性网格模型（Mesh），通过二维水动力学方法（如二维圣维南方程组的数值模拟）从而实现对积水内涝动态过程的数值模拟。当采用的数学模型只能模拟雨水在地下管渠中的一维运动，而不能模拟雨水在地表的二维流动时，通常可运用数学模型模拟出各节点的漫溢情况，根据地形数据计算漫溢雨水的地表积水深度以及范围（平静水面方法），但该方法一般无法准确体现地表积水的演进和退水过程，因此建议在条件允许时，应尽量采用二维水动力学方法进行地表积水内涝动态过程模拟计算。

地表的二维水动力学模拟方法以城市地表高程为基础，综合考虑建筑物、道路、绿地等不同地形地貌特征对地表坡面运动过程的影响，从而模拟分析地表积水深度、积水时间、积水范围等参数的动态变化，评估城市区域的积水内涝风险。因此，模型构建时往往需特别注意地形刻画的精度，需准确描述城市区域典型的地貌特征，如建筑物分布、小区围墙、道路以及高填方的铁路、公路等。

二维地表漫溢模型通过与管渠和河道一维模型相互耦合，模拟雨水在管渠系统和地表之间通过雨水口的传输，以及地表漫流与沟、渠、河道和箱涵等的衔接。与一维管渠模型耦合计算时，需根据实测数据和管网概化情况，合理设置节点通量（管网耦合节点与地表二维网格的最大交换流量限值），避免由于节点通量设置不合理，造成地表形成大量积水而管渠内无水或水量很小的不合理结论。

地表漫流模型直接模拟净雨在地表的坡面运动过程,可用于替代常规的地表汇流模型,不需要预先划分汇水区边界。地表漫流模型在应用时,宜考虑雨水口的空间布局位置 and 实际收水能力,对地表径流量进行扣损计算。在城市总体规划阶段应用时,由于缺乏详细的管网规划、设计方案,常简单采用下渗或蒸发的形式替代管网排水过程。

4.4 模型测试

4.4.1 在对排水防涝系统构成要素空间分布和连接情况进行核实过程中,常见的问题类型及查询、解决方法详见表 13。

表 13 数据核实常见问题类型及查询、解决方法

问题类型	问题描述	查询方法	解决方法
管渠错接	管渠上游或下游连接节点关系错误,导致管渠错接到其他位置	在管渠属性表或电子地图中查找长度过长管渠	根据周围其他连接正确的管渠位置信息判断,若无法通过经验确定,应进行现场勘察修正
节点位置偏移	节点位置与实际偏差较大,通常由节点坐标错误记录导致	在管渠属性表或电子地图中查找长度过长管渠	参考测绘地形图、管渠实测数据或进行现场勘察修正
管渠反向	管渠流向与实际流向相反	通过网络上下游分析及上下游高程判断	上下游连接节点信息互换
节点孤立	节点未连接任何管渠	通过网络上下游查找或通过模型运行的提示信息确认	参考测绘地形图、管渠实测数据或进行现场勘察修正,根据实际情况应补充连接管渠或删除孤立节点
节点重复	两个(或多个)节点的坐标相同	通过节点 XY 坐标识别	删除重复节点并修正管渠连接节点信息
连接管渠缺失	两个节点之间缺少连接管渠	通过网络上下游关系查询没有下游连接管渠的非排放口节点或通过模型运行的提示信息确认	参考测绘地形图、管渠实测数据或进行现场勘察修正,根据实际情况补充缺失管渠(或构筑物)或标记为断头管
管渠逆坡	管渠下游管底高程高于上游管底高程	通过管渠上下游高程差查找	参考管渠实测数据或进行现场勘察修正
环状管网	多条管渠之间互相连接成环	通过网络上下游关系查询或通过模型运行的提示信息确认	参考管渠实测数据或进行现场勘察修正
管渠重复	两个相邻节点之间连接多条管渠,且管渠信息通常完全相同	通过管渠上下游节点编号查找或利用 GIS 空间重叠分析查找	参考管渠实测数据或进行现场勘察判断是否为多孔或平行管渠,根据实际情况修正

4.4.2 由于模型中可能存在不正确的输入数据或不合理的参数设置，因此在模型应用前应进行模型的稳定性测试，以验证模型能否正常收敛，计算结果是否出现明显偏差。

应根据模型应用的目的，选择一场或多场典型降雨事件进行模型测试。用于模型测试的降雨事件应尽可能有代表性，既要能从宏观上反映模型的运行结果是否合理，又能从微观上反映某些关键构筑物的运行方式是否合理（如不宜出现短时间内频繁启停泵、闸的现象）。用于模型测试的典型降雨事件如下：

- （1）低强度多峰值的降雨事件，如典型年（或一个月）连续实测降雨；
- （2）低重现期、短历时的设计降雨，如重现期为 2 年~5 年的 3h 设计降雨；
- （3）高重现期、长历时的设计降雨，如重现期为 10 年~100 年的 24h 设计降雨。

低强度多峰值的降雨事件重点考查模型在长期降雨过程中是否能稳定运行以及参数是否设置合理（一般通过总下渗量、总蒸发量、总径流量的对比分析），通常用于源头减排设施模型。

低重现期降雨事件和高重现期降雨事件主要是用于评估模型的连续性相对误差和评估关键构筑物的运行方式是否合理。连续性相对误差主要包括节点水量的连续性相对误差和系统总水量的连续性相对误差（目前常用模型计算软件均具有上述误差的统计功能）。

当节点水量连续性相对误差不满足要求时，可采用以下解决方法：

- 1) 检查节点是否为蓄水设施并检查蓄水设施进、出水管渠高程是否正确；
- 2) 检查节点纵断面图，观察是否是由于井底标高过低导致永久蓄水；
- 3) 增加模拟历时，涵盖降雨停止后系统的退水过程。

当系统总水量连续性相对误差不满足要求时，可采用以下解决方法：

- 1) 检查管渠纵断面图，观察是否存在管渠逆坡或错位导致永久蓄水（可采用合理初始化进行修正）；
- 2) 增加模拟历时，涵盖降雨停止后系统的退水过程；
- 3) 减小模拟时间步长，降低模型计算的不稳定性。

5 参数率定与模型验证

5.1 一般规定

5.1.1 关于参数率定与模型验证数据来源的规定。

现场实测数据主要包括雨量、水位、流量、流速等数据，以及泵站、闸门等运行调度数据。调研数据主要包括研究区范围内积水点位置、积水深度、积水时间、积水范围等数据。遥感数据主要包括历史场次降雨过程中积水点位置信息和积水范围数据。

参数率定与模型验证应选择合适的降雨场次，对场次降雨实测数据的需求可参照《英国排水系统水力模型工程师职业规范》如下：

（1）为保证水位、流量等具有较明显的变化幅度，场次降雨的总雨量应大于 5mm，最大 4min 的降雨强度应超过 6mm/h；

（2）对于建模区域面积较大（ $>10\text{km}^2$ ）的模型宜考虑降雨空间分布，采用多个雨量计的实测雨量进行模拟，多个雨量计的同一场次降雨选择宜符合下列规定：

- 1）所有雨量计测得的同一场次降雨的时间步长宜相同；
- 2）相邻雨量计测得的同一场次降雨量偏差不宜超过 20%；
- 3）相邻雨量计测得的同一场次降雨峰现时间偏差不宜超过 15min；
- 4）相邻雨量计测得的同一场次降雨连续峰现时间间隔偏差不宜超过 10%；
- 5）相邻雨量计测得的同一场次降雨峰值强度偏差不宜超过 30%。

针对不同类型模型的参数率定与模型验证，其监测数据需求如下：

（1）管渠水动力学模型：历史场次降雨过程的雨量监测数据以及降雨发生前和整个降雨事件过程中的检查井水位监测数据、管渠流量和流速监测数据、管渠排放口处的水位、流量和流速监测数据。

（2）地表漫溢模型和地表漫流模型：如果模型模拟区域为相对闭合的汇水区域，需要区域内积水点位置、积水深度、积水时间和积水范围等监测数据。如果模型模拟区域为非闭合汇水区域，还需要模拟区域边界处的入流流量、水位等监测数据。

（3）对于包含下凹桥和低洼区域的模型，需要下凹桥和低洼区域的积水深度监测数据。

（4）对于包含天然或人工河道的模型，需要降雨发生前和整个降雨事件过程中的河道断面水位、流量和流速等监测数据。

（5）对于包含闸门、泵站等调控设施的模型，需要降雨发生前和整个降雨事件过程中的闸门、泵站运行调度数据，包括闸门启闭过程、流量、水位等监测数据，水泵启闭过程、前池水位、排水流量等监测数据。

参数率定与模型验证时所需的积水数据，宜采用现场监测数据。如果缺乏现场监测数据，可采用遥感数据、历史记录或当地经验辅助进行参数率定与模型验证。

5.1.2 模型采用的计算方法不同，需要率定的参数也不同。以常用的模型计算方法为例，总结需要率定的模型参数详见表 14：

表 14 模型方法及其率定参数汇总表

模型类型	模型方法	需率定的主要模型参数
产流模型	固定径流系数法	流量径流系数、雨量径流系数
	降雨径流相关图法	次径流深
	初损后损法	初始填注量； 下渗速率：一般可采用下渗曲线描述（如霍顿下渗曲线），其中可能涉及参数包括：初始下渗率、稳定下渗率以及衰减常数
汇流模型	等流时线法	汇流速度（汇流时间）
	非线性水库	特征宽度、平均坡度、地表粗糙系数
管渠（河道）水动力学模型	一维水动力学方法	管渠/河道粗糙系数； 节点局部水头损失系数
地表漫溢模型	二维水动力学方法	地表粗糙系数、节点通量
地表漫流模型	二维水动力学方法	地表粗糙系数、下渗/蒸发速率

确定模型需要率定的参数后，应选择合适的方法对参数进行灵敏度分析，确定参数变化对水位、流量、流速和积水模拟结果的影响。

模型参数灵敏度分析方法可采用手动法，通过变换单一参数并保持其他参数固定不变的方式，分析参数变化的幅度和方向对模拟结果的影响，也可采用自动法进行灵敏度分析，如 Morris 筛选法。

模型参数率定时，应依据灵敏度分析结果，从灵敏度较高的参数开始调整。一般情况下，可首先对模型产、汇流参数进行率定，再进行管渠（河道）水动力学模型参数的率定。对比时间序列的拟合程度时，可先依据水量平衡，将总水量结果进行拟合调整（对比总水量的结果时，可考虑剔除可信度较低的时间段数据），其次比对时间序列的峰值和峰现时间，保证序列数值大小相符合、峰现的时间相近。

5.1.3 参数率定指通过合理调整模型的参数，将模拟结果与实测数据进行对比，最终使模拟结果满足模型要求。模型验证指将参数率定后的模型输入另外独立的实测降雨事件进行模拟，对比模拟结果与实测数据，如果模拟计算结果与实测值的误差未达到允许的范围，需重复参数率定过程，直到率定的参数满足模型验证的要求。

参数率定与模型验证应分别采用独立的实测数据。由于用于参数率定和模型验证的数据测量时间不同，因此需确保模型基础数据具有一致性，即在不同时间内城镇排水防涝系统（河道、排水管渠、源头减排设施、防涝设施等）的物理特征不能有重大变化。

最终率定的模型参数应在合理的取值范围内,不应违背基本的物理属性和常识,并减少“异参同效”现象发生的可能性。

5.1.4 当采用规划、设计数据构建城镇排水防涝系统数学模型时,该模型并非真实存在的物理管网系统,而是工程设计人员基于一定设计条件所定义的工程产品。因此,模型通常并没有参数率定与模型验证的过程,即并没有实测的流量或水位数据,来进行模型参数的选择和调整。影响模型构建是否有效的关键因素在于整个建模过程中,模型相关参数是否等价的反映了规划、设计条件,通常称之为“设计条件等价”。“设计条件等价”的原则是使得模型的方法和参数设置,与规划、设计条件一致或等价的反映了规划、设计条件,从而在预期的条件下对排水防涝系统方案进行校核、评估和优化调整。

5.2 率定与验证标准

5.2.1 参数率定与模型验证应至少分别采用一场完整的实测降雨过程开展调整、拟合工作,实测降雨时间步长一般不宜大于 10min,同时,应考虑实测降雨对模拟区域的空间代表性,并应对前期降雨和土壤湿润状况等进行充分评估。

5.2.2 框架模型一般采用地表漫流模型,用于识别低洼易涝区域。模型模拟结果与实际情况对比时,应重点关注积水内涝发生频次较高的区域、地势低洼区域以及重要设施所在区域(如地下通道出入口、医院、学校、变电站设施及其周边区域等)。

5.2.3 概化模型用于识别低洼易涝点和评估排水防涝系统的标准和能力,通常包括产流模型、汇流模型、管渠(河道)水动力学模型和地表漫溢模型,宜分别进行率定和验证。为获得有效的监测数据,应制订科学合理的监测方案,获得关键节点和断面的水文监测过程数据。在制订监测方案时,应充分考虑实用性、分散与集中相结合、代表性和可行性等原则,优先覆盖低洼易涝点、主干管渠排放口、调蓄设施上下游节点、泵站上下游节点、河道闸上下游断面、河道分洪断面等关键节点和断面。

5.2.4 详细模型用于片区(或地块)排水方案设计、下凹桥排水防涝方案设计、建设项目水影响评价等,通常包括产流模型、汇流模型、管渠(河道)水动力学模型和地表漫溢模型。由于详细模型需针对局部区域的排水防涝系统进行更为精细的模拟,因此,除了满足概化模型的率定与验证标准之外,对于管网系统关键节点还宜满足节点水位相关要求。

6 模型应用

6.0.1 框架模型在规划、设计阶段结合对地形地势的分析，常用于辅助划定汇水区域，确定模型的模拟边界范围，一般采用快速评估的方法。将降雨产生积水内涝的过程可以概化为：首先，降雨到地表后经扣损形成地表径流；产生的地表径流一部分随管渠排放，另外一部分在地表流动；最后随地形汇集到地势低洼点而产生积滞水区域。因此，对降雨到地表后的产流过程可按照径流系数对降雨扣损得到净雨的方式进行处理；对于随管渠排放的水量可根据雨水口和管渠排放能力，采用下渗或蒸发的方式进行概化处理；对于地表积滞水应采用二维水动力学方法模拟其地表坡面运动过程，分析模拟积水内涝从发生到结束的全程状态。根据以往的实际工程应用经验，利用不含雨水管网模型进行快速积水评估的方法已得到较为广泛的应用，并取得了良好的效果。目前该方法在北京市下凹桥防涝规划中得到广泛应用，主要用于划定下凹桥区客水影响范围、编制客水拦截方案等，如图 3 所示。

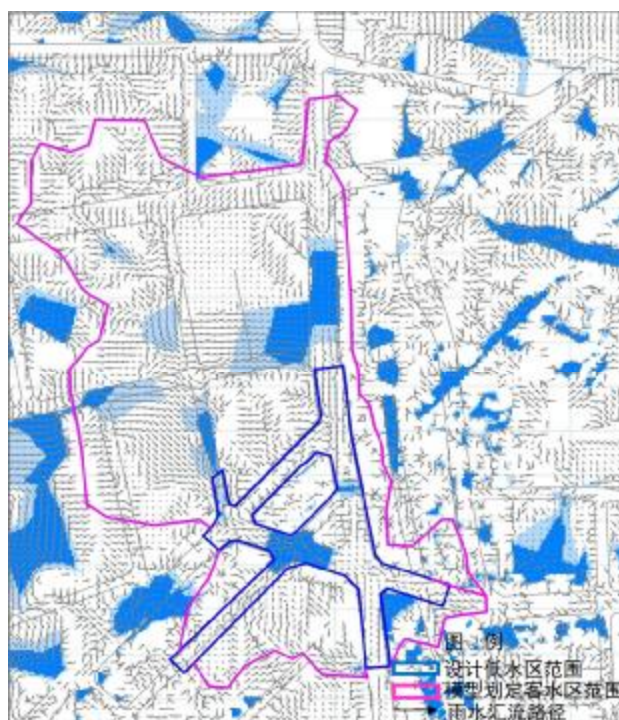


图 3 框架模型划定下凹桥区客水影响范围应用案例图

框架模型还广泛应用于城市总体规划及分区规划阶段，主要用于识别存在内涝风险的区域、确定适宜的排水方式并规划预留设施用地等。如在北京某机场的选址规划中（如图 4 所示），采用框架模型识别出存在内涝风险的区域，根据下游河道的水位情况，确定该区域需采用强排的方式解决其排水出路问题，同时，在规划阶段预留好相关排水防涝设施建设所需的用地。

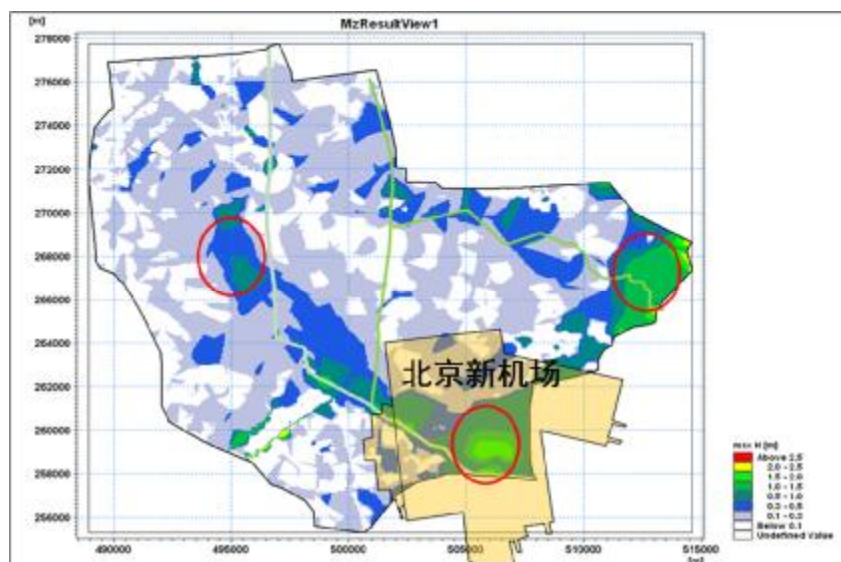


图 4 框架模型识别内涝风险区域应用案例图

6.0.2 概化模型应根据评估对象、范围和具体规划目的，对城镇排水防涝系统要素进行一定程度的概化，从而加快模型计算速度，提高工作效率。应用于规划阶段的概化模型，重点构建市政道路上的主干和次干雨水管渠，可不包含地块内的小市政管线；对于相邻雨水管渠在尺寸、坡度基本相同情况下可概化为一管，若发生管渠尺寸、坡度变化较大或跌水等情况时，需保留该段管渠。河道概化的原则与管网概化基本一致。目前，概化模型主要应用于辅助编制详细规划及排水防涝专项规划方案，如详细规划阶段，通过分析积水点位置以及定量分析积水程度，从而确定地表竖向高程控制要求；排水防涝专项规划当中，通过模型定量计算，辅助制订积水点防涝规划方案，确定防涝设施规模，如图 5 所示。

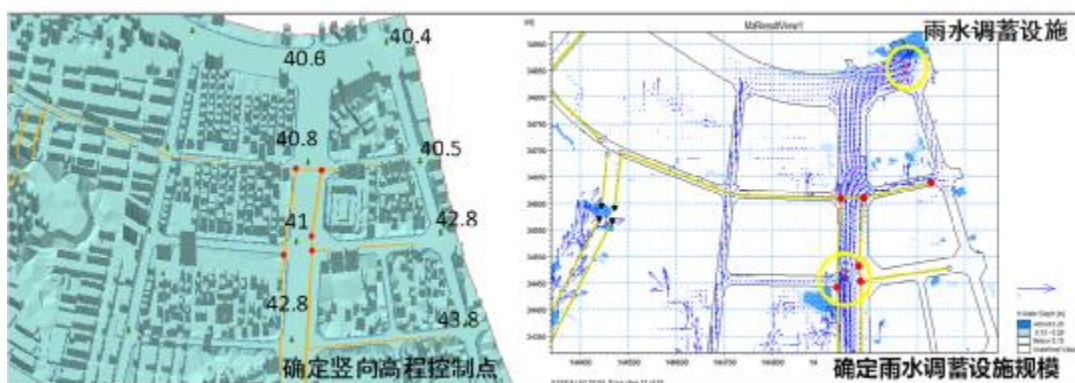


图 5 概化模型辅助确定竖向高程控制要求、确定防涝设施规模应用案例图

6.0.3 详细模型是对城镇排水防涝系统全要素特征的精细化模拟，在上述两类模型应用场景以外，还主要应用于评估建筑小区等地块级别的雨水管渠及防涝设施能力，辅助制订建筑小区等地块的排水防涝设施设计方案。在建设项目水影响评价中应用广泛，如图 6 所示；同时也常应用于辅助编制建设项目排水防涝工程设

计方案，如排水（涝）泵站、雨水调蓄水池等设施的详细设计方案论证，如图 7 所示。



图 6 详细模型在小区地块建设项目水影响评价中的应用案例图



图 7 详细模型在下凹桥防涝泵站及调蓄水池设计规模论证中的应用案例图

6.0.4 我国传统的城镇雨水管渠设计流量计算是采用推理公式法。非恒定流模型方法与传统的水力计算方法相比，其计算结果与管网实际运行状态更吻合。应用模型技术实现对推理公式法设计结果的校核，是对传统的城镇雨水管渠规划、设计方法的一种改进，其目的是通过对规划、设计方案的模型验算，了解由于推理公式法的适用条件限制以及工程规划、设计人员所做出的部分假定（如针对现状、规划管渠共同承担某一设计流量时，所做出的分流假定；以及针对复杂环状管网人为做出的流域划分假定），而引起的潜在设计风险，进而为规划、设计方案的调整提供合理化依据。

以下以案例的形式说明采用模型方法对传统雨水管渠规划、设计方案进行校核的过程及主要的分析结论。

(1) 管渠设计标准校核。

采用推理公式法进行雨水管渠设计流量计算时，不同区域的管网可能采用统一或不同的重现期设计标准。通过非恒定模型验算，可以验证管渠是否满足预定的设计标准要求。雨水管渠设计标准评估的目的是通过多情景的水力模拟，计算不同重现期下管网的运行状态，最终以管渠超载的临界状态，即满管无压流状态判断管网的排水能力所对应的重现期标准，在使用模型结果判断时，可采用管渠计算充满度小于 1 为判定标准。

某片区雨水管渠改、扩建规划项目，总汇水面积 2.45km^2 ，为完全分流制系统。依据街区地块分布、道路布局及地形等进行市政管网规划布局，共有 40 根管段、38 个检查井和 1 个出水口，雨水管渠总长度 10.82km，下游排入城镇排水河道，其管网分布如图 8 所示。



图 8 案例区管网分布图

该片区市政雨水管网设计标准为 3 年一遇~5 年一遇，根据规划用地类型和地形条件，核算各子汇水区流量径流系数为 0.55~0.75，地面集水时间为 5min~15min。依据规划、设计数据构建模型需遵循“设计条件等价”的原则。“设计条件等价”包括了汇水区产、汇流模型等价和管网基础参数等价，管网基础参数的等价比较容易实现，如管径、管长、坡度、粗糙系数、出水口水位和其他构筑物的结构参数等，是规划、设计阶段和模型校核阶段一一对应的确定性内容。汇水区产、汇流模型的等价需使得模型的方法和参数设置，与规划、设计条件一致或等价的反映规划、设计条件，从而在设计工况下对方案进行校核、评估和优化调整。

产、汇流模型为了实现“设计条件等价”的要求，同时由于本次方案校核的目的主要是评估管网能力是否达标，案例所采用的产流模型方法为固定径流系数法，各子汇水区流量径流系数取值与规划所采用的参数一致；汇流模型方法为等

流时线法，各子汇水区汇流时间与规划所采用的参数一致（原规划方案中各子汇水区的汇流时间是依据本规程条文说明第 4.3.4 条，采用平均流速法进行分别计算，为 5min-15min），汇流曲线类型采用线性汇流。

根据本规程第 4.3.2 条的规定和项目区所在位置，模型采用北京市 II 区 3h 的短历时设计降雨进行管渠校核模拟（详见本规程附录 B），模型计算工况包括 2 年一遇、3 年一遇、5 年一遇和 10 年一遇四种情景，各情景设计降雨如图 9 所示。

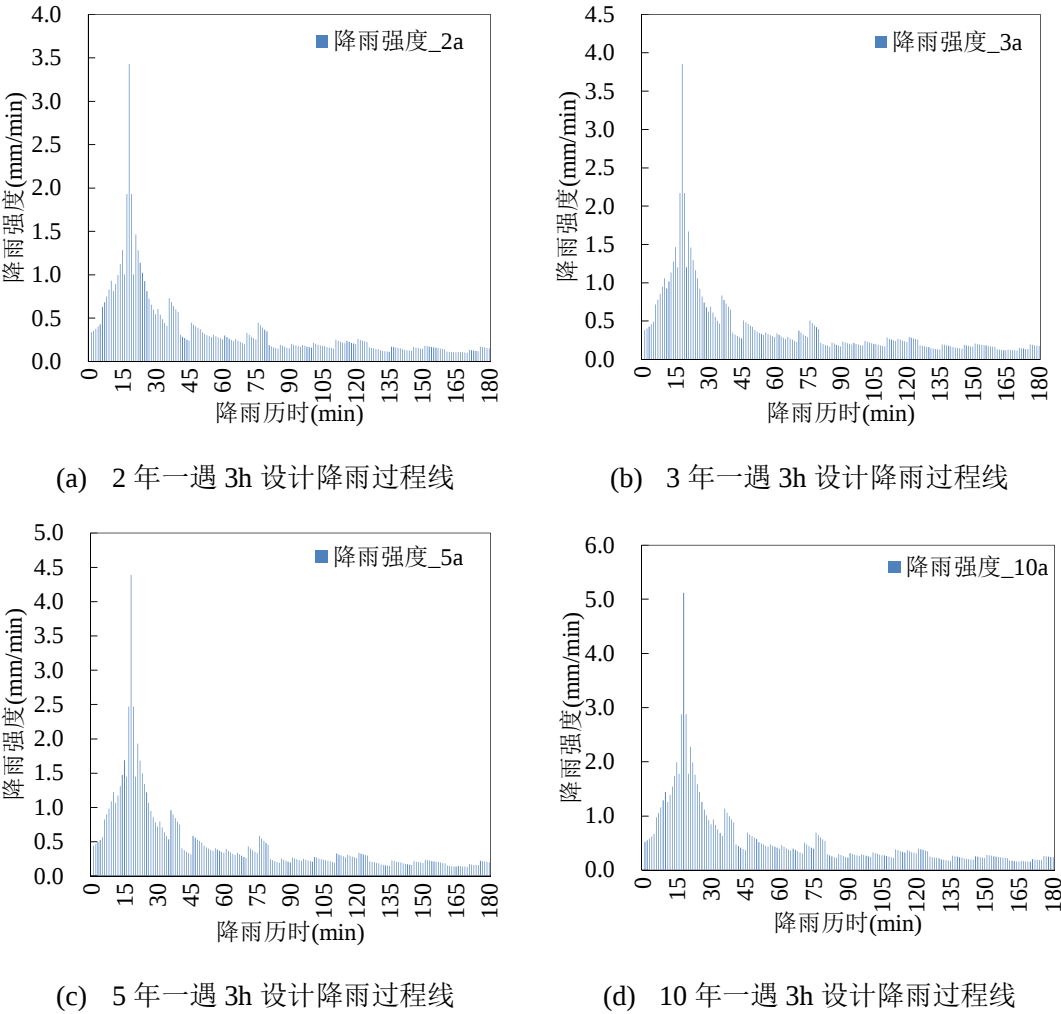


图 9 各情景设计降雨图

管渠水动力学模型采用动力波方法模拟，模拟计算步长为 1min，总模拟历时为 6h。根据各情景的充满度结果，绘制管网排水能力标准分布图，如图 10 所示。

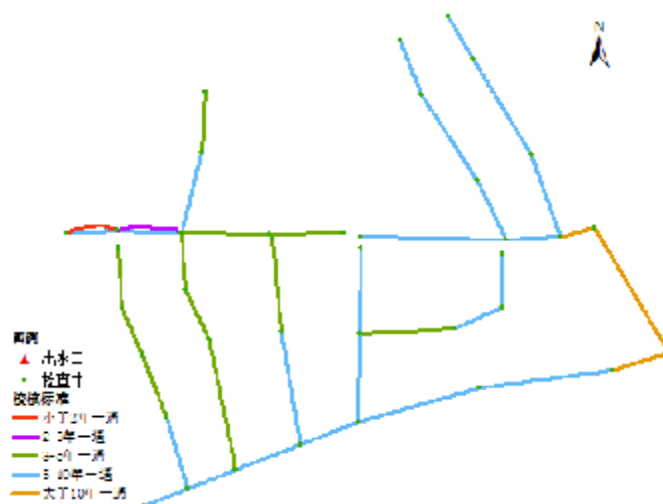


图 10 管网排水能力标准校核结果分布图

从上图可见，部分管渠的模型校核结果显示不足 3 年一遇，未达到设计标准要求。这种情况较容易出现在管网辫状（如同一位置有现状和规划管渠共同承担设计流量）、环状分布的方案中，由于规划、设计人员做出的部分假定条件与管网实际运行状态不符，从而引起不达标的情况。经校核，下游部分管渠的能力超过了 10 年一遇，设计方案过于保守，可能造成管渠规模过大、投资浪费等问题，因此可根据模型计算的流量进一步对方案进行优化调整（但需谨慎处理该种结果，有时部分下游管渠校核标准较高是由于上游管渠能力不足，限制了下泄的流量，从而出现下游管渠过流流量减小的情况）。

针对未达标的管渠，依据模型校核结果可对原规划、设计方案进行优化调整，建议可先遵循“从大到小”的原则（即针对未达标的规划管渠，可先进行大管径的试算，再逐渐减少管渠规模，直至管渠能力适宜），再按照“从下游至上游”的顺序依次进行管渠设计参数的调整和模型反复验算，直至全部管渠满足设计标准要求为止（有条件时，可借助自动化程序实现方案的模型优化调整过程）。上述案例中通过调整与不达标管渠（为规划保留的现状管渠）平行的规划新增管渠的高程，从而优化调整设计流量的分配；通过减小下游超标管渠的尺寸或坡度，从而降低管渠富余的排水能力，最终实现全部管渠满足设计标准要求，如图 11 所示。



图 11 调整后管网方案排水能力标准校核结果分布图

(2) 瓶颈管渠分析。

模型模拟的超载管渠并非均由自身过流能力不足所造成，部分管渠是由于受到下游管渠的水位顶托影响，从而造成该管渠未能充分发挥其设计过流能力。

根据管渠的不同运行状态，模型计算结果可定义三种类型的管渠状态标识，分别为正常管渠、瓶颈管渠和受顶托管渠。瓶颈管渠可定义为发生超载状态时，水力坡度大于管渠设计底坡的管渠；受顶托管渠可定义为发生超载状态时，水力坡度小于管渠设计底坡的管渠，如图 12 所示。

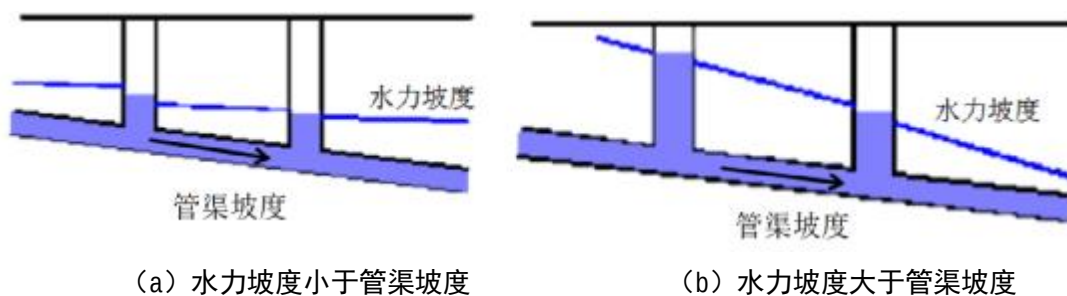


图 12 管渠超载运行状态

以某项目区为例，其管网设计标准为 3 年一遇，采用 3 年一遇、3h 的短历时设计降雨进行模拟，其瓶颈管渠的模拟分析结果如图 13 所示。

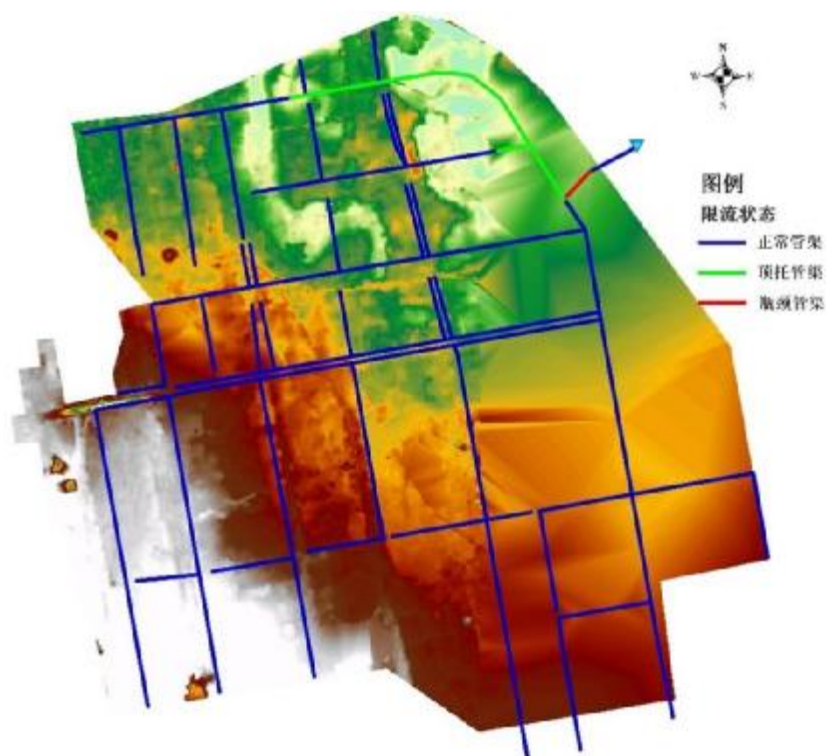


图 13 瓶颈管渠模拟分析结果

图中红色管渠为瓶颈管渠，上游绿色管渠为受顶托管渠，管网运动状态可通过软件纵剖面图显示功能查看问题管段，图 13 中超载管渠剖面图如 14 所示。

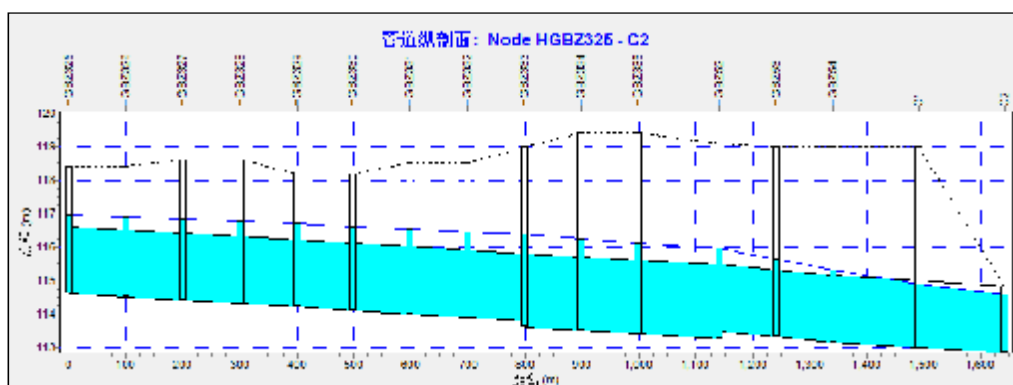


图 14 瓶颈管渠模拟分析结果瓶颈管渠纵剖面图

从上图可见，由于下游瓶颈管渠影响，从而抬高了管网系统的水位，致使上游管渠同样发生了超载状态。从原因上分析，瓶颈管渠发生超载的原因可归结为自身过流能力不足，而上游管渠主要是受下游水位的顶托影响。因此，针对不同原因的超载管渠调整方案需区别对待，对于自身过流能力不足的管渠，增大管渠的设计断面或设计坡度是最直接有效的方法，而对于受下游水位顶托影响的管渠，在不改善下游水力状态的前提下，调整该段管渠的设计参数不仅收效甚微，甚至可能造成较大的成本浪费。针对本实例中的超载管渠，可优先通过增加下游瓶颈管渠设计断面尺寸的方法，调整后方案再次进行模型演算。如通过将图 14 中瓶颈管渠的断面尺寸从 2m 增加到 2.2m，保持设计坡度不变，重新计算的管网运行状态如图 15 所示。

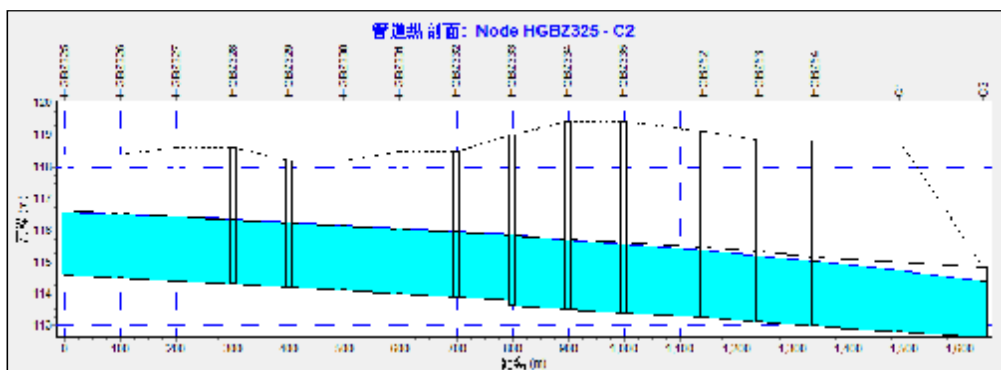


图 15 调整后管网运动状态剖面图

从上图可见，通过调整瓶颈管渠的断面尺寸，不仅使得自身管渠满足了设计要求，原上游超载管渠的水力状态同步得到了有效改善。因此，瓶颈管渠分析最主要的目的即在于定位系统中的问题管渠，针对问题管渠优先制订调整方案，从而不仅使管网设计方案调整工作更具有针对性，而且减少了实际工程人员的工作量，增加了工作效率。

（3）管渠溢流校核。

管渠设计标准校核只是对管渠是否发生超载进行分析，但管渠超载并不意味着即会产生内涝溢流。管渠溢流校核的目的在于采用高重现期的设计降雨过程，对管网系统在高强度、长历时降雨条件下的排水能力（尤其是承压排水能力）进行更全面的分析。

为了使评价结果具有更好的展示性，可定义管渠超载系数属性用于展示管渠溢流校核的结果。管渠超载系数定义为管渠上游检查井的最大水位至管顶的高程与管渠上游埋深（上游检查井地面至上游管顶的高程）的比值，当最大水位低于管顶时，超载系数定义为 0。可见，管渠超载系数一定程度上代表了管渠的承压状态，当系数达到 1 时，则代表管渠检查井已发生了溢流。

以某项目区为例，分别采用 10 年一遇、20 年一遇、30 年一遇和 50 年一遇，24h 的设计降雨过程进行模拟，出水口的水位采用与降雨同频率的河道设计洪水位作为边界条件。通过模拟计算并统计最大值计算结果，按照管渠不同的计算超载系数绘制各情景的结果主题，如图 16 所示。

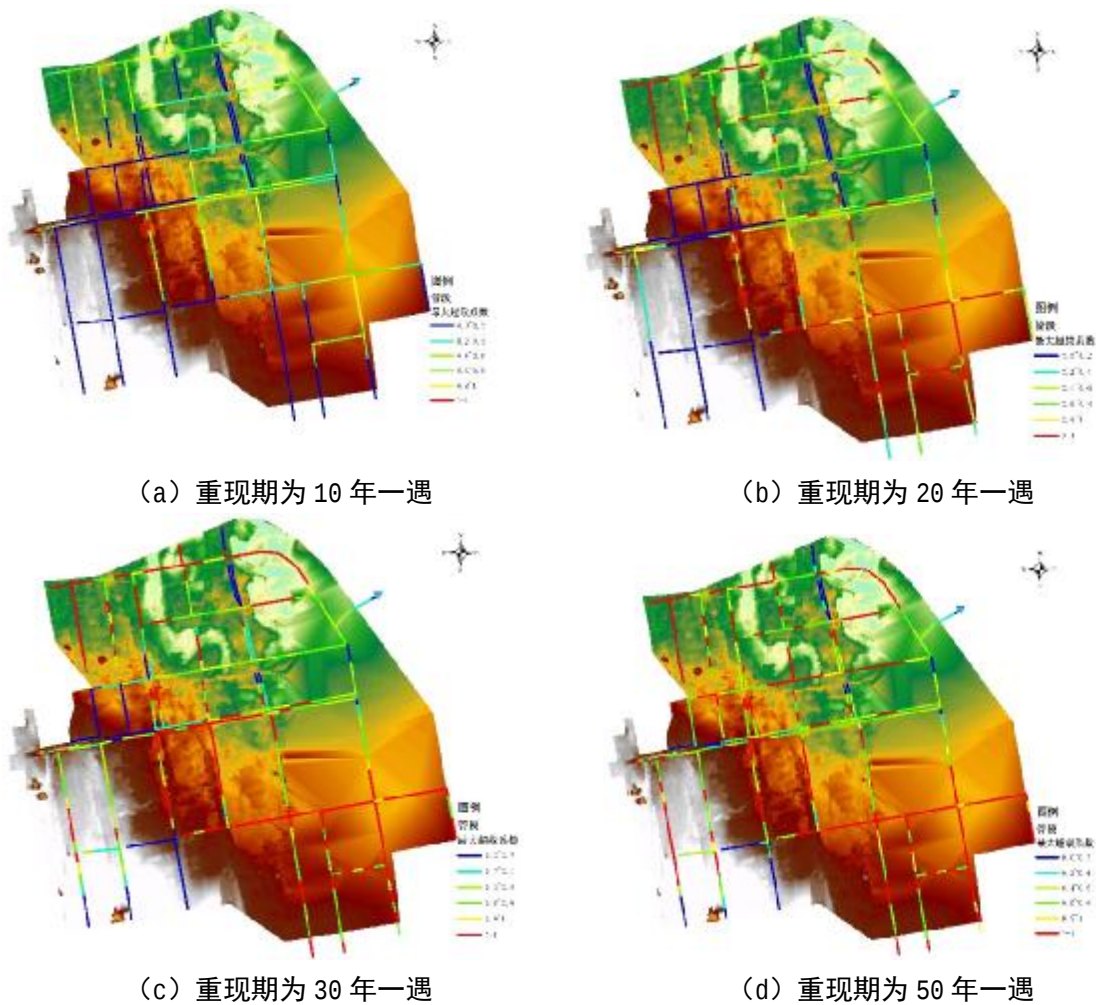


图 16 不同情景模拟管渠超载系数计算结果

图 16 中红色管渠为超载系数达到 1 的管渠，即相应情景将产生溢流的管渠。从图 16 可见，降雨重现期为 10 年时，虽然部分管渠发生了超载状况，但无检查井产生溢流，重现期为 20 年时，少量埋深较浅管渠的水位线将超出地面，从而产生溢流。根据发生溢流的管渠数量统计，虽然一半以上的管渠在 50 年一遇降雨条件下，均未发生溢流，但不代表整个管网系统具有较高标准的内涝防御能力。根据实际工程经验可知，对于整个管网系统来说，大部分的内涝溢流量来自于系统中少部分的管渠和检查井，而这部分管渠往往是系统中“短板”（设计标准偏低或地势低洼处的管渠），由于管网系统的压力流作用，绝大多数的内涝溢流量将由“短板”管渠所产生。因此，管渠溢流校核的主要目的在于定位系统“短板”，从而可以根据评估结果合理制订内涝防治规划、设计方案，或者可以针对“短板”采取相应工程措施，提高整个管网系统的内涝防御能力。

7 模型成果编制

7.1 一般规定

7.1.2 完整真实：模型成果应包含编制内容中要求的全部内容，并据实编写成果文件，严禁弄虚作假；简洁高效：文本语言应简洁，重点论述模型软件选用、模型类型、模型数据及参数、模型结果等核心内容。

7.2 专题报告及模型附件

7.2.1 规定了专题报告应包含的主要内容。

(1) 项目概况章节相关要求如下：

- 1) 阐述项目实施背景情况；
- 2) 明确建模的预期目标以及选用的模型类型，例如“本次模型构建以识别区域风险为目标，采用概化模型进行模拟分析”；
- 3) 明确选用的模型软件名称及版本号，自主研发模型需要详细介绍模型产权及原理；
- 4) 对区域气象水文、人口概况、地形地貌、排水单元划分、排水防涝系统现状及运行状况等进行阐述；
- 5) 绘制项目实施技术路线图，技术路线图能够清晰反映模型模拟的关键环节及流程。

(2) 资料收集章节应列出数据清单(可采用附表形式)，主要包括数据名称、数据来源和收集日期等。

(3) 模型构建与测试章节具体要求如下：

- 1) 模型构建说明部分应对产流模型、汇流模型、管渠（河道）水动力学模型、地表漫溢模型和地表漫流模型中所做的概化处理和假设条件进行阐述；
- 2) 模型边界条件及初始参数设置内容应重点阐述模型边界条件设置，并列出初始参数表格；
- 3) 模型测试应包括模型中排水防涝系统构成要素空间分布和连接情况核实以及模型运行稳定性测试两部分。

(4) 参数率定与模型验证章节具体要求如下：

- 1) 应阐述参数率定与模型验证所采用的数据来源和质量分析结论；
- 2) 参数率定和模型验证过程说明应参照本规程第 5 章内容编制；
- 3) 最终率定结果应以表格形式列出模型最终选用的参数。

(5) 模拟工况章节应以表格形式给出所有模拟工况，并对每种工况构建的目的进行必要描述。

(6) 模拟结果分析章节应对每种工况的模拟结果进行分析，必要时需进行横向对比分析。

(7) 应用结论章节应针对不同模型工况的模拟结果给出明确的应用结论。对已有方案进行论证时，给出是否合理的结论；支撑规划、设计方案时，给出具体建议方案，包括排水防涝设施建议的规模、布局等。

7.2.3 模型说明文件应对参与模型计算的基础数据来源及引用加以说明，同时涵盖数据处理过程中的修改、增补记录，并做好清单索引，方便查询。项目应结合建模目的合理选取模型类型、确定模型参数，描述采用的模型方法理论及具体参数取值。每项模拟工况均应说明运行目的、运行参数（模拟历时、起止时间、计算步长等）以及模拟结果分析结论。

7.2.4 模型工程文件应作为附件提交给项目委托人，以便于后期的模型维护与升级，还应按照模型维护便利原则导出相应数据格式文件。

模型空间及属性数据主要包括模型拓扑信息及其属性表格；时间序列数据主要指随时间变化的数据，如降雨、水位和流量数据等；模型运行结果包括管渠状态评估图表、积水点分布图和统计表、管渠纵断面运行图等；其他模型文件包括背景底图、设施运行调度规则等。

7.2.5 模型数据记录是建模人员在模型构建和测试阶段使用的全部数据记录，应与模型工程文件一并提交给项目委托人。

系统原始数据记录应包含数据来源说明和原始数据附件。在原始数据有缺失或错误情况下，应结合建模数据需求及时进行补测修正，若无法及时补测则需通过合理假设或按规则推断等方法进行修改增补并需加以详细记录。修改增补数据需记录数据修改增补的原因以及依据。模型参数设置表用于记录各项模型参数的设置及其优化调整过程。时间序列数据主要指降雨、水位和流量等随时间变化的数据。

7.2.7 模型过程与结果数据主要指在模型参数率定、模型验证及模型工况分析过程中涉及的具体结果数据的分析图表。

附录 A 源头减排设施模型参数

A.0.1 源头减排设施通常以低影响开发设施（LID）为主，主要通过绿色屋顶、生物滞留设施、植草沟、透水铺装和调蓄设施等控制降雨期间的水量和水质，既可减缓市政排水管渠排水压力，又使雨水径流污染从源头得到有效控制。

径流峰值流量控制是源头减排设施建设的目的之一，一般对低重现期降雨事件（一般为 1 年一遇及以下）的峰值削减效果较好，对高重现期降雨事件，虽仍可起到一定的错峰、延峰作用，但其峰值削减幅度往往较低。为保障城市安全，排水防涝系统规划、设计相关模型方法和参数选择应按本规程第 4.3 节有关规定执行。

A.0.3 根据美国国家环保署（EPA）编制的 SWMM 模型，对源头减排设施模型各单体模块及其结构组成进行了说明。

A.0.4 源头减排设施模型计算过程中，各结构层都按照水量平衡关系计算，其主要参数包括结构层的厚度，影响储水空间的孔隙率（植被容积、孔隙比），影响导水下渗性能的渗透率（导水率、渗透系数），影响径流形成的粗糙系数、坡度、流量系数和指数等。

以通州河畔丽景海绵改造项目为例，示例说明源头减排设施模型构建及分析计算过程。

（1）模型构建。

1) 汇水分区划分：将 LID 设施、普通绿地、部分建筑屋面和道路单独作为一个子汇水单元，即全流域只有 0 和 100%两种不透水比例（%Imperv）的汇水区类型。

2) LID 设施布局：分析制作 LID 设施分布图（图 17），识别下垫面特征，模型中 LID 设施布置与其一致。由图 17 可见，小区内规划实施的低影响措施有停车场透水铺装、人行道透水铺装、植草沟、生物滞留设施、渗渠等调蓄设施。

3) 管网模型构建：小区尺度下的管网不进行概化处理，根据排水管网的断面形状和类型、道路和设施排水情况布设管网节点。

根据上述原则，小区共划分为 15 个汇水单元，318 个子汇水单元，102 段管网，87 个节点，15 个出水口。汇水单元面积介于 $1458\text{m}^2 \sim 9845\text{m}^2$ ，同类型下垫面汇水单元面积分布较为均匀。小区模型构建如图 17 所示。

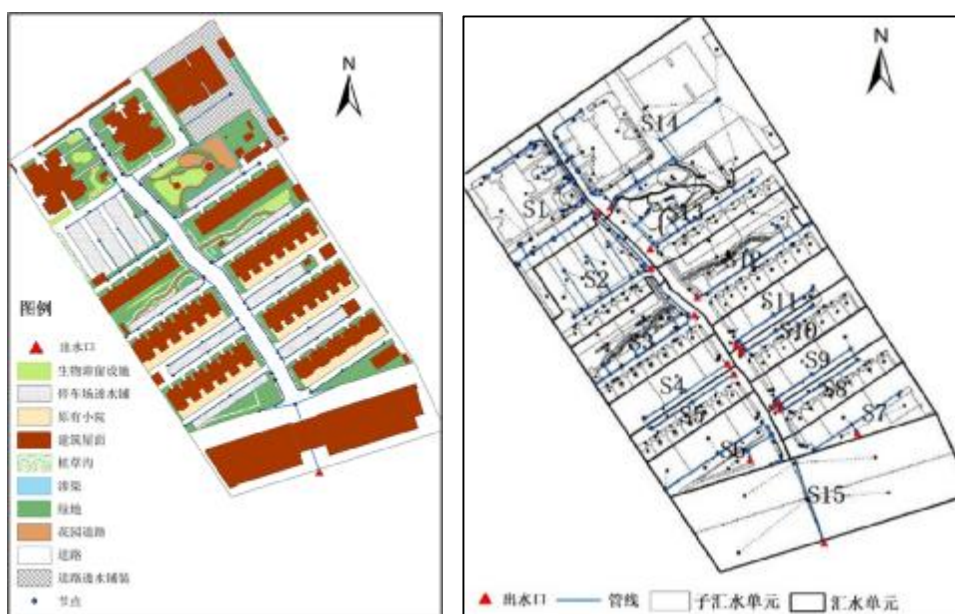


图 17 小区 LID 设施空间分布及小区模型构建图

(2) 参数取值及合理性分析。

LID 设施主要参数设置，见表 15。

表 15 LID 设施主要参数取值

设施类型	表面层/铺装层			土壤层			蓄水层		
	高度/厚度 (mm)	边坡坡度	渗透系数 (mm/h)	厚度 (m)	孔隙率	导水率 (mm/h)	厚度 (m)	孔隙率	渗透系数 (mm/h)
植草沟	200	3	—	—	—	—	—	—	—
生物滞留设施	300	3	—	200	0.5	80	200	0.5	80
透水铺装	80	—	360	—	—	—	300	0.5	360
渗渠	50	—	360	400	0.5	80	600	0.5	360

其他参数取值如下：不透水区填注量 (Dstore-Imperv) 为 2mm、透水区填挖量 (Dstore-perv) 为 10mm、最大下渗率为 80mm/h、最小下渗率为 10mm/h、下渗衰减系数为 $5h^{-1}$ 、土壤干燥时间为 7d、透水地表粗糙系数为 0.12、不透水地表粗糙率为 0.025、管网粗糙系数为 0.017。

由于缺少实测数据，基于综合径流系数法对模型参数进行合理性分析：根据本规程第 4.3 节条文说明中给出的绿地径流系数 0.15 和硬化下垫面径流系数 0.9，采用公式法[式 (9)]计算研究范围的雨量综合径流系数为 0.73，在研究区 2 年一遇 2h 的芝加哥设计降雨下模型模拟的雨量综合径流系数为 0.76，误差为 0.03，认为参数取值合理，可用于下一步研究。

$$y = \frac{\sum y_i f_i}{F} \quad (9)$$

式中：ψ——综合径流系数；

ψ_i——子汇水区径流系数；

f_i——子汇水区面积（m²）；

F——总汇水区面积（m²）。

（3）汇水单元的选择。

综合考虑用地类型的相似性，选择了 4 个不同下垫面特征的典型汇水单元（S1、S2、S3、S5）用于研究和分析，各汇水单元改造后下垫面用地类型见表 16。典型汇水单元模型构建结果如图 18 所示。

表 16 典型汇水单元改造后下垫面属性

汇水单元	下垫面类型比例（%）						总面积（m ² ）	透水区域比例（%）	LID 设施比例（%）
	透水区域					不透水区域			
	普通绿地	生物滞留设施	植草沟	透水铺装	渗渠				
S1	15.9	7.0	5.2	7.0	0	65.0	4311	35	19.2
S2	12.1	0	0	40.4	0.6	46.9	3247	53	41
S3	37.0	1.9	6.3	10.5	0.3	44.0	3696	56	19
S5	15.4	0	0	16.3	0	68.3	1465	32	16.3

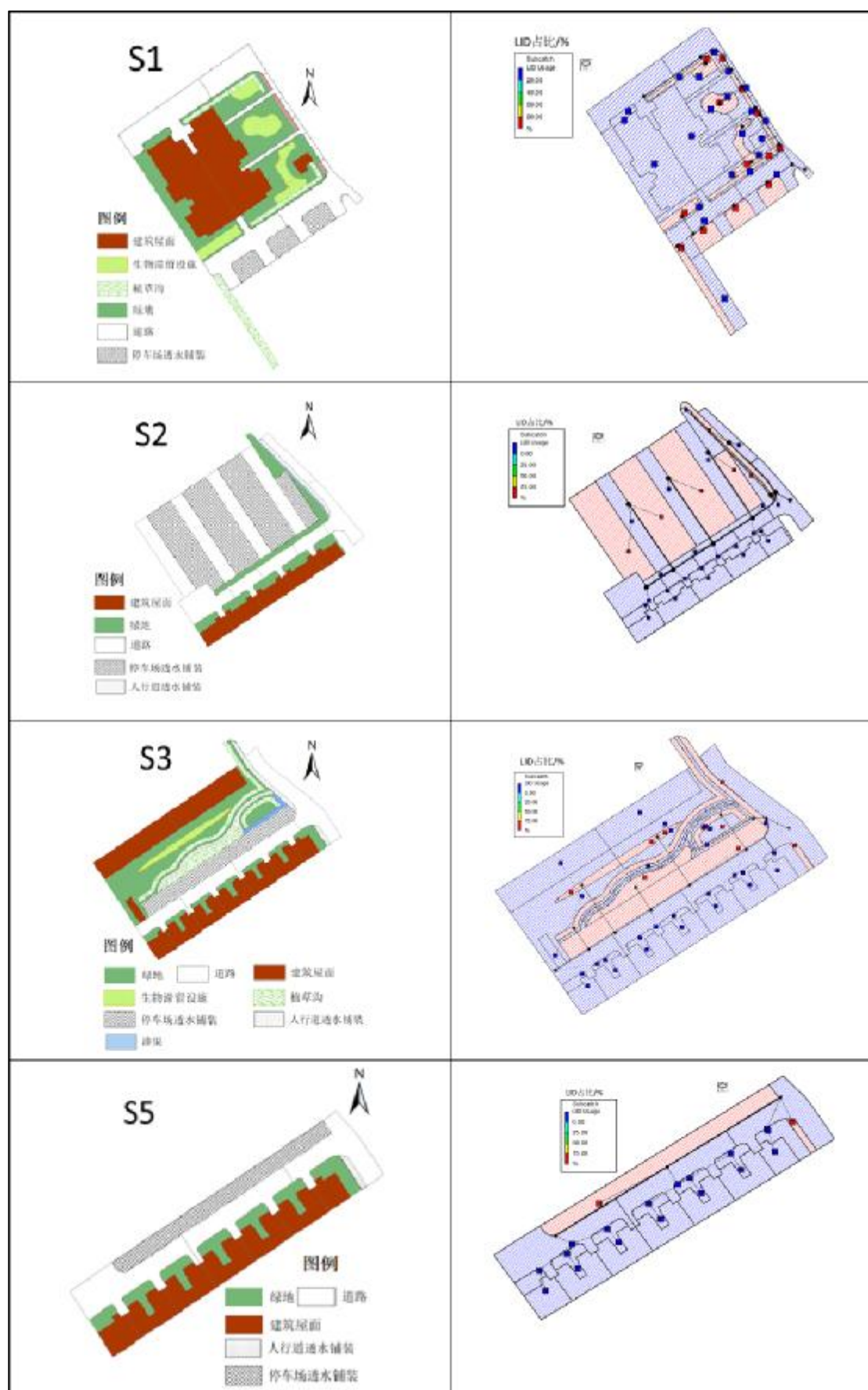


图 18 典型汇水单元模型构建结果示意图

(4) 模拟分析。

输入不同重现期下的降雨进行模拟。模拟完成后，可以从径流系数变化、径流消减效果、各排水单元径流贡献等方面进行分析，如图 19 和图 20 所示。

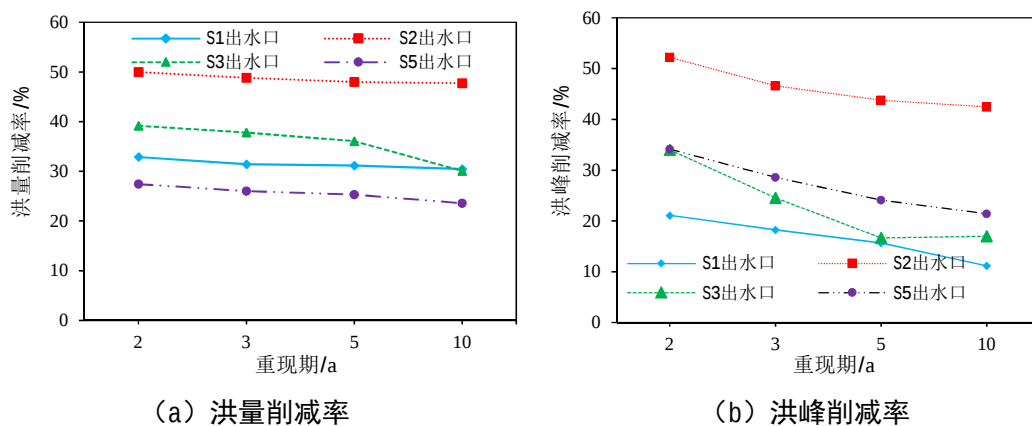


图 19 不同重现期下典型汇水单元径流总量削减率和径流峰值削减率

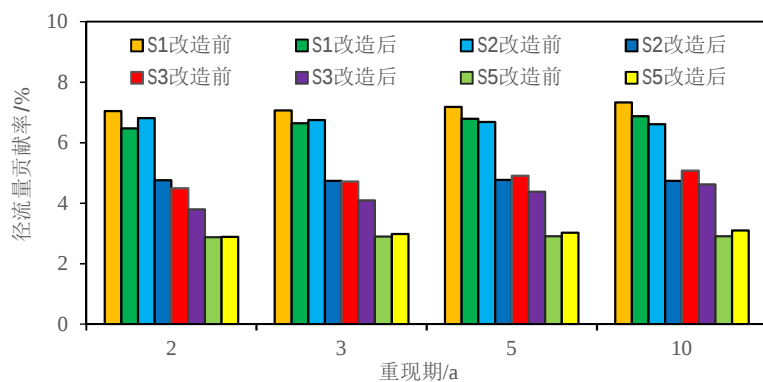


图 20 典型汇水单元径流量贡献率

附录 B 北京市设计降雨计算方法及附表

B.0.1 北京市长、短历时设计雨型是依据北京市典型实测降雨资料采用同频率放大的方法分析计算得出。

根据现行北京市地方标准《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》DB11/T 969 的规定，北京市共分为 2 个暴雨分区（如图 21 所示）。以镇级行政区作为划分基础单元，房山区的史家营乡、大安山乡、佛子庄乡，门头沟区的清水镇、斋堂镇、雁翅镇、妙峰山镇、大台街道、王平镇、潭柘寺镇，昌平区的流村镇、阳坊镇、马池口镇、南口镇，海淀区的上庄镇，延庆区的八达岭镇、康庄镇、大榆树镇、井庄镇、延庆镇、沈家营镇、张山营镇、旧县镇、永宁镇、香营乡、刘斌堡乡、四海镇、大庄科乡、千家店镇、珍珠泉乡，怀柔区的宝山镇、九渡河镇、汤河口镇、长哨营满族乡、喇叭沟门满族乡等乡镇划为第 I 区；其余地区划为第 II 区。



图 21 北京市现行 2 个暴雨分区示意图

I 区采用延庆站 1965 年～2014 年降雨资料进行推求。II 区采用观象台站 1941 年～2014 年降雨资料进行推求。

B.0.3 以暴雨强度公式推求 II 区 5 年一遇的 180min 雨量过程为例，首先计算出 5min、15min、30min、45min、60min、90min、120min、150min、180min 各时段的最大降雨量分别为 12.2mm、26.6mm、39.3mm、47.8mm、54.3mm、64.1mm、71.7mm、77.9mm、83.3mm；再从本规程附录 B 表 B.0.2-2 中查得 15min 暴雨分配过程出现在第 3、4、5 时段，将最大 5min 降雨放置在第 4 时段，最大 15min 雨量减去最大 5min 雨量得到第 3、5 时段的总降雨量为 14.4mm，按本规程附录 B 表 B.0.2-2 中给出的 46.67%、53.33%分配比例，将该总降雨量 14.4mm 分配到第 3 时段和第 5 时段，最后得到 15min 雨型分配过程为 6.7mm、12.2mm、7.7mm；依次类推，可算得 5 年一遇 180min 雨量分配过程。

B.0.5 以水文手册法推求中心城核心区 50 年一遇的 1440min 雨量过程为例，

说明不同重现期 24h 设计降雨过程推求步骤。

首先根据《北京市水文手册 第一分册 暴雨图集》，从 50 年一遇最大 10min 雨量等值线图中采用等值线内插法读出最大 10min 降雨量为 37.0mm，按照此方法从图集中读出最大 30min 降雨量为 68.0mm，最大 60min 降雨量为 115.0mm，最大 360min 降雨量为 205.0mm，最大 1440min (24h) 降雨量为 340.0mm。

另外，根据多年实际资料统计分析，认为最大 5min 降雨量占最大 10min 降雨量的 62%，因此求得最大 5min 降雨量为 23.0mm。此外，最大 15min 降雨量为 46.0mm、最大 45min 降雨量为 92.0mm、最大 90min 降雨量为 131.0mm、最大 120min 降雨量为 144.0mm、最大 150min 降雨量为 155.0mm、最大 180min 降雨量为 164.0mm、最大 240min 降雨量为 180.0mm、最大 720min 降雨量为 264.0mm，其数值是根据下式 (10) 计算求得。

$$H_t = H_{bp} \cdot \left(\frac{t}{t_b}\right)^{1-n_{ab}} \quad (10)$$

式中： H_t ——某一历时设计雨量 (mm)；

H_{bp} ——相邻二个标准历时后一历时的设计雨量 (mm)。

n_{ab} ——相邻二个标准历时 t_a (前) 和 t_b (后) 的设计雨量 H_a 和 H_b 区间的暴雨递减指数。暴雨递减指数 n_{ab} 值由式 (11) ~ 式 (14) 计算确定：

$$n_1 = 1 + 2.096 \lg \left(\frac{H_{10P}}{H_{30P}} \right) \quad (11)$$

$$n_2 = 1 + 3.322 \lg \left(\frac{H_{30P}}{H_{60P}} \right) \quad (12)$$

$$n_3 = 1 + 1.285 \lg \left(\frac{H_{60P}}{H_{360P}} \right) \quad (13)$$

$$n_4 = 1 + 1.661 \lg \left(\frac{H_{360P}}{H_{1440P}} \right) \quad (14)$$

式中： n_1 ——10min~30min 递减指数；

n_2 ——30min~60min 递减指数；

n_3 ——60min~360min 递减指数；

n_4 ——360min~1440min 递减指数。

各标准历时相邻二个时段之间，任意历时 t 设计雨量计算，可按下列式 (15) ~ 式 (18) 求得：

$$H_t = H_{30} \cdot \left(\frac{t}{30}\right)^{1-n_1} \quad (t=10\text{min} \sim 30\text{min}) \quad (15)$$

$$H_t = H_{60} \cdot \left(\frac{t}{60}\right)^{1-n_2} \quad (t=30\text{min} \sim 60\text{min}) \quad (16)$$

$$H_{tp} = H_{360} \cdot \left(\frac{t}{360}\right)^{1-n_3} \quad (t=60\text{min} \sim 360\text{min}) \quad (17)$$

$$H_{tp} = H_{1440} \cdot \left(\frac{t}{1440}\right)^{1-n_4} \quad (t=360\text{min} \sim 1440\text{min}) \quad (18)$$

根据上述方法求得的 50 年一遇最大 5min、最大 15min 降雨量分别为 23.0mm、46.0mm；再从本规程附录 B 表 B.0.4-2 中查得 15min 暴雨分配过程出现在第 203、204、205 时段，将最大 5min 降雨放置在第 204 时段，最大 15min 雨量减去最大 5min 雨量得到第 203、205 时段的总降雨量 23.0mm，按本规程附录 B 表 B.0.4-2 中给出的 46.67%、53.33% 分配比例，将该总降雨量 23.0mm 分配到第 203 时段和第 205 时段，最后得到 15min 雨型分配过程为 10.7mm、23.0mm、12.3mm。依次类推，可算得 50 年一遇 1440min 雨量分配过程。

本规程附录 B 表 B.0.5 中的不同地区设计降雨量大小为根据现行《北京市水文手册 第一分册 暴雨图集》查算的区域中心位置处的点雨量数值，当研究区域的面积大于 50km² 时，宜考虑点面折减系数的影响，具体点面折减系数可参照本规程条文说明部分第 4 章表 2 选取。