

Urban Stormwater Control Engineering and Recovery Technology

城市雨水控制工程 与资源化利用

季民 黎荣 刘洪波 郭纯园(美国) 等编著



化学工业出版社

Urban Stormwater Control Engineering and Recovery Technology

城市雨水控制工程 与资源化利用

季民 黎荣 刘洪波 郭纯园(美国) 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《城市雨水控制工程与资源化利用》基于发展城市绿色基础设施的需求，阐述了雨水排水控制工程的新设计理念和设计方法。内容主要包括城市绿色雨水控制和资源化利用的新理念、低影响开发、海绵城市建设、雨水资源化利用的新技术和城市降雨水文学基础知识。既简单介绍了传统的雨水排水工程设计方法，也重点介绍了利用数学模型设计雨水排水工程的新方法。对低影响开发和海绵城市建设的主要技术，例如滞留池技术进行了重点介绍，同时也对大暴雨情况下城市街道的排水能力设计方法做了阐述。

《城市雨水控制工程与资源化利用》不仅适合从事城市雨水工程的规划、设计和管理人员参考，也可供高等院校给排水工程、环境科学、环境工程等相关专业的师生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

城市雨水控制工程与资源化利用/季民等编著. —北京:
化学工业出版社, 2017. 1
ISBN 978-7-122-28767-0

I. ①城… II. ①季… III. ①城市-雨水资源-水资源
利用-研究 IV. ①TV213. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 319369 号

责任编辑: 卢萌萌 徐 娟	文字编辑: 汲永臻
责任校对: 王素芹	装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 13³/₄ 字数 327 千字 2017 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

FOREWORD 前言

随着城市化快速发展以及极端气候状况的频繁出现，城市内涝危害已经成为世界上许多城市亟待解决的严峻问题。一方面，城市的大量降水得不到有效利用，使得宝贵的自然资源浪费；另一方面，暴雨来袭时，城市雨水系统又无法及时有效地缓解内涝，造成巨大的经济损失。

城市雨水控制工程及雨水资源化利用是一项复杂艰巨的系统工程，是落实生态文明建设的重要举措，也是实现修复城市水生态、改善城市水环境、提高城市水安全等多重目标的有效手段。近年来由于城市内涝频繁发生，我国对城市雨水控制及雨水资源化利用工程建设高度重视。2013 年国务院印发《关于加强城市基础设施建设的意见》，要求加强城市排水防涝防洪设施建设，解决城市积水内涝问题，用 10 年左右时间建成较完善的城市排水防涝、防洪工程体系。2014 年住房和城乡建设部颁布《海绵城市建设技术指南》，提倡推广和应用低影响开发模式，加强雨水径流源头渗透减量和污染控制，建设生态排水设施，缓解城市内涝。在《室外排水设计规范 GB 50014》(2016) 修订稿中，补充规定推进海绵城市建设、提高超大城市的雨水管渠设计重现期和内涝防治设计重现期的标准等条文。这一切都体现了国家在政策法规方面对城市雨水控制工程建设的重视，为城市雨水控制工程绿色发展道路指明了方向。本书基于建设城市绿色雨水基础设施的理念，针对我国国情，就城市绿色雨水控制工程设计、雨水资源利用相关理论、模型应用、设计计算及工程案例进行系统阐述。

城市雨水工程方面已有多本教材和专著，本书不求全面，但力求有一定新意。书中重点介绍：城市绿色雨水控制工程的概念；暴雨强度公式的年最大值法编制方法；利用数学模型设计雨水管渠的方法，压力流雨水管道计算方法；利用道路排除大雨水的概念及道路的排水能力分析计算；不同类型雨水口的收水能力水力学计算方法；海绵城市建设中的滞渗设施及雨水处理与利用技术，重点论述雨水滞留池和生物滞留池的设计方法；城市内涝防治系统建设理论与设计要求；最后，结合编著者近年承担的科研课题，介绍了城市雨洪控制和合流制系统溢流控制的数学模拟案例。

本书可作为环境工程和市政工程专业本科生、研究生的教材，也可作为相关工程设计人员的参考书籍。

全书由天津大学季民教授、美国丹佛卡罗拉多大学郭纯园教授(James, C Y Guo) 统稿，天津大学刘洪波、尤学一、王芬，天津城建设计院黎荣参与编著。季民教授从事城市排水工程教学科研 35 年，具有深厚的理论基础和丰富的工程经验。郭纯园教授是美国丹佛卡罗拉多大学土木工程系水文与水力学教授，他在低影响开发、城市水文学和暴雨径流模拟、城市洪涝防治等方面具有很高的学术造诣和工程咨询经验，取得的许多研究成果被美国多个州市政府采纳和推广。编写工作具体分工为：季民编写第 1 章、第 2 章、第 7 章，刘洪波编写第 3 章，黎荣编写第 4 章，郭纯园编写第 5 章，王芬编写第 6 章，尤学一编写第 8 章、第 9 章。研究生王越参加了部分章节编写工作并负责全书的文字校核，研究生翟思媛、张志成、张迦北、刘亚飞和王真真对本书的文字、图片整理付出了辛苦的劳动。

感谢国家水专项“海河干流水环境质量改善关键技术与综合示范(2014ZX07203-009)”对本书出版的资金支持。

面对雨水控制工程技术的快速发展，本书编著人员力求交出一份满意的答卷，但鉴于编著者水平有限，本书疏漏和不当之处在所难免，欢迎广大同行批评、指正。

编著者
2016 年 9 月

第 1 章 概论 /001

- 1.1 雨洪灾害与绿色雨水控制工程 / 001
 - 1.1.1 城市雨洪问题的严峻现状 / 001
 - 1.1.2 绿色雨水控制工程的概念 / 003
 - 1.2 城市绿色雨水管理理念与方法的发展 / 003
 - 1.2.1 最佳管理措施(BMPs) / 004
 - 1.2.2 可持续排水系统(SUDS) / 004
 - 1.2.3 水敏感城市设计(WSUD) / 004
 - 1.2.4 低影响开发(LID) / 004
 - 1.2.5 海绵城市建设 / 006
 - 1.3 国内外雨水资源化利用与控制的发展 / 007
 - 1.3.1 国外雨水资源化利用与控制的发展情况 / 007
 - 1.3.2 我国雨水资源化利用与控制的发展情况 / 010
 - 1.4 城市绿色雨洪控制系统规划建设 / 011
 - 1.4.1 建设城市绿色雨洪控制系统的原则 / 011
 - 1.4.2 城市雨水减排、控污与防洪排涝策略 / 012
 - 1.4.3 城市雨洪控制系统规划的任务和内容 / 013
- 思考题 / 015

第 2 章 降雨的水文学基础及暴雨径流量计算 /016

- 2.1 降雨水文学基础 / 016
 - 2.1.1 降雨要素 / 016
 - 2.1.2 降雨特征线 / 017
 - 2.1.3 暴雨强度的频率和重现期 / 020
 - 2.2 暴雨强度公式 / 021
 - 2.2.1 暴雨强度公式的编制方法 / 021
 - 2.2.2 暴雨强度公式编制案例 / 023
 - 2.3 暴雨径流过程分析及主要参数 / 030
 - 2.3.1 产流和汇流过程 / 030
 - 2.3.2 径流系数的确定 / 031
 - 2.3.3 设计重现期的确定 / 032
 - 2.3.4 暴雨径流计算的常用方法简介 / 033
- 思考题 / 035

第 3 章 雨水管渠系统设计 /036

- 3.1 雨水管渠系统设计流量的确定 / 036
 - 3.1.1 数学模型法 / 036
 - 3.1.2 暴雨洪水管理模型(SWMM) 原理 / 043
 - 3.2 雨水管渠的设计与计算 / 046
 - 3.2.1 雨水管渠系统平面布置特点 / 046
 - 3.2.2 雨水管渠系统设计规定 / 048
 - 3.2.3 雨水管渠水力计算方法 / 049
 - 3.2.4 雨水管渠系统的设计步骤与计算实例 / 051
 - 3.3 压力流雨水管道系统的设计 / 067
 - 3.4 立交排水 / 073
 - 3.4.1 立交排水的特点 / 073
 - 3.4.2 立交排水的形式 / 074
- 思考题 / 076
- 习题 / 076

第 4 章 道路排水能力计算与雨水口设计 /078

- 4.1 城市道路设计中一般规定 / 078
 - 4.1.1 城市道路功能 / 078
 - 4.1.2 城市竖向规划设计 / 078
 - 4.1.3 城市道路分类 / 078
 - 4.1.4 城市道路横、纵断面 / 079
 - 4.1.5 城市道路排水及低影响开发设施 / 079
- 4.2 城市道路路面雨水输水能力计算 / 080
 - 4.2.1 路面雨水输水水力学 / 080
 - 4.2.2 水流扩散宽度与便道高度 / 081
 - 4.2.3 可允许的 vh 乘积值 / 081
 - 4.2.4 案例 / 083
 - 4.2.5 城市道路路面雨水输水分析 / 084

4.3	城市道路路面雨水储水能力计算 / 084	4.4.3	雨水口泄水能力 / 090
4.3.1	道路储水量计算 / 084	4.4.4	平算式雨水口水力学 / 091
4.3.2	案例 / 086	4.4.5	立式雨水口水力学 / 092
4.4	城市道路雨水口的设计 / 090	4.4.6	联合式雨水口水力学 / 093
4.4.1	雨水口的形式及位置 / 090	4.4.7	案例 / 093
4.4.2	道路雨水口处流量的确定 / 090		习题 / 096

第5章 海绵城市建设中的滞渗设施 /097

5.1	雨水滞留概论 / 097	5.4.1	作用机理 / 119
5.1.1	城市发展对雨水滞留排放的需求 / 097	5.4.2	影响因素 / 120
5.1.2	雨水滞留的基本概念 / 098	5.4.3	设计要求 / 120
5.1.3	滞留池的类型 / 099	5.4.4	排水系统设计 / 121
5.2	滞留池容积计算方法 / 101	5.4.5	应用形式 / 122
5.2.1	体积估算法 / 101	5.4.6	建设案例 / 122
5.2.2	容积估算法 / 103	5.5	蓄渗池 / 124
5.3	滞留池设计 / 105	5.5.1	容积及面积计算 / 124
5.3.1	基本构造 / 105	5.5.2	渗水砂层及渗水碎石层设计 / 124
5.3.2	设计要求 / 106	5.5.3	计算案例 / 125
5.3.3	池体设计 / 107	5.6	透水铺装 / 125
5.3.4	出水口设计 / 109	5.7	其他渗流设施 / 128
5.3.5	验证滞留池的减洪量 / 116		习题 / 129
5.4	生物滞留池 / 119		

第6章 雨水污染控制与资源化利用 /130

6.1	雨水利用途径与污染削减方法 / 130	6.3.1	计算原则 / 142
6.1.1	雨水利用途径 / 130	6.3.2	计算公式 / 143
6.1.2	雨水污染物削减方法 / 130	6.3.3	以渗透为主要功能的设施规模计算 / 143
6.1.3	雨水处理及利用系统的设计原则 / 131	6.3.4	以调节为主要功能的设施规模计算 / 144
6.2	雨水处理与利用技术 / 132	6.4	雨水污染物控制与资源化利用设施维护 / 144
6.2.1	雨水湿地 / 132	6.5	雨水污染控制与资源化利用设施风险管理 / 145
6.2.2	绿色屋顶 / 134	6.6	雨水资源化利用实例 / 146
6.2.3	植草沟 / 135	6.6.1	北京奥运场区 / 146
6.2.4	塘系统 / 138	6.6.2	甘肃“121 雨水集流工程” / 147
6.2.5	下凹式绿地 / 140		思考题 / 148
6.2.6	其他技术 / 141		
6.2.7	组合系统 / 142		
6.3	雨水污染控制与资源化利用设施计算 / 142		

第7章 城市内涝防治 /149

7.1	我国城市内涝成因分析 / 149	7.2.2	城市内涝防治系统中低影响开发设施的控制目标 / 152
7.1.1	城市内涝与排涝 / 149	7.2.3	城市内涝防治系统规划设计原则 / 153
7.1.2	我国城市内涝灾害的主要成因 / 149	7.2.4	城市内涝防治设计标准 / 154
7.2	城市内涝防治系统 / 152	7.3	城市排涝系统设计 / 155
7.2.1	城市内涝防治系统组成 / 152		

7.3.1	滞洪排涝系统建设原则与布局 / 155	7.3.6	内涝排涝河渠及调蓄设施布局 / 158
7.3.2	自排与抽排 / 155	7.3.7	排涝河道的设计要求 / 159
7.3.3	城市内涝排涝水文分析 / 156	7.3.8	排涝泵站的设计要求 / 160
7.3.4	城市内涝排涝分区的确定 / 157	7.3.9	排涝泵站的布置 / 160
7.3.5	城市排涝设计水量计算方法 / 157		思考题 / 163

第 8 章 城市雨水系统数学模拟与内涝分析案例 /164

8.1	城市排水系统模型原理 / 164	8.4.1	不同重现期下积水区的分布 / 169
8.1.1	旱流污水模块 / 164	8.4.2	管网总溢流量 / 174
8.1.2	二维洪涝淹没模型 / 164	8.4.3	节点溢流 / 175
8.1.3	河道模型 / 165	8.4.4	排水口流量 / 177
8.2	排水系统模型建立与降雨设计 / 165	8.5	LID 工程措施效果模拟 / 178
8.2.1	排水模拟资料需求 / 165	8.5.1	LID 措施简介 / 178
8.2.2	GIS 建模过程 / 165	8.5.2	参数选取 / 179
8.2.3	排水系统模型 / 166	8.5.3	溢流消减效果分析 / 179
8.3	降雨事件 / 168		思考题 / 180
8.4	积水区模拟结果 / 169		

第 9 章 初期雨水污染和合流制排水系统溢流污染模拟分析案例 /181

9.1	概述 / 181	9.6	管网溢流 / 189
9.2	传输过程水质浓度方程 / 182	9.6.1	不同降雨重现期下管网溢流 / 189
9.3	排水系统模型建立 / 182	9.6.2	雨型对管网溢流的影响 / 191
9.3.1	汇水区设置 / 182	9.6.3	连续性降雨溢流 / 192
9.3.2	GIS 建模过程 / 183	9.7	合流制排水系统初期雨水调蓄与污染控制 / 194
9.3.3	排水管网模型 / 183	9.7.1	初期雨水调蓄与污染控制模式 / 194
9.3.4	模型参数确定 / 183	9.7.2	降雨径流源头控制 / 194
9.3.5	降雨事件 / 184	9.7.3	管网中途控制 / 197
9.4	初期雨水污染特性与负荷计算 / 185	9.7.4	末端蓄排 / 200
9.4.1	雨水径流污染 / 185	9.7.5	河湖调蓄 / 201
9.4.2	地表产污量分析 / 186		思考题 / 202
9.4.3	初期雨水溢流对接纳水体的污染 / 188		
9.5	旱季无降雨管网运行 / 189		

参考文献 /203

第 1 章

概 论

1.1 雨洪灾害与绿色雨水控制工程

1.1.1 城市雨洪问题的严峻现状

近年来我国 60% 以上的城市曾发生过严重的雨洪内涝灾害，给社会和人民生活带来极大的影响，造成巨大的财产损失及安全危险。例如，2012 年 7 月 21 日北京市及周边地区遭遇了 60 年来最强暴雨及洪涝灾害，强降雨一直持续近 16 个小时，全市平均降雨量 170mm，城区平均降雨量 215mm，为新中国成立以来最大一次降雨过程；房山、平谷和顺义平均降雨量均在 200mm 以上，降雨量在 100mm 以上的面积占全市总面积的 86% 以上。此次特大暴雨造成 79 人死亡，160.2 万人受灾；受灾房屋倒塌 10660 间，直接经济损失达到 116.4 亿元。对水利、交通、电力造成的危害如下。

① 水利设施受损严重，其中，防洪坝受损 200km，农田水利设施损毁 300 处，小流域损毁 700km²，堤防受损 2000m，塘坝损毁 20 座，机井受损 500 眼。此外，暴雨损毁供水管线 200km、污水设施 60 处、污水管线 100km。

② 城市交通瘫痪，城区 95 处道路因积水断路(图 1-1)；航班大面积延误，首都机场国内进出港航班取消 229 班，延误 246 班，国际进出港取消 14 班、延误 26 班，造成近八万乘客滞留在首都机场；地铁机场线部分停运，6 号线金台路工地发生路面塌陷；铁路交通受强降雨影响，造成北京铁路局管内京原线、丰沙线、S2 线、京承线、京通线部分旅客列车晚点。

③ 电力通信设施遭到严重破坏，1 条 110kV 电站水淹停运，25 条 10kV 架空线路发生永久性故障，损毁电力设施 450km 及电信通信设施 500km。

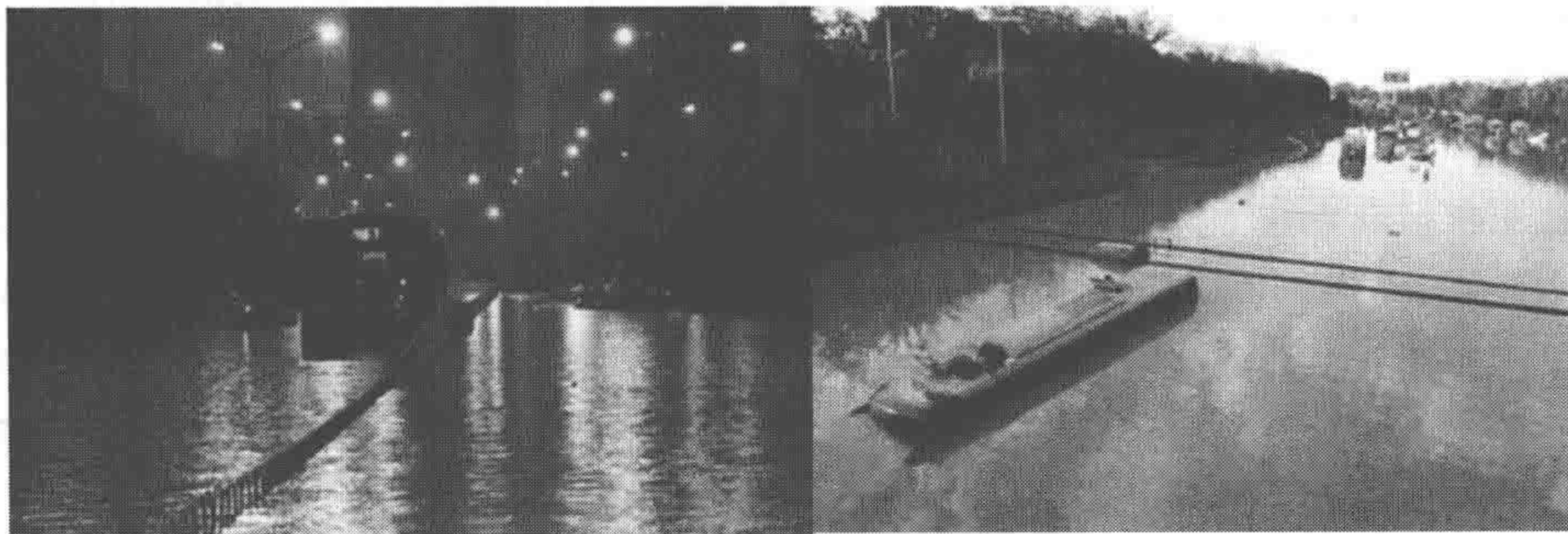


图 1-1 暴雨造成北京市道路严重积水

2010 年 5 月 7 日广州市遭遇特大暴雨，全市平均降雨量 107.7mm，市区平均降雨量 128.45mm，中心城区和北部地区均超过特大暴雨标准，其中五山雨量站 1 小时最大雨量和 3 小时连续降雨量分别为 99.1mm 和 199.5mm，超过广州市历史上 1 小时最大降雨量的 2005 年 (90.5mm) 和 3 小时最强降雨的 1975 年 (141.5mm)。

该次特大暴雨影响了广州市越秀、海珠、荔湾、天河、白云、黄埔、花都和萝岗八个区，由于暴雨强度超出了城市排水能力引发洪涝次生灾害，造成 6 人死亡，全市经济损失约 5.438 亿元。全市 102 个镇(街) 受水浸，109 间房屋倒塌，25.68 万亩农田受淹，受灾人口达到 32166 人。中心城区 118 处地段出现内涝水浸，其中 44 处水浸情况较为严重，多条主干道路积水超过 2m，造成了局部交通堵塞(图 1-2)。

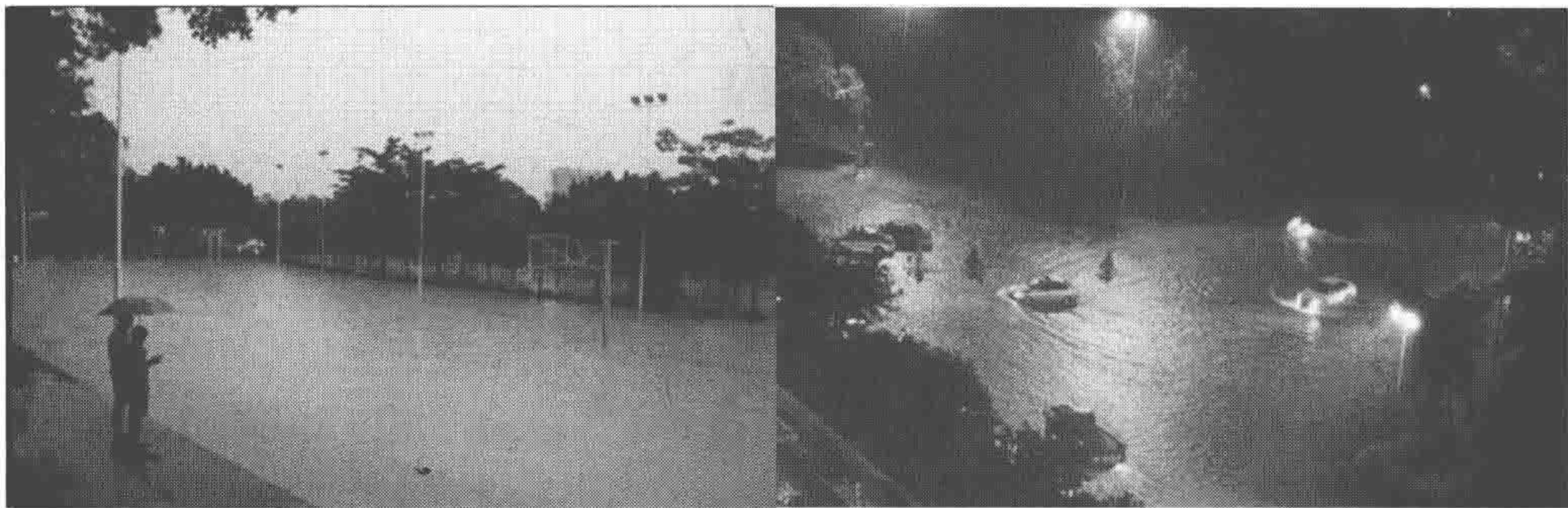


图 1-2 暴雨引发广州城市内涝

2008 年 8 月 25 日上海市遭遇强暴雨，全市最高的每小时降雨量超过 117mm，达到上海徐家汇气象观测站 130 多年以来的最高纪录。此次暴雨发生在交通高峰时段，给地面交通带来严重影响，几乎已经瘫痪：①造成上海长途汽车班次(驶入和驶出) 大面积延误，延误时间近两个小时；②上海地铁多条线路也因暴雨影响正常运营，6 号线发生供电设备故障、2 号线发生信号设备故障，由于正值下班晚高峰造成车站内乘客大量积压，换乘车站采取限流措施；③上海进出港航班出现不同程度的延误，出港航班延误 30 余班。

洪涝灾害是世界上大部分城市面临的重大安全问题。我国城市洪涝灾害发生的主要原因有：①受气候异常变化的影响，城市遭受设计年限外的特大暴雨袭击，例如 50 年一遇甚至百年一遇的特大暴雨；②城市雨水排放设施建设落后，缺乏城市内涝防治宏观规划，雨水系统设施建设标准低、管理和控制措施不完善；③在雨水系统规划设计和建设中，只强调排放或快速排放，未注意雨水渗透、储蓄、调节和利用。近年来，我国城市处于高速扩张期，在城市快速发展建设进程中，原来的农田、绿地、坑塘变成了街道、建筑和道路，使得城市区域内不透水面积大幅增加，改变了水环境的自然循环过程。当雨水落在未开发的土地上时，雨水大部分可下渗，形成的地表径流量较小。然而当雨水落在城市的屋顶、街道和停车场等非渗透性下垫面时，雨水渗透量很有限，大部分雨水形成地表径流，加重了排水和河道行洪负担，造成汛期地面积水和局部洪灾。在不重视雨水渗透、调蓄的情况下，必然导致城市雨洪径流量激增，而低标准雨水管渠系统根本无法承受大暴雨袭击，从而造成内涝问题的频频发生。城市繁华的街区和道路路面污染物较多，有的地方雨水管道与污水管道混接，有的地方忽视雨水管渠的维护清理，甚至雨水口成为街道清扫和污水倾倒的排污口，携带了大量垃圾、污泥、细菌、重金属及各种污染物的雨水成为城市水体的重要污染源。城市雨洪内涝问题也会威胁到现有公共基础设施的安全性，其高流动性会侵蚀和淹没城市街道，使得城市居民生活和社会正常秩序受到影响，严重时会造成巨大的洪涝灾害。

我国政府对频繁发生的城市内涝问题越来越重视，2013 年国务院印发《关于加强城市基础设施建设的意见》，意见要求加强城市排水防涝防洪设施建设，解决城市积水内涝问题，用 10 年左右时间建成较完善的城市排水防涝、防洪工程体系。2014 年住房和城乡建设部颁布《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》，该指南旨在指导城市化建设中推广和应用低影响开发模式，加强雨水径流源头渗透减量和污染控制，建设生态排水设施，缓解城市内涝。

面对日益严重的城市内涝和水资源短缺问题，我们需要转变传统的以快速排放为主要目的的雨水排水工程设计和管理的观念，规划、设计和建设适应城市发展、洪涝控制、雨水资源化利用、城市水生态保护的绿色雨水控制工程。

1.1.2 绿色雨水控制工程的概念

传统的雨水排放工程一般既不考虑雨水径流在渗透、利用、排放和生态环境之间有机的联系，也与城市防洪系统设计存在不协调的问题。在实行雨污分流的排水体制下，雨水径流由雨水管道收集后，就近排入水体，设计追求雨水快捷排放，要求雨水管渠设计应适应汇水面积的径流排放。在雨污合流排水体制下，旱时污水流入污水厂，雨天时混合的雨污水溢流到城市河流，造成城市河流汛期型突发污染。在许多城市中，当污水点源排放得到有效控制后，含有大量污染物的暴雨径流成为城市水体的主要污染源，严重时会造成阶段性黑臭河道。

现代绿色雨水控制工程革新了雨水排水的观念，从单纯的雨水排放向雨洪管理控制、雨洪资源科学利用转变；从追求雨水快排转变为控制雨水慢排，从要求雨水管渠设计适应汇水面积径流，到控制汇水面积径流使其适应雨水管渠的排水能力。绿色雨水控制工程基于源头控制、传输汇流和末端控制三个方面，整合城市景观、水文、水循环、人类活动、资源利用、生态植物等多因素，构建以自然的绿色生态网络为基础的排水系统。通过充分利用自然条件并应用人工模拟自然生态方式，采取一系列技术措施，控制雨水径流量和雨水径流污染、减少洪涝灾害、科学地进行雨水资源化利用、保护城市水环境和促进城市健康水循环。城市绿色雨水控制工程的发展和建设会给城市生态化建设和水环境改善带来巨大效益。

(1) 绿色雨水控制工程设计源头减排设施

通过渗透、滞留、调蓄等措施，削减暴雨峰值流量，延迟流量峰值时间，提高管网排水适应能力，有利于城市内涝的控制。

(2) 绿色雨水控制工程注重雨水的排放和利用相结合

我国大部分城市为缺水性城市，雨水渗透可补充地下水。经过净化的雨水，既可减轻地表径流对城市水体的污染，还可作为城市景观水体、生活杂用水的补充水源，达到节约新鲜水源的目的。

(3) 通过收集、渗透、净化等步骤，消减雨水污染物

将雨水进行净化与利用，补充地下水和地表水，维持自然的水循环系统，改善水环境，有利于维持城市水生态系统的平衡。

1.2 城市绿色雨水管理理念与方法的发展

由于全球范围内水资源紧缺和暴雨洪水灾害频繁，近 20 年来美国、英国、澳大利亚、德国、日本、以色列、加拿大、意大利、法国、墨西哥、印度、土耳其、泰国、苏丹、也门等 40 多个

国家和地区在城市和农村开展了不同规模的雨洪利用研究，世界各国分别结合自身的特点提出了一系列的城市雨水径流管理的新理念和方法体系。

1.2.1 最佳管理措施（BMPs）

最佳管理措施(best management practices, 简称 BMPs) 的概念是美国在 1977 年《清洁水法》修正案中首次提出的，主要针对面源废水处理和工业排放有毒污染的控制。后在 1987 年《清洁水法》修正案和 2001 年《潮湿天气水质法案》中，进一步提出雨水最佳管理措施，其目标除了抑制暴雨地表径流洪峰流量外，还要增加水资源的利用和改善暴雨期间水质污染。BMPs 注重利用综合措施来解决水质、水量和生态等问题。雨水管理 BMPs 是指在一系列给定条件下，以最具成本效益的方式管理雨水径流流量和提高水质的技术、措施或结构控制。雨水最佳管理措施包括工程性措施和非工程性措施。工程性措施是一系列用于“缓解”暴雨影响的具体技术手段，诸如雨水池(塘)、雨水湿地、渗透设施、生物滞留和过滤设施等。非工程性措施则指各种管理措施，包括政策、法规、标准和公民教育等。BMPs 是多种可以提高雨水水质和雨水管理效益的实践的集合。

1.2.2 可持续排水系统（SUDS）

英国的可持续排水系统 SUDS(sustainable urban drainage systems) 旨在从排水系统上减少城市内涝发生的可能性，同时提高雨水等地表水的利用率兼顾减少河流污染，其除了具有功能上的优势外，花费的综合成本也将低于传统排水系统，实践表明最多可节约三分之二的费用。SUDS 遵循三大原则：排水渠道多样化，避免传统下水管道是唯一排水出口；排水设施兼顾过滤，减少污染物排入河道；尽可能重复利用降雨等地表水。

1.2.3 水敏感城市设计（WSUD）

水敏感城市设计 WSUD(water sensitive urban design) 是澳大利亚在 20 世纪 90 年代提出的处理地球、水和人类生活之间关系的规划和设计的新理念。WSUD 认为在城市水循环圈中的水都是一种资源，城市发展应将整个水循环作为一个整体，维持水循环的自然流畅。WSUD 通过在城市到场地的不同空间尺度上将城市规划和设计与供水、污水、雨水等设施结合起来，旨在将城市发展对水文环境的影响降到最小，使城市规划和城市水循环管理有机会一并达到最优化。WSUD 包括工程措施和非工程措施，强调最佳规划实践和最佳管理实践两者结合，应用的尺度从城市分区到街区乃至地块。

1.2.4 低影响开发（LID）

20 世纪 90 年代末，美国马里兰州的乔治王子县和美国西北地区的西雅图市、波特兰市共同提出一种暴雨管理技术——低影响开发(low impact development, 简称 LID)。加拿大和美国将 LID 定义为利用土地规划和工程设计方法来管理雨水径流，强调现场保护和利用原位自然特性保护水质。这种方法强调雨水进入管网前的小型水文控制，通过渗透、过滤、存储、蒸发等方式，尽量维持雨水汇流入管流量接近开发前状态。

LID 技术措施得到美国环境保护署(EPA) 的支持，将其作为实现清洁水法案目标的方法而推广，美国各地方、州和联邦机构在土地开发和公共工程项目实施 LID 方案，LID 技术在智能发展和绿色基础设施的土地利用总体规划中起到重要作用。目前已经开始进入系统化、法规化的

应用阶段，并形成了许多专门的用于雨水管理的规范和导则。

低影响开发(LID)与其他国家的一些雨水管理概念类似，包括英国的可持续城市排水系统(SUDS)、澳大利亚的水敏感城市设计(WSUD)、西雅图的自然排水系统以及华盛顿的原位雨水管理体系。其中英国对 LID 的定义有所不同，描述低影响开发(LID)是一种低负面环境影响开发途径，自 20 世纪 80 年代以来在开发者与英国规划局相互影响下引导形成独特的、适合当地的多样性开发途径，通常利用自然的、本地的和再生材料实现可负担得起的低碳住房，这些低影响开发途径可满足废物管理、能源、水和其他需求方面自给自足。

LID 的基本原理是通过分散的、小规模源头控制机制和技术措施来达到对暴雨产生的径流和污染的控制，从而使建设区域开发建设后尽量接近于开发前的自然水文循环状态。LID 是一种以生态系统为基础，从径流源头开始的暴雨管理方法，其技术思路可以概括为：用生态化的“源头控制”技术代替了传统的“终端处理”技术，尽量缩小和降低不透水面积，以维持开发前自然水文状态；提高城市雨水利用效率，从而减轻雨水引起的面源污染并缓解洪涝灾害，实现城市水健康循环；结合城市特点合理规划，协调好雨水控制利用与城市建设之间的关系，强化生态化、综合性的雨水控制与利用措施，从而实现开发区域和建设项目经济、社会及环境效益的整体优化。

(1) LID 遵循的原则

低影响开发模式是保存和重建自然景观特征，有效减少不透水性以创建功能性和吸引人的排水系统，将雨水作为一种资源而不是废弃物。主要有以下几条原则。

- ① 以现有的自然生态系统作为土地开发规划的综合框架 首先要考虑地区和流域范围的环境，明确项目目标和指标要求；其次在流域(或次流域)和邻里尺度范围内寻找雨水管理的可行性和局限性；明确和保护环境敏感型的场地资源。
- ② 专注于控制雨水径流 通过更新场地设计策略和使用可渗透铺装来最小化不可渗透铺装的面积；将绿色屋顶和雨水收集系统综合到建筑设计中，将屋顶雨水引入可渗透区域；保护现有树木和景观以保证更大面积的冠幅。
- ③ 从源头进行雨水控制管理 采用分散式的地块处理和雨水引流措施作为雨水管理主要方法的一部分；减小排水坡度、延长径流路径以及使径流面积最大化；通过开放式的排水来维持自然的径流路线。
- ④ 创造多功能的景观 将雨水管理设施综合到其他发展因素中以保护可开发的土地；使用可以净化水质、减弱径流峰值、促进渗透和提供水保护效益的设施；通过景观设计减少雨水径流和城市热岛效应并提升场地美学价值。
- ⑤ 教育与维护 在城市公共区域，提供充足的培训和资金来进行雨水管理技术措施的实践与维护，并教导人们如何将雨水管理技术措施应用于私有场地区域；达成合法的协议来保障长期实施与维护。

(2) LID 技术措施

LID 技术措施利用系统中的土壤、植物和微生物的物理、化学及生物作用进行污染物的去除，通过存储、渗滤以及地下水补给从源头上消减径流量。该过程无须大面积的土地资源即能将大部分雨水径流滞留在原地，既可补给地下水又可减轻雨水引发的城市洪涝灾害，同时还能结合景观设计对雨水径流进行处理，从而控制面源污染，具有生态环境效益、社会效益和经济效益。LID 主要技术措施包括表面渗透、调蓄滞留、生物滞留、屋顶绿化、植被浅沟、雨水利用等。LID 技术体系如图 1-3 所示，基于 LID 模式的雨水管理措施见表 1-1。

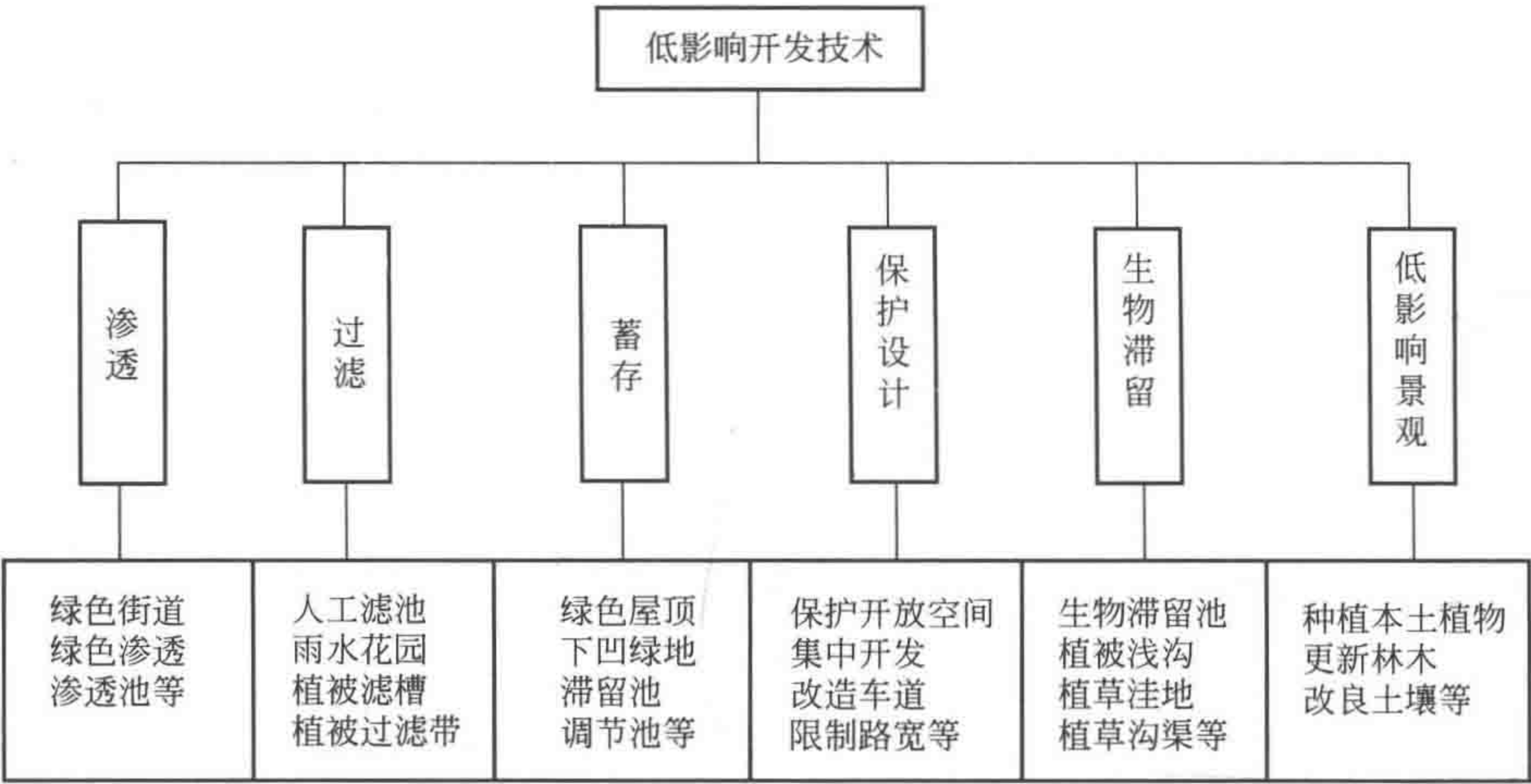


图 1-3 低影响开发技术体系

低影响开发单项设施往往同时具有多个功能，如生物滞留设施除渗透补充地下水外，还可削减峰值流量、净化雨水，实现径流总量、径流峰值和径流污染控制等多重目标。因此可根据应用目标灵活选用低影响开发设施及其组合系统，并对单项设施及其组合系统的设施选型和规模进行优化，以期取得更高的环境效益和经济效益。

表 1-1 基于 LID 模式的雨水管理措施

技术措施	特点
绿色屋顶	建筑屋顶的雨水减量、截污等
雨水花园	有景观功能的生物滞留设施，以渗透功能为主
雨水桶/罐	收集场地雨水直接利用
初期弃流装置	对场地内各源头汇水面的雨水径流截污、弃流
渗透铺装	对多种硬化汇水面径流进行源头减量、截污
滞留池	小型的街区雨水调节池，削减入管径流峰值
生物滞留池	具有生态净化和渗透功能的雨水滞留池
下凹式绿地	属于生物滞留设施，以渗透功能为主
生态景观水体	在小区内应用的集中调蓄措施，同时具有良好的景观和环境效益
滨水生态景观带	对硬化河道堤岸进行改造，具有截污、净化和景观等多种功能
生态走廊生态公园	多种技术措施的综合应用，兼具景观、环境、生态、经济和社会等多种效益
小型雨水湿地	针对小区域的雨水集中净化的措施
绿色街道/公路	渗透铺装、下凹式绿地、植被浅沟等措施的综合应用，社区街道和城市公路的设计与改造
植被浅沟	兼具径流输送、净化和渗透等功能
绿色停车场	是渗透铺装、雨水花园、下凹式绿地等措施的组合应用
大中型雨水塘/湿地	对较大范围内的雨水径流集中调蓄、净化
生态景观水体	小区内应用的集中调蓄措施，具有良好的景观和环境效益

1.2.5 海绵城市建设

我国城建住房部 2014 年发布了《海绵城市建设技术指南》，海绵城市建设由习近平总书记倡导，是我国推广实施绿色雨水控制工程建设、进行雨水资源化利用的重要举措。海绵城市的理念起源于欧洲，是指城市能够像海绵一样，在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的“弹性”，下雨时吸水、蓄水、渗水、净水，需要时将蓄存的水“释放”并加以利用，其特征可归结为

“渗、滞、蓄、净、用、排”六个字。海绵城市建设应遵循生态优先等原则，将自然途径与人工措施相结合，在确保城市安全排水防涝的前提下，最大限度地实现雨水在城市区域的积存、渗透和净化，促进雨水资源的利用和生态环境保护。海绵城市建设统筹低影响开发雨水系统、城市雨水管渠系统及超标雨水径流排放系统，并考虑其复杂性和长期性。海绵城市建设理念的提出，标志着我国正向着实现控制洪涝—雨水利用—美化环境—增值地产—改善生态等多重目标的城市绿色雨水控制工程的方向努力发展。

海绵城市建设的基本原则是规划引领、生态优先、安全为重、因地制宜、统筹建设。规划引领是城市各层级、各相关专业规划以及后续的建设程序中，应落实海绵城市建设、低影响开发雨水系统构建的内容，先规划后建设，体现规划的科学性和权威性，发挥规划的控制和引领作用。生态优先是城市规划中应科学划定蓝线和绿线。城市开发建设应保护河流、湖泊、湿地、坑塘、沟渠等水生态敏感区，优先利用自然排水系统与低影响开发设施，实现雨水的自然积存、自然渗透、自然净化和可持续水循环，提高水生态系统的自然修复能力，维护城市良好的生态功能。安全为重是以保护人民生命财产安全和社会经济安全为出发点，综合采用工程和非工程措施提高低影响开发设施的建设质量和管理水平，消除安全隐患，增强防灾减灾能力，保障城市水安全。因地制宜是各地应根据本地自然地理条件、水文地质特点、水资源禀赋状况、降雨规律、水环境保护与内涝防治要求等，合理确定低影响开发控制目标与指标，科学规划布局和选用下沉式绿地、植草沟、雨水湿地、透水铺装、多功能调蓄池等低影响开发设施及其组合系统。统筹建设要求地方政府结合城市总体规划和建设，在各类建设项目中严格落实各层级相关规划中确定的低影响开发控制目标、指标和技术要求，统筹建设。海绵城市的建设应与建设项目的主体工程同时规划设计、同时施工、同时投入使用。

海绵城市的建设途径主要有以下方面：一是对城市原有生态系统的保护。最大限度地保护原有的河流、湖泊、湿地、坑塘、沟渠等水生态敏感区，留有足够涵养水源、应对较大强度降雨的林地、草地、湖泊、湿地，维持城市开发前的自然水文特征，这是海绵城市建设的基本要求。二是生态恢复和修复。对传统粗放型城市建设模式下，已经受到破坏的水体和其他自然环境，运用生态的手段进行恢复和修复，并维持一定比例的生态空间。三是低影响开发。按照对城市生态环境影响最低的开发建设理念，合理控制开发强度，在城市中保留足够的生态用地，控制城市不透水面积比例，最大限度地减少对城市原有水生态环境的破坏，同时，根据需求适当开挖河湖沟渠、增加水域面积，促进雨水的积存、渗透和净化。

海绵城市建设应统筹低影响开发雨水系统、城市雨水管渠系统及超标雨水径流排放系统。低影响开发雨水系统可以通过对雨水的渗透、储存、调节、转输与截污净化等功能，有效控制径流总量、径流峰值和径流污染；城市雨水管渠系统即传统排水系统，应与低影响开发雨水系统共同组织径流雨水的收集、转输与排放。超标雨水径流排放系统，用来应对超过雨水管渠系统设计标准的雨水径流，一般通过综合选择自然水体、多功能调蓄水体、行泄通道、调蓄池、深层隧道等自然途径或人工设施构建。三个系统并不是孤立的，也没有严格的界限，三者相互补充、相互依存，是海绵城市建设的重要基础元素。

1.3 国内外雨水资源化利用与控制的发展

1.3.1 国外雨水资源化利用与控制的发展情况

20 世纪 70 年代以前，城市雨水管理在快速、高效的工程排水原则下，着眼于快速将雨水从

城市范围内排除,扩大雨水管道和城市河道横断面、减小粗糙度或开发分洪渠道等被认为是解决雨洪问题的最有效方法。随着城市化进程加快,城市地表不透水面积增加,天然地下水补给量减少,地表径流量增加,洪峰流量增大且时间提前,城市的防灾能力减弱,暴雨洪水灾害发生的概率增大,暴露了原有城市排水系统的弊端,反映了传统雨水管理理念与快速城市化进程的不相适应。从20世纪70年代以来,国际雨水资源管理的理念发生了显著变化,雨水蓄渗、缓排、利用等已成为雨水管理的重要内容,很多国家使用法律、经济、技术等多种手段,从水量和水质管理两个角度,通过工程以及非工程的多种措施实行生态排水,使降水尽可能地进入自然水循环,尽量减少进入城市排水系统的雨水量,促进雨水的资源化利用,减轻城市洪涝灾害、降低城市污水处理负荷和建设费用,维护城市水循环的生态平衡。

(1) 日本

日本是个水资源比较缺乏的国家,目前全国水资源利用率已达到20%左右。从20世纪60年代开始,日本兴建了多种形式的滞洪和积蓄雨水的蓄水池,将积蓄来的雨水作为路面喷洒、绿地灌溉等城市杂用水。这些设施大多建在地下,以充分利用地下空间,而建在地上的也尽可能满足多种用途,如在调洪池内修建运动场,雨季用来蓄洪,平时用作运动场。日本还采用沉淀和过滤的方法在建筑物外部设计收集雨水的设施,收集到的雨水用于消防、灌溉、洗车、冲厕和冷却水补给,部分雨水经处理后供居民饮用。近年来,各种形式的雨水入渗设施在日本迅速发展,形成了包括渗井、渗沟、渗池等多种雨水入渗设施,这些设施占地面积小,能够很好地结合具体用地情况修建在楼前屋后,将地面径流雨水就地入渗。日本也在屋顶修建蓄水系统,或屋顶蓄水和渗井、渗沟相结合的回补系统,雨水在屋顶集蓄后,逐步放入渗井或渗沟,再回补地下水。

1965年以后日本针对因城市化急剧发展围绕河流引起的问题开展了新的河流治理。由于连续遭受三次大的水灾,故于1977年6月开始推行“城市综合治水对策”,实施与传统河流治理方法同时开展的雨水贮留、雨水渗透措施,并普及警戒避难体制。1987年为避免资产及重要业务机能集中的城市地区因超标准洪水决堤而导致毁灭性损害,又提出超级堤防的措施。在河道治理方面采用的新设施为雨水调节池、游水地、治水绿地等,可使流域恢复在其开发过程中丧失了保水、游水机能,并减少发生泛滥时的受害损失。在1980年,日本建设省就开始推行雨水贮留渗透计划,可以有效地补充涵养地下水,复活泉水,恢复河川基流,改善环境生态条件。

(2) 德国

德国对降水在城市生态系统中的作用有了较早的认识和研究,并提出了相应的管理手段,发展了适宜的技术措施。从20世纪80年代至今,其雨水管理思想有了较大转变,1989年雨水利用设施标准的出台标志着第一代雨水利用技术的成熟,在经历了1992年自控技术的提升后,目前的雨水利用技术正处于设备集成化的第三代发展阶段。目前德国的雨水利用技术已经进入标准化、产业化阶段,市场上有成熟的雨水收集、过滤、储存、渗透产品。从技术和管理的角度看,德国在雨水管理领域已形成了较完备的管理框架和技术支撑体系。德国的城市雨水利用方式有3种:①屋面雨水集蓄系统。集下来的雨水经过简单的处理后,使其达到杂用水水质标准,用于厕所冲洗、庭院浇洒、工业冷却等。②雨水截污调蓄与渗透系统。将道路雨水通过渗透补充地下水,或通过下水道排入沿途大型蓄水池,再进入污水厂处理排放。③生态小区雨水利用系统。在小区沿排水道修建渗透浅沟,表面植有草皮,供雨水径流流过时下渗。

(3) 美国

1969年美国科罗拉多州首创城市排水和洪水控制街区。1972年,芝加哥城市卫生街区就开始在没有下水道和未设置分流式下水道的新土地开发区强制建设雨水蓄留设施,在有条件的地

方采用沟渠、干或湿的池子、混凝土水池或管网蓄留，在下游的管网内和管网外蓄留，采用污水处理厂内的蓄留设施和一些特殊的贮留设施等蓄留。管网内蓄留是用下水管网内的富余容积蓄留雨水，管网外蓄留指用与管网相连的一些混凝土水池、凹地、岩洞和地下隧道等设施蓄留雨水，通过对雨水的截留、储存、回灌来补充地表和地下水资源。

美国以提高天然入渗能力为目的，在很多城市建立了屋顶蓄水和由入渗池、入渗井、草地、透水地面组成的地表回灌系统，并制定了相应的雨水利用法律法规对雨水利用给予支持。如美国加州富雷斯诺市的 Leaky Areas 地下回灌系统，1971~1980 年地下水回灌总量为 $1.338 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其年回灌量占该市年用水量的 20%。如科罗拉多州(1974)、佛罗里达州(1974)和宾夕法尼亚州(1978)分别制订了雨水利用条例，这些条例规定新开发区的暴雨洪水洪峰流量不能超过开发前的水平。

美国俄勒冈州波特兰市作为城市雨洪管理的先驱城市，拥有美国最成熟、最综合的绿色基础设施计划，随着时间的推移，多组合的政策和方案都取得了较大的成就，利用丰富的技术方法，如花槽、雨水花园、洼地、透水铺装、雨水收集、绿色街道等，贯穿于波特兰市的各停车场、学校、个人企业、政府机关和公共开放空间。其中波特兰 Mount Tabor 中学雨水花园和波特兰 NES 绿色街道获得 2007 年美国风景园林协会(ASLA)评选的专业设计奖。除此之外还有华盛顿州西雅图 SWA 绿色街道、佛吉尼亚州立理工大学 Lumenhaus 项目、加利福尼亚州圣何塞市瓜达卢佩河公园、俄勒冈州威尔逊维尔市维勒布瓦生物滞留区项目等，雨水塘、雨水湿地、绿色屋顶、街道浅沟、生物滞留池等雨洪管理利用措施在以上项目中都有体现。

(4) 英国

在城市化发展中，河流两岸天然的、覆盖着植被或裸露的、渗水性能良好的土地由于城市建设而被不渗水的砖石、混凝土结构的房屋、沥青路面等各种透水性能很差甚至根本不透水的地面覆盖，使得原本可以被植物吸收、被洼地存贮或直接渗入地下的雨水，被不透水地面阻隔并聚集成地面径流流入城市的下水道，继而进入流经城市的河道，增加了河流的降雨径流量。当达到所谓城市化的成熟期(按城市人口达到国民总数的 70% 计算)，这时城市原有的下水道已不足以解决城市的排内涝问题，城市产生的雨洪径流也远远超出了原来设计的河道防洪工程承受的限度。

2010 年英国政府全面启动了可持续城市排水系统的建设计划，可持续排水系统不仅可以减少城市在极端暴雨天气时发生内涝的可能性，还能够将污染扩散最小化、维持或恢复自然水流、改善水资源以及美化市容市貌等。在所有的新开发区和再开发区都要求将减少排水压力纳入城市规划体系，从而管理地表径流的流速和流量，减少雨洪对城市生态环境带来的风险，同时缓解城市污水处理系统的压力。越来越多的住宅项目、学校、高速公路服务区以及商业中心已经在设计阶段时将可持续城市排水系统纳入，全英国已经建成 34 个重点实践项目。苏格兰东部城市丹佛姆林，将源头控制、贮存池、滞留池、大型暴雨径流湿地等不同类型的可持续排水系统应用在城市开发中，经受了多次暴雨考验，把洪水威胁降到最低，并且几乎完全消除了区域的面源污染，节省了投资者的费用并提升了人与自然和谐的环境效应。位于剑桥西北部的 Lamb Drove 项目展示了在新住宅开发阶段的可持续雨水管理的技术，包括落水管、透水铺装、绿色屋顶、洼地、过滤带、滞留雨水区域和湿地、生物滞留池，尽可能地模仿自然排水模式，尽可能接近源头来管理雨水径流，达到改善水质、减少污染、减缓流速的目的。

英国泰晤士河水公司为了研究不同规模的水循环方案，设计了 2000 年的展示建筑——世纪园顶示范工程，是欧洲最大的建筑物内的循环设施，从 100000 m^2 的园顶盖上收集的雨水，经过