



Technology and Application  
of Permeable Pavement for  
Sponge City

李辉 赵文忠 张超 王向平 著

# 海绵城市透水铺装 技术与应用



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书以海绵城市建设为背景,围绕透水铺装的技术与应用,从全寿命周期的角度出发,系统梳理了透水铺装从材料选择、结构设计到施工工艺、养护技术等多方面内容,详细介绍了透水铺装的生态功能,并分析其可能产生的全寿命周期经济成本与环境影响,同时积极探索固体废弃物在透水铺装中实现资源化利用的可能性,最后对未来发展方向提出展望。本书适用于海绵城市、交通运输工程相关技术、管理、决策人员以及广大对此领域感兴趣的读者阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

海绵城市透水铺装技术与应用 / 李辉等著. —上海:  
同济大学出版社, 2019.5

ISBN 978-7-5608-8361-8

I. ①海… II. ①李… III. ①透水路面—路面铺装  
IV. ①U416.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 004110 号

同济大学学术专著(自然科学类)出版基金项目

## 海绵城市透水铺装技术与应用

李 辉 赵文忠 张 超 王向平 著

责任编辑 陆克丽霞 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)  
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)  
经 销 全国各地新华书店、建筑书店、网络书店  
印 刷 常熟市华顺印刷有限公司  
开 本 787 mm×1092 mm 1/16  
印 张 13.75  
字 数 343 000  
版 次 2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5608-8361-8

定 价 80.00 元

# 前 言

我国在城市化快速发展过程中普遍存在开发强度高、地表铺装硬化等诸多问题,使得城市原有的水文条件与生态环境被改变,突出表现为地表径流大幅增加,不仅增大了传统末端处理设施的负荷,而且引发严重的“城市内涝”问题。同时,地表径流裹挟着空气中的悬浮物及路表各种污染物排入附近水体也会造成面源水污染。另外,近年来,在气候变化与人类活动的综合影响下,水资源供需矛盾愈发突出。因此,针对以上城市水安全、水环境、水资源三大问题,寻求新型的雨洪管理理念与方法成为当前城市雨洪管理领域的主要方向。

我国于2014年提出了“海绵城市”的新型城镇化建设发展战略,并相继出台了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》《关于推进海绵城市建设的指导意见》等文件,分别于2015年和2016年分两批选择了镇江、嘉兴、上海、北京、深圳等30个城市开展试点。根据海绵城市建设的总体目标,到2020年城市建成区20%以上的面积需要能够将不低于70%的降雨地表径流就地消纳和利用,到2030年城市建成区80%以上的面积需要能够将不低于70%的降雨地表径流就地消纳和利用。建设海绵城市需要的技术措施包括:透水铺装、绿色屋顶、雨水花园、生态滞留池等。其中,各种道路铺装面积占城市地表面积的20%~30%,因此透水铺装成为海绵城市建设的重要技术支撑。

本书围绕透水铺装的技术与应用展开,系统梳理、总结了透水铺装的材料、结构、施工与养护等方面的内容。具体包括:海绵城市理念与透水铺装概述(第1章)、透水铺装生态功能(第2章)、透水沥青混凝土铺装技术(第3章)、透水水泥混凝土铺装技术(第4章)、透水连锁混凝土铺砖路面(第5章)、透水铺装结构设计理论与方法(第6章)、透水铺装施工工艺及养护技术(第7章)、透水铺装路面全生命周期经济成本与环境影响分析(第8章)、固体废弃物在透水路面中的资源化应用(第9章)、透水铺装现存问题及发展趋势(第10章)。

感谢相关人员在书稿素材整理和校核方面所做的贡献,希望本书能够为从事相关行业的技术人员与管理人员提供借鉴与参考,不足之处,敬请批评、指正!

本专著研究成果得到了国家重点研发计划资助(2016YFE0108200)及河北省交通厅项目资助(QG2018-5),特此表示感谢!

著 者

2019年3月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 海绵城市理念与透水铺装概述</b> .....	1
1.1 海绵城市的理念与背景 .....	1
1.2 雨洪管理国内外相关理念 .....	2
1.2.1 最佳管理措施(BMP) .....	2
1.2.2 低影响开发(LID) .....	4
1.2.3 可持续排水系统(SuDS) .....	4
1.2.4 水敏感城市设计(WSUD) .....	5
1.2.5 低影响城市设计与开发(LIUDD) .....	6
1.2.6 海绵城市(Sponge City) .....	7
1.3 透水铺装概述 .....	8
1.3.1 透水铺装发展历程 .....	8
1.3.2 透水铺装概述 .....	10
参考文献 .....	13
<b>第 2 章 透水铺装生态功能</b> .....	16
2.1 透水功能 .....	17
2.1.1 透水功能原理 .....	17
2.1.2 透水系数实验方法 .....	18
2.2 透气降温性能 .....	21
2.2.1 透气降温原理 .....	21
2.2.2 蒸发降温原理 .....	22
2.2.3 影响因素 .....	22
2.3 降噪性能 .....	23
2.3.1 降噪原理 .....	24
2.3.2 影响因素 .....	25
2.3.3 测试方法 .....	25
2.4 污水净化性能 .....	27

2.4.1	面源径流主要污染物 .....	28
2.4.2	净水机理 .....	29
2.4.3	影响因素 .....	29
	参考文献 .....	29
<b>第3章</b>	<b>透水沥青混凝土铺装技术 .....</b>	<b>31</b>
3.1	透水沥青路面简介 .....	31
3.1.1	透水沥青路面 .....	31
3.1.2	多孔隙透水沥青磨耗层 .....	32
3.2	国内外透水沥青路面研究现状 .....	32
3.2.1	国内透水沥青路面研究现状 .....	32
3.2.2	国外透水沥青路面研究现状 .....	34
3.2.3	小结 .....	36
3.3	透水沥青路面材料级配设计 .....	37
3.3.1	现有的级配设计方法 .....	37
3.3.2	透水沥青混合料级配设计方法 .....	43
3.3.3	小结 .....	43
3.4	透水沥青路面材料沥青选择 .....	44
3.5	透水沥青路面材料粉胶比优选 .....	44
3.5.1	沥青胶浆制备方法 .....	45
3.5.2	沥青胶浆性能试验 .....	45
3.5.3	多孔隙沥青混合料性能试验 .....	51
3.6	透水沥青路面整体设计 .....	54
3.6.1	多孔隙沥青面层材料设计 .....	55
3.6.2	沥青处治透水基层 .....	55
3.6.3	整平层 .....	56
3.6.4	蓄水基层 .....	56
3.6.5	过滤层 .....	56
3.6.6	土工织物 .....	58
3.6.7	透水/溢流备选措施 .....	58
3.7	透水沥青路面工程实践 .....	58
3.7.1	现场限制条件和考虑因素 .....	58
3.7.2	气候条件 .....	59
	参考文献 .....	60

<b>第 4 章 透水水泥混凝土铺装技术</b> .....	63
4.1 透水水泥路面简介 .....	63
4.1.1 概述 .....	63
4.1.2 国内外透水水泥路面研究现状 .....	63
4.2 孔隙结构与孔隙率测试方法 .....	64
4.3 多孔隙水泥混凝土材料及室内成型方法 .....	65
4.3.1 多孔隙水泥混凝土材料 .....	65
4.3.2 室内成型方法 .....	65
4.4 透水系数测试方法 .....	66
4.5 透水水泥混凝土性能影响因素 .....	68
4.5.1 粒径大小的影响 .....	68
4.5.2 灰集比的影响 .....	70
4.5.3 级配的影响 .....	73
4.5.4 硅灰的影响 .....	77
4.6 小结 .....	77
参考文献 .....	78
<b>第 5 章 透水连锁混凝土铺砖路面</b> .....	79
5.1 透水连锁混凝土铺砖路面简介 .....	79
5.2 透水连锁混凝土铺砖发展历程 .....	79
5.3 透水连锁混凝土铺砖的分类 .....	81
5.3.1 陶瓷透水砖 .....	82
5.3.2 非陶瓷透水砖 .....	83
5.4 透水连锁混凝土铺砖路面的优点 .....	83
5.5 透水连锁混凝土铺砖路面材料设计 .....	84
5.5.1 路面砖 .....	84
5.5.2 垫层、缝隙和排水孔隙的填充材料 .....	86
5.6 透水连锁混凝土铺砖选择 .....	86
5.6.1 路面砖和结构性能 .....	86
5.6.2 路面砖和路面渗透性能 .....	89
5.7 透水连锁混凝土铺砖的适用条件 .....	89
5.8 路面的翻建 .....	90
参考文献 .....	90
<b>第 6 章 透水铺装结构设计理论与方法</b> .....	92
6.1 透水铺装设计概述 .....	92

6.1.1	典型的透水铺装结构	92
6.1.2	透水铺装结构的特殊设计	95
6.2	土工合成材料与结构层布置形式	96
6.2.1	土工织物	96
6.2.2	土工格栅	96
6.2.3	土工膜	96
6.2.4	预制储水模块	96
6.2.5	边缘加固物	97
6.2.6	渗透和不渗透路面的交接	97
6.3	通用设计流程	98
6.4	透水铺装水文设计方法与要求	98
6.4.1	水文设计指南	98
6.4.2	雨水入渗模型	100
6.4.3	影响因素相关性分析	105
6.4.4	效果评价与验算	106
6.4.5	验算结果分析与讨论	109
6.5	透水路面结构设计方法与要求	112
6.5.1	结构设计指南	112
6.5.2	结构分析方法概述	113
6.5.3	结构力学计算模型	114
6.5.4	模型计算及结果分析	116
6.5.5	小结	120
6.6	重载透水路面结构设计优化方法算例	121
6.6.1	方案设计	121
6.6.2	透水路面结构荷载应力计算	122
6.6.3	荷载应力计算结果评价	123
6.6.4	透水沥青路面结构组合评价	125
	参考文献	127
<b>第7章</b>	<b>透水铺装施工工艺及养护技术</b>	<b>129</b>
7.1	路基施工	129
7.1.1	施工方法	129
7.1.2	施工内容	130
7.2	基层施工	130
7.2.1	不透水基层施工	131
7.2.2	级配碎(砾)石基层施工	131

7.2.3	透水水泥混凝土基层施工 .....	132
7.3	透水沥青路面面层施工 .....	133
7.3.1	透水沥青混合料的生产 .....	133
7.3.2	透水沥青混合料的运输与装卸 .....	134
7.3.3	透水沥青混合料的摊铺 .....	135
7.3.4	透水沥青混合料的碾压 .....	137
7.4	透水水泥混凝土路面面层施工 .....	139
7.4.1	透水水泥混凝土混合料生产和运输 .....	139
7.4.2	运输 .....	141
7.4.3	支模 .....	141
7.4.4	摊铺 .....	142
7.4.5	成型 .....	143
7.4.6	表面处理 .....	144
7.4.7	养护 .....	145
7.4.8	表面保护剂施工 .....	145
7.4.9	锯缝、填缝 .....	145
7.5	透水砖路面面层施工 .....	146
7.6	质量检验和竣工验收 .....	147
7.6.1	透水沥青面层 .....	147
7.6.2	透水水泥混凝土面层 .....	148
7.6.3	透水砖面层 .....	148
7.7	透水铺装养护技术 .....	149
7.7.1	透水沥青路面养护 .....	149
7.7.2	透水水泥混凝土路面养护 .....	151
7.7.3	透水砖路面养护 .....	154
	参考文献 .....	154
<b>第 8 章</b>	<b>透水铺装路面全寿命周期经济成本与环境影响分析 .....</b>	<b>156</b>
8.1	全寿命周期与评价方法简介 .....	156
8.2	路面全寿命周期成本分析框架与算法 .....	157
8.2.1	业主成本 .....	157
8.2.2	用户成本 .....	158
8.2.3	小结 .....	159
8.3	路面全寿命周期评价框架与算法 .....	159
8.3.1	确定目标和范围 .....	161
8.3.2	全寿命周期清单分析(LCI) .....	162



8.3.3	全寿命周期影响评价(LCA)	164
8.3.4	解释和结论	165
8.3.5	小结	166
8.4	路面透水性能的环境影响评价方法	166
8.4.1	缓解城市内涝	166
8.4.2	水循环	167
8.4.3	水净化	167
8.5	综合经济成本与环境影响的分析评价方法	167
8.6	透水路面全寿命周期经济成本与环境影响案例分析	168
8.6.1	确定目标和范围	168
8.6.2	原材料获取、施工和养护阶段的经济成本和环境影响	170
8.6.3	用户成本	171
8.6.4	使用阶段的经济成本和环境影响	171
8.6.5	小结	172
	参考文献	173
<b>第9章</b>	<b>固体废弃物在透水路面中的资源化应用</b>	<b>175</b>
9.1	固体废弃物分类与选择	175
9.2	建筑固体废弃物在透水路面中的应用	176
9.2.1	建筑垃圾在透水水泥混凝土中的应用	176
9.2.2	建筑垃圾在透水沥青路面中的应用	179
9.3	赤泥在透水路面中的应用	181
9.3.1	赤泥在透水水泥混凝土路面中的应用	182
9.3.2	赤泥在透水水泥沥青路面中的应用	184
9.3.3	小结	195
9.4	钢渣在透水路面中的应用	195
9.4.1	钢渣在透水水泥混凝土路面中的应用	196
9.4.2	钢渣在透水水泥沥青路面中的应用	197
9.4.3	小结	197
9.5	粉煤灰在透水水泥混凝土路面中的应用	197
9.5.1	材料选择与物理性质	197
9.5.2	成型与力学性能	198
9.5.3	试验结果	198
9.5.4	小结	199
9.6	小结	199
	参考文献	200

第 10 章 透水铺装现存问题及发展趋势 .....	201
10.1 堵塞与养护 .....	201
10.1.1 堵塞机理 .....	201
10.1.2 防堵塞方法 .....	201
10.1.3 未来研究重点 .....	202
10.2 冻融耐久性 .....	202
10.3 重载应用 .....	203
10.4 透水铺装环境效益研究 .....	204
10.4.1 沉积物污染物去除效应 .....	204
10.4.2 溶解金属去除效应 .....	205
10.4.3 氮和磷富营养污染物去除效应 .....	205
10.4.4 温度效应 .....	205
10.4.5 空气质量的影响 .....	205
10.5 有效、可靠的结构设计 .....	205
参考文献 .....	205

# 第1章 海绵城市理念与透水铺装概述

## 1.1 海绵城市的理念与背景

当前,我国正处在城镇化快速发展的时期,城市建设已取得了显著成就。与此同时,高强度开发和不透水铺装不仅导致城市硬化面积过大,而且改变了城市原有的水文条件和生态环境,使中国面临严重的水环境和水安全问题。

(1) 水资源短缺。我国水资源虽然总量可观,但面积占有量和人均占有量均较少,全国平均单位国土面积水资源量仅为  $29.9 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ ,为世界平均水平的 83%;人均水资源仅为  $2100 \text{ m}^3$ ,不足世界人均占有量的  $1/3$ 。从整体来看,地理位置和季风气候决定了我国降水主要受到东南季风和西南季风控制,年际变化大,年内月份分布不均,具有明显的雨热同期的特点,6—9月降水占全年降水量的 60%~80%。从地理位置来看,空间分布不均,南多北少,东多西少。进入 21 世纪以来,由于气候变化和人类活动的综合影响,与 1956—2000 年相比,2001—2009 年降水量多年平均值减少 2.8%,海河流域降水减少 9%,地表水减少 49%,径流的减少使得部分河流从开放向闭合转变,水资源总量减少 31%<sup>[1]</sup>。随着工业、农业、生活用水需求的逐年增长,水资源供需矛盾越来越突出<sup>[2]</sup>。

(2) 水污染问题。我国地表水和地下水的受污染情况都十分严重。《2016 年水资源公报》中指出,通过对全国 23.5 万  $\text{km}^2$  的河流水质进行评价,水质为 I~III 类的河长占 76.9%,劣 V 类水质的河长占 9.8%,主要污染项目为氨氮、总磷、化学需氧量。对全国 118 个湖泊共 3.1 万  $\text{km}^2$  水面进行水质评价,全年总体水质为 I~III 类的湖泊有 28 个,IV~V 类湖泊 69 个,劣 V 类湖泊 21 个,分别占 23.7%,58.5%和 17.8%。全国 763 眼监测井中,水质为 IV~V 类的监测井比例达 62.0%。同时,我国水污染呈现复合性、流域性和长期性的特点,由于排污量的增加和水体纳污能力的综合作用,导致水污染已成为最突出的水资源问题。

(3) 城市内涝多发。近年来,城市内涝现象发生的频率越来越高,主要原因有两方面:①不透水铺装面积的增加,导致渗入地下的水量越来越少;②城市排水系统的作用是使径流顺着道路排水系统排出城市区域,现状是城市排水系统排洪能力不足、管网设施不配套等问题。据统计,2008—2010 年,全国 62%的城市发生过不同程度的内涝,内涝灾害超过 3 次的城市有 137 个。2012 年我国有 184 个县级以上城市遭受了不同程度的内涝灾害<sup>[3]</sup>。2011 年南京“7·18”特大暴雨、2012 年北京“7·21”特大暴雨,2013 年厦门和沈

阳、2014年深圳、2015年上海、2016年武汉的大暴雨等均给城市和人民造成了不同程度的损失。

在快速的城市化进程中,我国水资源问题越来越多、水安全问题也日益突出,因此寻求新型雨洪管理方法和先进理念是解决这些问题的根本途径。要使城市“弹性适应”环境的变化与自然灾害,有以下几个目标需要达成:①最大限度地保护原有河湖水系和生态体系,保护原有水生态系统,维持城市开发前的自然水文特征,保护水生态系统;②始终保持城市生态空间占一定比例,恢复被破坏的水生态;③通过合理控制开发强度,减小对城市原有生态体系的影响,实现低影响开发,增加水域面积,促进雨水利用;④减小径流量,减轻暴雨对城市的影响。

“海绵城市”是一种新型城市雨洪管理理念,它能够通过以上手段,实现城市“弹性适应”环境的总目标。“海绵城市”的内涵是城市在适应环境变化和应对雨水带来的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,也可称之为“水弹性城市”。

## 1.2 雨洪管理国内外相关理念

针对城市化进程中城市内涝现象频发,以及非点源污染等问题,国内外进行了一系列针对雨洪管理的探索和实践,并提出了多种理论体系。在国外的研究中比较典型的雨洪管理有以下几种:美国提出的最佳管理措施(Best Management Practices, BMP)和低影响开发(Low Impact Development, LID),英国提出的可持续排水系统(Sustainable Discharge System, SuDS),澳大利亚的水敏感城市设计(Water Sensitive Urban Design, WSUD),新西兰的低影响城市设计与开发(Low Impact Urban Design and Development, LIUDD),以及我国提出的海绵城市(Sponge City)。

### 1.2.1 最佳管理措施(BMP)

作为一种预防污染的措施,最佳管理措施(BMP)这一概念主要在美国和加拿大应用较为广泛。美国农业部(U.S. Department of Agriculture, USDA)将BMP定义为:通过问题评估,采用工程性和非工程性方式来避免或减少非点源污染以提高水质的方法与措施。BMP理念的雏形出现在1949年美国农业年鉴中,C. R. Hursh<sup>[4]</sup>关于流域及其保护的一篇文章中首次提出需要采用更好的土地管理措施以恢复植物覆盖与土壤结构。虽然该文章中并没有明确提出BMP这一术语,但应是BMP理念的前身。1972年,美国在《净水法案》(Clean Water Act)中首次明确了最佳管理措施(BMP)的概念,将点源污染与面源污染两个概念区分开,其中面源污染具有广泛随机分布、滞后性、模糊性、潜伏性的特点,如表1-1所示。同时,该法案中提出BMP措施是解决非点源污染的有效措施,倡导以土地利用方式合理化为最佳管理措施BMP,建立了BMP数据库(BMP database),已包含400多个相关案例。

表 1-1 点源污染与非点源污染<sup>[5]</sup>

点源污染	非点源污染
管道末端,源头可确认	源头分散
工业污染产物	自然污染(如沉积),一定程度上与水流生态相关
负载远超自然承载力	对于每种单源头来说,负载相对较低
静态来源,易建立具有代表性的监控地区	随时间和地域变化,难以建立监控地区
污染受气候、水文条件影响小	污染受气候、水文条件影响很大
通过 NPDES 认证的过程控制或者废水处理来控制污染	通过自愿、激励、监管的最佳管理措施(BMP)来控制污染

注: NPDES(National Pollution Discharge Elimination System)为美国消除污染排放系统。

最佳管理措施(BMP)的实现,主要可以分为结构性和非结构性两种形式。结构性的 BMP 措施是指通过在末端建设绿色设施(如过滤带、过滤准则、浅草坑、绿色屋顶、生物滞留池、透水铺装等)来实现水净化、缓解暴雨径流;非结构性的 BMP 措施是指通过运营及过程管控(如减少采用化学肥料及杀虫剂的使用等)来实现水净化、缓解暴雨径流。随着美国消除污染排放系统(NPDES)阶段 II 要求的提出,再次细化了 BMP 在控制暴雨径流方面的定义;BMP 是单一采用或协同起作用来使暴雨径流减少排放污染且效益最大化的技术、过程、行为和结构。

对于单项 BMP 工程性技术,主要有滞留式、生物式、渗透式和过滤式这四种形式。

(1) 滞留式 BMP:代表性措施为滞留池和滞留塘,主要目的为减小雨水洪峰流量及控制雨水排入自然水体的量,即水量控制。

(2) 生物式 BMP:利用生物的拦截作用使污染物经沉淀、渗透后得以去除的最佳管理措施。植被过滤带(Vegetation Filter Zone, VFZ)为其代表性措施,其主要目的为减少污染物流入水体。

(3) 渗透式 BMP:通常分为三层,下层为不受干扰的自然土壤层,中间为碎石或其他粗糙物填充的介质层,上层覆盖表层土。近年来,研究应用较多的透水型路面即属于这种 BMP 措施。这种方式可以兼顾水量控制和水质控制均达到较好的效果。但这种方式在设计时需要考虑的因素更多,包括土壤类型、地质条件及地下水位等。

(4) 过滤式 BMP:又称为雨水花园,通常包括表层植被、填料层、透水土壤,底部一般设有地下排水系统。研究发现,不同填充介质有不同的净化效果;降水量、降水时间以及气候因素均是净化效果的主要影响因素。

如果从流域角度进行 BMP 设计规划,除了对以上单项措施进行研究评价外,还需结合流域其他相关数据建立 BMP 应用模型。针对区域内非点源目标污染物的模拟预测模型主要有:农业方面应用较多的 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)<sup>[6]</sup>模型,城市径流控制应用较多的 SWMM(Storm Water Management Model)<sup>[7]</sup>模型等。此外,由美国环境保护署(U. S. Environmental Protection Agency, EPA)联合 Tetra Tech 公司开发的

SUSTAIN 系统(System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration)<sup>[8]</sup>无论是从中小流域还是大流域应用角度都表现出了较好的优化效果。

### 1.2.2 低影响开发(LID)

由于 BMP 措施主要是针对排放末端的处理方法,应用并不广泛。究其原因,主要是针对不同地区和流域,水文与气候条件差别较大,设计规格和土壤水力设计的差别影响了 BMP 的推广。而低影响开发(Low Impact Development, LID)这一概念主要在美国北部及新西兰采用。与 BMP 不同,LID 是从微观尺度出发,在位于或者靠近径流源头的地方采用规模较小的分散式雨水处理设施,如生物滞留池、绿色屋顶和洼地等。因此,这种理念实施起来成本更低、分布更灵活、更适合高密度城市区域。1977 年,Barlow 等<sup>[9]</sup>首次在有关土地利用的规划报告中采用了 LID 这一理念,希望能通过自然措施使雨洪管理的代价最小化。但 LID 这一概念的真正提出是在 1990 年,美国马里兰州的 Prince George's County 采用 LID 这一理念,减少非渗透路面开发,保留自然区域。美国政府要求新开发建设项目必须修建雨洪管理设施以实现“径流零增长”(zero runoff)的目的,即开发后的地表径流量不超过开发前的地表径流量,保持径流峰值出现的时间基本不变,如图 1-1 所示。美国马里兰州采用低影响开发技术的相关应用研究结果显示,采用 LID 之后增加了一定面积的建筑用地,但减少了场地清理修复费用,节约成本 27 万美元<sup>[10]</sup>。M. M. L. Khin 等<sup>[11]</sup>基于 WorldView-2 卫星图像建立了低影响城市排水系统模型。为鼓励人们采用新的雨水处理方式,美国采取了一系列辅助的经济手段,如总税收、发行义务债券、联邦和州给予补贴、联邦贷款等。但考虑到 LID 这种方式所面向的主要是小暴雨事件径流的就地消解,对于大暴雨事件,LID 对径流的消解作用有限。

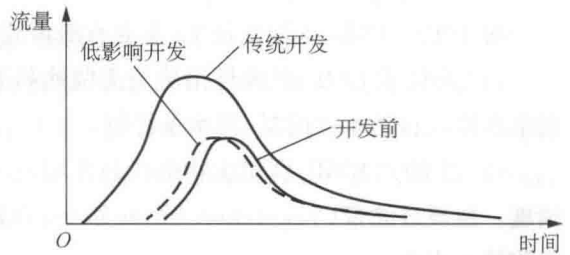
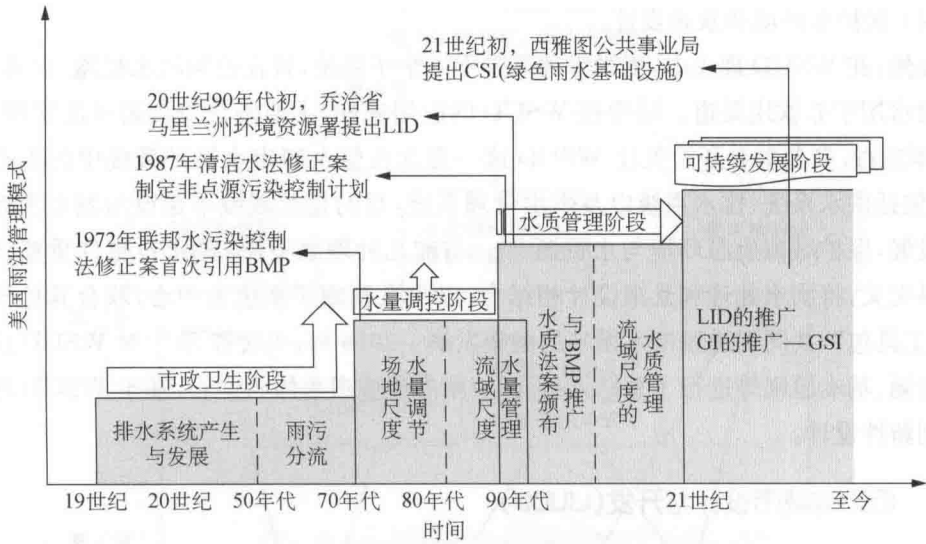


图 1-1 LID 水文特征曲线<sup>[12]</sup>

结合本书第 1.2.1 节来说,美国现代雨洪管理经历了三十多年发展之后,可以将其发展历程总结为如图 1-2 所示。从美国现代雨洪管理的发展历程和趋势,可以看到雨洪管理的重点从大流域管理逐渐向小流域管理转变,从末端管理逐渐向源头控制转变,从流域控制向地点控制转变,从水量控制逐渐向水质管理转变。

### 1.2.3 可持续排水系统(SuDS)

20 世纪 90 年代,基于美国 BMP 措施,英国开始推进一系列雨洪管理政策。1997 年,苏格兰的 Jim Conlin 等<sup>[14]</sup>首次提出了可持续排水系统(Sustainable Urban Drainage System, SuDS)来描述暴雨径流管理措施。1998 年,B. D'Arcy 等<sup>[15]</sup>首次提出了综合考虑传统模式中相互独立的“可持续排水三角”(水质、水量、环境舒适性/便利性),定义了可持续排水系统的

图 1-2 美国雨洪管理发展历程<sup>[13]</sup>

概念。随后,英国建筑业研究和信息协会(Construction Industry Research and Information Association, CIRIA)<sup>[16]</sup>制定了一系列可持续排水系统手册。2007年,《可持续排水系统手册》(The SuDS Manual)颁布,成为当时英国最权威的 SuDS 应用手册。

SuDS 包括一系列排水技术手段,从源头、传输过程和末端处理这三个阶段进行分级削减和控制,每个环节都对应不同的控制措施和设计方法,最终完成预防措施、源头控制、场地控制和区域控制四个目标,形成暴雨径流管理链。考虑上述四个目标,SuDS 的排水技术手段可以分为以下四种:

- (1) 过滤式沉淀槽和洼沟:实现从降雨源头(屋顶、停车场等)处置雨水径流。
- (2) 过滤式排水沟和透水铺装路面:通过顺应地表的自然排水路面,增加透水路面面积,减缓雨水聚集速度,使得更多雨水下渗,避免径流的形成,即在雨水运输过程中实现径流控制。
- (3) 渗入装置:采用一系列装置(如渗沟、渗井)争取更多的雨水下渗。
- (4) 水洼或池塘:实现雨水汇集控制,从而方便进行集中处理。

#### 1.2.4 水敏感城市设计(WSUD)

20世纪90年代,澳大利亚开始采用水敏感城市设计(Water Sensitive Urban Design, WSUD)这一理念。1994年,C. Whelan<sup>[17]</sup>在西澳洲政府(Western Australian Government)的相关报告中提出 WSUD 的基本原则:

- (1) 管理水量平衡(考虑地下水、河流、洪水灾害以及水路侵蚀)。
- (2) 保护并尽可能提高水质(包括处理沉积污染、保护河岸植被、减少污染)。
- (3) 鼓励节约用水(尽量减少饮用水供应,通过雨水收集和废水回收的再利用来减少灌溉用水)。

#### (4) 保护水环境和景观设计。

显然,在 WSUD 理念中,雨洪管理是其中一个子系统,旨在控制洪水径流、提高水质、收集雨水用于非饮用渠道。尽管在 WSUD 的应用初期,主要围绕着暴雨径流管理,但在 2006 年左右,多名学者开始关注 WSUD 这一理念在整个城市水循环系统中的生态整合框架,包括供水系统、排水系统以及雨洪管理系统,目的是实现城市建设与城市水循环的协同发展,保护城市生态环境与水资源<sup>[18]</sup>。与前几种理念不同,WSUD 更注重整合资源和学科交叉,将雨水处理和景观设计相结合,以雨洪管理子系统为中心,联合其他子系统形成“工具包”,共同促进城市水循环的健康发展。2016 年,王晓锋等<sup>[19]</sup>对 WSUD 这一理念的内涵、基本原则等进行了总结,以长江三峡库区城市水体为中心,基于 WSUD 理论进行了创新性设计。

### 1.2.5 低影响城市设计与开发(LIUID)

基于低影响开发(LID)理念与澳大利亚的水敏感城市设计(WSUD)理念,新西兰提出了低影响城市设计与开发(LIUID),其关键点在于避免水质和流域受到污染而不是水流状态管理<sup>[20]</sup>,不仅针对城区的流域和径流进行管理优化,而且针对城市更广泛的低影响开发模式提出相关理念。LIUID 的理念可以用式(1-1)表示。

$$LIUID = LID + CSD + ICM(+SB) \quad (1-1)$$

式中 LID——低影响开发;

CSD——小区域管理;

ICM——综合流域管理;

SB——可持续建筑,式(1-1)中(+SB)表示此项仅在必要时予以考虑。

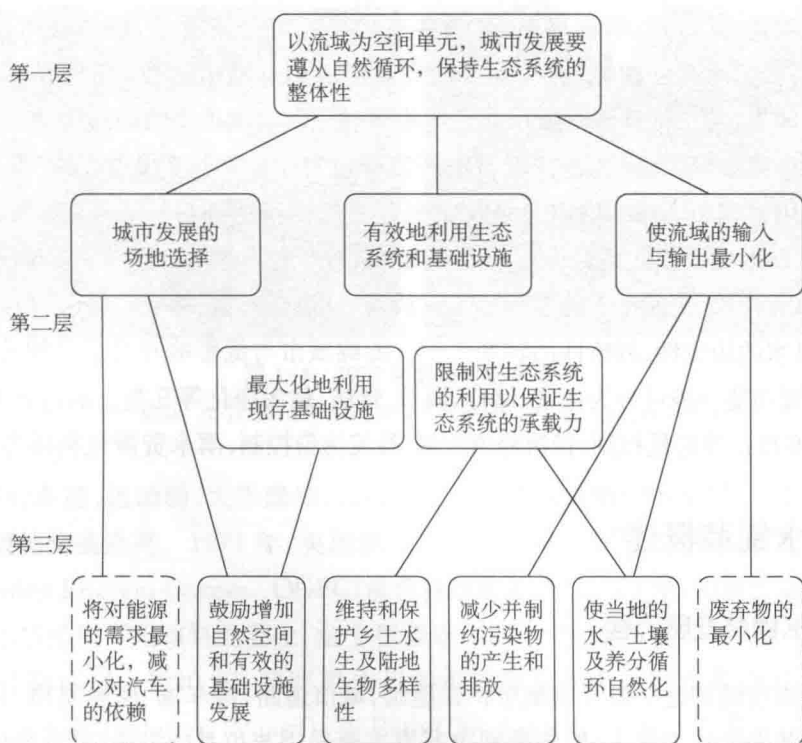
1991 年,新西兰通过了《资源管理法》(*Resource Management Act*)并将其作为自然资源方面的责任和义务。LIUID 这一概念的提出,不仅采用了低影响开发(LID)这一理念,还将城市设计(UD)融入其中,从综合规划的角度提出了人类城市的发展和建设活动不能损害自然环境和资源的理念、方法和措施。LIUID 体系的主要原则可以分为三个阶段,逐步细化,形成整体框架,如图 1-3 所示。

LIUID 的研究内容主要涉及以下几个方面。

(1) 在流域尺度而非单独应用某种技术进行雨洪管理。2008 年,Allison H Roy 等<sup>[22]</sup>通过比较澳大利亚和美国的案例,从分析并解决可持续城市发展的 7 个主要障碍着手,建议从流域角度广泛实施雨洪管理措施以保护河流生态系统及人类健康安全。2009 年,Robert M Roseen 等<sup>[23]</sup>研究了美国北部地区在寒冷冬季条件下采用低影响开发(LID)的性能变化,尤其是过滤介质的冰冻以及冬眠的生物功能,结果发现 LID 措施几乎不受寒冷季节的影响,而单独采用的小系统受气候变化影响较大。

(2) 水文/水质模型:2010 年,Chandana Damodaram 等<sup>[24]</sup>提出一种建模方法,即将 LID 实践纳入现有的水文计算模型中,以得克萨斯州大学流域为例,计算发现 LID 措施可



图 1-3 LIUDD 的理论框架<sup>[17-21]</sup>

以对洪水小事件有明显的控制效应，而对洪水事件的控制效果则需要与 BMP 措施协同合作。2012 年，Laurent M Ahiablame 等<sup>[25]</sup>在针对 LID 的一篇文献综述中汇总了暴雨洪水管理(SWMM)模型、城市暴雨处理及分析集成系统(SUSTAIN)模型、长期水文影响评价(L-THIA-LID)模型并给出了研究趋势建议；同年，Joong Gwang Lee 等<sup>[26]</sup>以堪萨斯州一个实例说明了 SUSTAIN 模型的应用及未来的发展方向；同年，Jia Haifeng 等<sup>[27]</sup>以北京奥运村为实例，将 SWMM 模型与 BMPDSS 模型耦合应用实现雨水管理。

(3) 水质净化:2009 年,Erik S Bedan 等<sup>[28]</sup>进行了传统住宅建设和 LID 实施后的水质对比,发现实施 LID 措施后,暴雨径流增加了 42%,而洪峰流量没有发生变化,硝酸盐、氨氮、锌、铅含量均减少,而总磷(TP)和总悬浮固体(TSS)有所增加。2011 年,Robert A Brown 等<sup>[29]</sup>从 LID 措施(生物滞留池)的不同深度和设计结构入手,研究了不同的施工和设计对径流量和水质的影响。

### 1.2.6 海绵城市(Sponge City)

我国关于海绵城市的研究起步相对较晚,雨洪管理的概念和技术仍在探索推广中。2012 年,在“低碳城市与区域发展科技论坛”上,首次提出了“海绵城市”的概念。2013 年,习近平总书记在中央城镇化工作会议上强调:“要建设自然积存、自然渗透、自然净化的海绵城市。”2014 年,住房和城乡建设部正式发布了《海绵城市建设技术指南——低影响开