

普通高等教育“十三五”规划教材

海绵城市概论

熊家晴 主编 任勇翔 主审



化学工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

海绵城市概论

熊家晴 主编 任勇翔 主审



化学工业出版社

·北京·

“海绵城市概论”是根据当前我国城市建设发展需要设置的一门服务于城市规划、给水排水科学与工程、风景园林等专业的专业选修课程。本书是课程配套教材，全面、系统地介绍了海绵城市理论基础、海绵城市建设基本方法、海绵城市控制指标体系的构建、海绵城市规划设计、海绵城市建设实施以及海绵城市建设评估等。通过学习本教材，帮助学生掌握海绵城市规划设计原理、方法，了解海绵城市建设目标体系与工作程序，培养学生从事海绵城市规划和工程设计的基本能力，提高城市规划设计水平。

本书可作为高等学校给排水、建筑、城市规划、园林等专业的教材，也可作为海绵城市建设普及读物或相关专业技术人员的参考书。

海绵城市概论

主编 熊家晴 副主编 邵志勇

图书在版编目 (CIP) 数据

海绵城市概论/熊家晴主编. —北京: 化学工业出版社, 2019.8

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-33688-0

I. ①海… II. ①熊… III. ①城市空间-高等学校-教材 IV. ①TU984

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 098701 号

责任编辑: 满悦芝

责任校对: 边 涛

文字编辑: 孙凤英

装帧设计: 张 辉

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 装: 高教社 (天津) 印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 10 $\frac{3}{4}$ 字数 259 千字 2019 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 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。

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

随着城镇化的发展，城市缺水、内涝、水污染等水问题频发。究其原因，一方面，原有河流、湖泊、湿地等水生态系统遭到破坏，城市对水资源的自然调蓄能力减弱；另一方面，在长期粗放式的发展模式下，城市多实行“快排式”的排水防涝手段，不重视水的循环利用，加之相应的硬件设施和标准建设不到位，雨水排不掉、雨水快速全排的现象普遍存在，导致城市缺水、内涝问题交替出现，城市居民工作和生活受到极大的影响。

海绵城市作为新型城镇可持续发展的重要模式及从源头上解决水问题的重要途径，受到了全社会的高度关注。2013年底，习近平总书记做出重要指示：在提升城市排水系统时要优先考虑把有限的雨水留下来，优先考虑更多利用自然力量排水，建设自然积存、自然渗透、自然净化的海绵城市。2014年10月，住房和城乡建设部发布《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建（试行）》；2014年12月，财政部发布《关于开展中央财政支持海绵城市建设试点工作的通知》，明确提出中央财政对海绵城市建设试点给予专项资金补助。2015年4月，财政部、住房和城乡建设部、水利部联合公布了16个海绵城市建设试点城市名单；2015年5月，住房和城乡建设部在南宁举办了全国海绵城市建设培训班。海绵城市建设作为新型城镇建设、破解水问题的重要手段，正在从上到下快速推进。

为了更好地普及海绵城市的基本知识，帮助初学者更快了解海绵城市建设的相关理论、方法，编者结合参与的多项海绵城市规划设计经验和从事的相关基础研究工作，编写了这本基础教程，力求全面、系统地为广大初学者介绍海绵城市建设基本概念、基础理论、基本方法、控制指标体系、规划设计方法、工程建设以及评估等相关内容，力求通过学习本教材，使初学者系统性地理解海绵城市建设的基础知识，提高对城市规划建设的认识水平。

本书内容共7章，参加编写人员有：西安建筑科技大学熊家晴、刘言正（第1章，第2、4章部分内容），西安建筑科技大学张卉（第2、3章部分内容），西安建筑科技大学王伟、任瑛（第3、4章部分内容，第6章），西安建筑科技大学陈大鹏（第5章），中联西北工程设计研究院有限公司白雪琛（第7章）。

本书由熊家晴主编，西安建筑科技大学任勇翔主审。

由于编者水平有限，书中难免有不足之处，请广大读者批评指正。

编者
2019年7月

第1章 概述 / 1

1.1 海绵城市的概念	1
1.2 海绵城市理念	2
1.2.1 气候变化给城市带来的挑战	3
1.2.2 城市发展与水环境问题	3
1.2.3 海绵城市理念的提出	8
1.3 海绵城市建设的任务和内容	10
思考题	10

第2章 海绵城市理论基础 / 11

2.1 城市水循环	11
2.1.1 水循环分类	11
2.1.2 雨水径流	12
2.1.3 城市化对城市水循环的影响形式	14
2.2 城市雨水控制与利用	18
2.2.1 城市雨水径流的灾害特征	18
2.2.2 城市雨水径流的水质特征	19
2.2.3 雨水径流的主要控制措施	19
2.3 低影响开发关键技术	20
2.3.1 源头截留技术	20
2.3.2 促渗技术	22
2.3.3 调蓄技术	22
2.3.4 过滤净化技术	24
2.3.5 径流传输技术	25
2.4 超标雨水排放技术	26
2.5 水生态系统保护与修复	27
2.5.1 水生态系统的内涵	27
2.5.2 影响水生态系统的因素	27
2.5.3 生境修复与生物多样性保护技术	27
2.5.4 环境流调控技术	28
2.5.5 水景观与水文化技术	29

2.5.6 水生态环境修复技术·····	29
思考题·····	30
第3章 海绵城市建设基本方法 / 31	
3.1 典型低影响设施建设基本方法·····	31
3.1.1 绿色屋顶·····	31
3.1.2 透水铺装·····	35
3.1.3 生态植草沟·····	39
3.1.4 雨水花园·····	43
3.1.5 下沉式绿地·····	44
3.2 雨污水收集、净化、储存与利用·····	46
3.2.1 城市雨水收集·····	46
3.2.2 截污治污及雨污分流·····	47
3.2.3 城市雨水净化工程措施·····	48
3.2.4 雨水储存利用系统·····	50
3.3 水生态系统建设·····	51
3.3.1 现有河湖水域海绵体保护·····	51
3.3.2 受损河湖水域海绵体的修复·····	51
3.3.3 河湖水系构建措施·····	52
3.3.4 水体富营养化水质改善·····	53
3.3.5 黑臭河沟治理·····	55
3.4 城市绿廊与水系格局构建·····	56
3.4.1 城市绿廊规划设计原则·····	56
3.4.2 城市绿廊与水系格局构建方法·····	57
思考题·····	57
第4章 海绵城市控制指标体系的构建 / 58	
4.1 城市规划控制指标·····	58
4.1.1 城市规划控制的基本内容·····	58
4.1.2 城市规划控制的方式·····	59
4.1.3 城市规划控制指标类型·····	59
4.2 海绵城市控制指标与现有规划指标的关系·····	59
4.3 海绵城市控制指标·····	60
4.3.1 水生态指标·····	60
4.3.2 水环境指标·····	64
4.3.3 水资源指标·····	68
4.3.4 水安全指标·····	72
4.4 制度建设及执行·····	76
4.4.1 规划建设管控制度·····	76

4.4.2 蓝线、绿线划定与保护	78
4.4.3 技术规范与标准建设	79
4.4.4 投融资机制建设	79
4.4.5 绩效考核与奖励机制	80
4.5 海绵城市目标指标分解	81
思考题	83

第5章 海绵城市规划设计 / 84

5.1 海绵城市规划体系构成	84
5.1.1 城市总体规划中的海绵城市规划	85
5.1.2 城市控制性详细规划中的海绵城市规划	87
5.1.3 城市修建性详细规划中的海绵城市规划	87
5.2 海绵城市专项规划	88
5.2.1 城市水系规划	88
5.2.2 绿地系统规划	93
5.2.3 排水防涝规划	96
5.2.4 道路交通规划	98
5.2.5 智慧海绵城市规划	102
5.2.6 海绵城市建设规划	102
5.3 水文分析和地表径流模拟计算	103
5.3.1 流域水文水力模型	105
5.3.2 河流水文水力模型	108
5.3.3 城镇水文水力模型	111
5.3.4 单元尺度的水文模型	116
5.4 GIS在海绵城市规划设计中的应用	119
5.4.1 GIS技术概述	119
5.4.2 GIS在海绵城市规划中的应用	120
5.4.3 海绵城市生态敏感性综合评价	122
思考题	124

第6章 海绵城市建设实施 / 125

6.1 海绵城市建设技术框架	125
6.2 工程建设基本要求	127
6.3 工程建设实施的基本原则	127
6.4 规划的实施	128
6.4.1 规划实施的基本要求	128
6.4.2 规划控制目标的确定	129
6.4.3 径流总量控制目标的确定	129
6.4.4 径流污染控制目标落实	130

6.4.5	控制目标的选择	131
6.4.6	规划中低影响开发控制目标的落实	131
6.5	工程设计	135
6.5.1	工程设计的基本要求	135
6.5.2	设计流程	135
6.5.3	建筑与小区设计	135
6.5.4	城市道路设计	137
6.5.5	城市绿地与广场设计	138
6.5.6	城市水系设计	139
6.5.7	低影响开发设施规模计算	143
6.6	施工建设管理	146
6.7	设施维护管理	147
6.7.1	设施维护管理的基本要求	147
6.7.2	设施维护	147
6.7.3	风险管理	150
	思考题	150

第7章 海绵城市建设评估 / 151

7.1	海绵城市建设绩效评价与考核	151
7.2	海绵城市项目效益评估	154
7.2.1	海绵城市的经济效益	154
7.2.2	海绵城市的社会效益	156
7.2.3	海绵城市的生态环境效益	157
	思考题	158

附录 年径流总量控制率与设计降雨量之间的关系 / 159

参考文献 / 161

第1章

概述

1.1 海绵城市的概念

《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建（试行）》对海绵城市进行了如下定义：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。海绵城市的建设改变了传统的“尽快排出、避免灾害”的城市防洪排涝思想，把雨洪资源作为重要的水资源进行管理，尽量减少对生态环境的影响。

海绵本身主要具有两个方面的特性，即水分特性和和力学特性。海绵的水分特性表现为吸水、持水、释水；力学特性表现为压缩、回弹、恢复。

“海绵城市”包括三个方面的含义：

① 从资源利用的角度，城市建设能够顺应自然，通过构建建筑屋面—绿地—硬化地面—雨水管渠—城市河道五位一体的水源涵养型城市下垫面，使城市内的降雨更能被有效积存、净化、回用或入渗补给地下。

② 从防洪减灾的角度，要求城市能够与雨洪和谐共存，通过预防、预警、应急等措施最大限度地降低洪涝风险、减小灾害损失，能够安全度过洪涝期并快速恢复生产和生活。

③ 从生态环境的角度，要求城市建设和发展能够与自然相协调。也就是说“海绵城市”应当能够很好地应对重现期从小到大的各种降雨，使其不发生洪涝灾害，同时又能合理地资源化利用雨洪水和维持良好的水文生态环境。

近些年国外研究较热的一个概念“Resilience”与“海绵城市”有些相似。“Resilience”源自拉丁文 Resilio，原意为“跳回”，可理解为“弹性、耐受性、恢复力”。1973年，加拿大生态学家 Holling 首次把“Resilience”的概念引入生态学领域，应用于水管理中的 Resilience 理念即来源于生态学。在生态学中，Resistance 和 Resilience 理念用于描述系统对于干扰的响应，Resistance 指抵抗能力，即维持系统所有特性不发生改变的能力，Resilience 指维持系统本质特性不发生不可逆变化的能力。在洪水风险管理中，Resistance 为系统在无反应情况下抵抗洪涝干扰的能力，即设防标准，Resilience 为系统应对洪涝及从洪涝中恢复的能力。Resilience 策略适用于处理不确定性，这与洪水发生规律相适应。Resilience 策略的实施将会改变特定区域的危险程度或脆弱程度，它包括工程性的和非工程性的措施。

“海绵城市”的核心是应对城市雨水问题，包括城市缺水与雨水流失、暴雨洪涝灾害和雨水径流污染等问题。国外应对城市雨水问题的相关概念和理念主要包括：美国的低影响开发（low impact development, LID）、最佳管理措施（best management practice, BMP）、

绿色基础设施 (green infrastructure) 及绿色雨水基础设施 (green stormwater infrastructure, GSI), 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, LI-UDD), 英国的可持续排水系统 (sustainable urban drainage system, SUDS), 德国的雨水利用 (stormwater harvesting) 和雨洪管理 (stormwater management), 日本的雨水储存渗透等。尽管这些概念的名称不同, 但所采取的具体工程措施大同小异, 基本都包括: 进行径流源头控制的透水铺装地面、雨水渗透池、雨水花园、绿色屋顶、植被浅沟等工程设施, 过程控制的雨水滞蓄池、调洪池、雨水湿地等以及雨水收集回用终端控制设施等。

国内应对城市雨水问题的相关概念有“雨水利用”“雨水控制与利用”“雨洪利用”“低影响开发”“内涝防治”等。这些概念虽然名称不同, 但内涵基本相近, 都是对城市降雨径流采取一定措施进行水量、峰值削减, 采取的措施基本为“渗、蓄、用、滞、调、排”, 这些措施都包含了雨水的资源化利用、洪涝减灾防治、面源污染控制、生态环境改善等方面的内涵, 只是各个概念的侧重点依据个人的认识有所不同。这些概念都是与城市雨水利用和排除密切相关的, 其中的一些主要措施是在传统城市雨水排水系统基础上的改进, 如下凹式绿地、屋顶绿化、透水铺装地面等。就工程措施而言, 国内的“城市雨水利用”“雨水控制与利用”“雨洪利用”概念与国外的“低影响开发 (LID)”“最佳管理实践 (BMPs)”“绿色雨水基础设施”等概念基本相同。之所以存在这些内涵相互交叉、重叠的概念, 主要原因是对其所应对的降雨重现期和根本目的有些混淆。“低影响开发”强调源头的径流削减, 控制日常的较小降雨量, 通常重现期在 2 年以下。“雨水直接收集利用”通常针对重现期在 0.5~3 年的场次降雨。这两者的设计标准目前尚缺乏技术标准进行明确的规定。此外, 对于目前问题比较突出而又备受关注的城市内涝防治, 尚缺乏统一的认识和技术标准。

1.2 海绵城市理念

自 20 世纪 70 年代以来, 我国城市数量从 1978 年的 193 个增加到 2014 年的 658 个, 城镇化率达到 54.77%。与此同时, 城市也面临资源约束趋紧、环境污染加重、生态系统退化等一系列问题, 其中又以城市水问题表现最为突出。特别是近些年来, 随着我国城镇化的快速发展, 我国一些地区水环境质量差、水生态受损严重、环境隐患多等问题突出。

2013 年 12 月 12 日, 针对许多城市内涝频发、径流污染、雨水资源大量流失、生态环境破坏等诸多雨水问题, 习近平总书记在中央城镇化工作会议上提出: 建设自然积存、自然渗透、自然净化的“海绵城市”。2014 年 10 月, 住房和城乡建设部发布了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建 (试行)》。为切实加大水污染防治力度, 保障国家水安全, 加快解决我国的水污染问题, 建设“蓝天常在、青山常在、绿水常在”的美丽中国, 国务院于 2015 年 4 月 16 日正式颁布《水污染防治行动计划》(简称“水十条”)。这些政策的出台, 对于解决我国部分城市水资源短缺、内涝频繁发生、水生态恶化、水污染严重等突出的水问题, 改善城市人居环境, 促进城镇化健康发展, 具有十分重要的意义和作用。

1.2.1 气候变化给城市带来的挑战

全球气候变化是当今世界以及今后长时期内人类共同面临的巨大挑战。气候变化导致高温热浪、暴雨等灾害增多,北方和西南干旱化趋势加强;登陆台风强度增大,加剧了沿海地区咸潮入侵风险。城市人口密度大、经济集中度高,受气候变化的影响尤为严重,气候变化已经并将持续影响城市生命线系统运行、人居环境质量和居民生命财产安全。城市适应气候变化是事关人民群众切身利益,事关城市持续健康发展,事关全面建成小康社会的大问题。积极应对气候变化,是实现可持续发展、推进生态文明建设的内在要求。

一项全球性城市调查显示,在世界范围内,越来越多的城市开始在基础城市规划中考虑应对气候变化问题。2013年年底,国家发展和改革委员会(以下简称发改委)、住房和城乡建设部、中国气象局等9单位联合印发了《国家适应气候变化战略》,将城市作为适应气候变化的首个重点领域,凸显了城市应对气候变化的特殊意义。

气候变化对城市规划、发展的影响主要体现在城市水安全和环境安全两个方面。就城市水安全来说,气候变化影响了降水的分布、强度和频率,并改变了水资源的空间格局,由此带来供水安全问题,并加剧了城市内涝风险。在气候变化的影响下,极端天气气候事件逐渐增多,如降雨天数减少、单次降雨量增多,这就加剧了城市积水内涝风险。就环境安全来说,最显而易见的变化就是近年来雾霾的增多,这也与气象条件关系密切。在经历过多次“城市看海”“雾、霾围城”后,公众越来越关注天气、气候与城市规划之间的关系。过去,我国在城市规划、设计和建设过程中,对气候变化的考虑存在不足,大多停留在对以往气象参数的统计分析上,缺乏对未来气候变化的预见性。

1.2.2 城市发展与水环境问题

城市化的发展对水环境所产生的直接或间接影响主要表现为三个城市水文问题,即城市水资源短缺问题、洪涝灾害控制问题和水环境污染控制问题,如图1-1所示。

(1) 城市水资源短缺问题 随着人口增加,对水的需求量也就随之增大,产生了寻求充足水源这一重要问题。

(2) 洪涝灾害控制问题 城市污水增多、降雨的径流量变大和流速增大,使短时间内的大流量径流发生,不可避免地要使洪峰流量增大,从而引起了洪涝灾害控制问题。

(3) 水环境污染控制问题 城市化扩大时,枯水流量减小,城市污水的增加及雨水径流水质的恶化,引起水源水质恶化。另外,固态及液态致病污染物的处置对地下水水质也可能产生不利影响,产生了水环境污染控制问题。

1.2.2.1 城市水资源短缺

联合国一项研究报告指出:全球现有12亿人面临中度到高度缺水的压力,80个国家水源不足,20亿人的饮水得不到保证。预计到2025年,形势将会进一步恶化,缺水人口将达到28亿~33亿。中国是一个缺水严重的国家。水利部公布的2013年水资源公报显示,我国水资源总量约为2.8万亿立方米,占全球水资源的6%,仅次于巴西、俄罗斯和加拿大,居世界第四位,但人均只有2200m³,仅为世界平均水平的1/4、美国的1/5,在世界上名列121位,是全球13个人均水资源最贫乏的国家之一。扣除难以利用的洪水径流和散布在偏

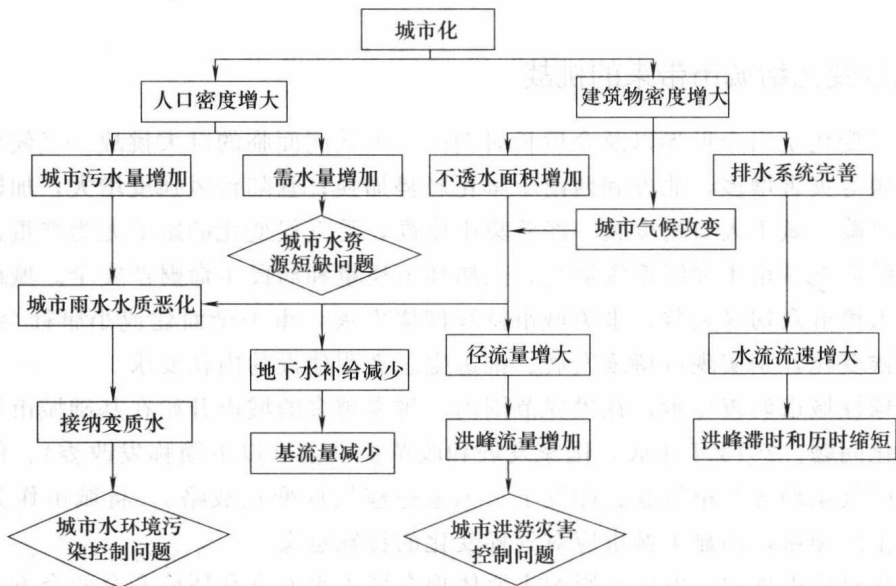


图 1-1 城市化对城市水环境的影响

远地区的地下水资源后，中国现实可利用的淡水资源量则更少，仅为 11000 亿立方米左右，人均可利用水资源量约为 900m³。全国 600 多个城市中，已有 400 多个城市存在供水不足问题，其中缺水比较严重的城市达 110 个，全国城市缺水总量为 60 亿立方米。

我国水资源呈现地区分布不均和时程变化两大特点。降水量从东南沿海向西北内陆递减，可简单概括为“五多五少”，即总量多、人均少，南方多、北方少，东部多、西部少，夏秋多、冬春少，山区多、平原少。这也造成了全国水土资源不平衡现象，如：长江流域和长江以南耕地只占全国的 36%，而水资源量却占全国的 80%；黄、淮、海三大流域，水资源量只占全国的 8%，而耕地却占全国的 40%，水土资源相差悬殊。同时，年内、年际分配不均，旱涝灾害频繁。大部分地区年内连续 4 个月降水量占全年的 70% 以上，连续丰水或连续枯水年较为常见。

虽然我国水资源总量不少，但这些水资源并不是都可以利用的，加上水资源浪费、污染以及气候变暖、降水减少等原因，加剧了水资源短缺的危机。按照国际标准，人均水资源低于 3000m³ 为轻度缺水，低于 2000m³ 为中度缺水，低于 1000m³ 为重度缺水，低于 500m³ 为极度缺水。照此，目前我国有 16 个省区重度缺水，6 个省区极度缺水，全国 600 多个城市中有 400 多个属于“严重缺水”和“缺水”城市。京津冀人均水资源仅 286m³，为全国人均的 1/8，世界人均的 1/32，远低于国际公认的人均 500m³ 的“极度缺水”标准。

我国年用水量整体呈现递增趋势，用水结构也发生了很大变化，农业用水比例逐年下降，而工业和生活以及生态用水所占比例逐年上升。2013 年，全国总用水量达到 6183.4 亿立方米，占当年水资源总量的 22.1%，其中生活用水占 12.1%，工业用水占 22.8%，农业用水占 63.4%，生态环境补水（仅包括人为措施供给的城镇环境用水和部分河湖、湿地补水）占 1.7%。按照国际经验，一个国家用水量超过其水资源的 20%，就很可能发生水资源危机。根据最近几年的水资源状况分析，我国已接近水资源危机的边缘。水利部的资料也显示，我国用水总量正逐步接近国务院确定的 2020 年用水总量控制目标，开发空间十分有限，目前年均缺水量高达 500 多亿立方米。水资源短缺已经成为我国城市化进程的重要阻碍，并且导致一些生态问题的出现。

1.2.2.2 城市洪涝灾害

(1) 城市洪水问题 我国洪水灾害分布极广,除沙漠、戈壁、极端干旱和高原山区外,大约 2/3 的国土面积上存在着不同程度的洪水灾害,全国 600 多个城市中有 90% 都存在防洪问题,西高东低的地形有利于洪水的汇集和快速到达下游,其中危害最严重的是发生在我国东部经济较发达地区的暴雨洪水和沿海风暴潮灾害。由于东部地区不仅人口密集,而且 80% 的人口生活在沿江、沿河的平原地带,土地开发利用程度高,经济较为发达,洪水灾害造成的损失也十分巨大。此外,由于城市不断扩张,人口集中,工业发达,交通拥塞,大气污染严重,且城市中的建筑大多以石头、混凝土和沥青等材料为主,绿地减少,加上建筑物本身对风的阻挡或减弱作用等因素,城市气温明显高于外围郊区,形成热岛效应,逐渐成为强降雨中心,导致一次次大雨或暴雨。城区不透水面积增加、排水系统管网化、河道渠化等导致城市下泄洪峰成数倍至十几倍增长,对下游洪水威胁逐年增加,导致城市下游地区的防洪问题日趋严重。近年来,由于城市化步伐的加快,随着城市人口增加,城市不断外扩,老城区周围原有的土地被大量人为硬化,甚至河道滩地被侵占,很多农田村庄被快速改造成新城,人与洪水争地,破坏了原有水系,大大减小了河道行洪能力和洪水滞蓄空间,降低了城市的防洪能力。

(2) 城市内涝问题 随着城市化进程的加快,城市不透水地面面积比例急剧增大、雨水下渗量减少、地表径流增加及市政排水系统的负荷加重,部分城市的城区排水系统建设跟不上城市发展的速度,加上历史欠账较多,存在排水管网系统不完善,老城区排水设计标准较低,部分管渠、河道淤积严重等问题。导致行洪排涝能力不足。

城市内涝形成的具体原因主要体现在如下几个方面:

① 城市硬化面积过大 硬化地面面积过大的直接后果就是城市综合径流系数增大,引发产流量增加,从而加大了排水系统的压力。

② 城市排水规划的不合理 规划设计不合理、条块分割严重、系统性考虑不足、部分关键地段规划的排水能力不足、后续建筑的持续跟进导致排水压力过大。部分新建区的雨、污水就近排入旧城区排水管网,加大了旧城区排水管网负荷,导致旧城区管道排水不畅。

③ 管网配套不完善,设计重现期较低 随着城市市区面积增加,市政道路网初步形成,但与之配套的市政排水系统和出口大部分未完善。大部分开发较早地区管网的暴雨设计重现期仅为 0.5~1 年,这也就导致城市将来发展时排水能力不足。

④ 排水和排洪体系不同步 我国城市排水和排洪有两套体系,目前我国城市排水体系只有一套小排水体系,而对城市内涝所要建立的大排水体系并没有做出明确的规划和要求,两套体系缺乏沟通和交流,常常因洪水位较高导致顶托现象,引起城市排水不畅。

⑤ 城市的无序建设 城市开发过程使大部分天然的调蓄池遭到破坏、减少甚至消失,雨、污水全部排入市区管网,使管网负荷增加,而下游管网未得到相应的增容改造,许多地区管网形成瓶颈效应,致使排水不畅,造成内涝。

⑥ 系统维护的问题 重地上轻地下导致基础设施维护重视不够,维护管理水平有待提高。部分排水管道堵塞严重,管渠内的杂物包括生活垃圾、建筑泥浆和垃圾,排水管道设施缺少必要的沉泥和冲刷装置,导致管道内沉积了大量的杂物。由于这些垃圾不能及时疏通,使得这些杂物越积越多,本来就超负荷的管道过水断面进一步减小,导致排水不畅。此外,部分雨水口被人为堵死,部分雨水口由于长年不清通堵塞严重,导致雨水不能由雨水口及时排入排水管网,而沿地面顺势汇集至低洼地区,导致这些地区内涝受淹。

1.2.2.3 城市水环境污染

(1) 径流污染 城市径流是城市化造成的雨水的地表径流,这种径流是世界许多城市化地区水污染的主要来源。随着城市建设的不断发展,不透水表面(由沥青、水泥、混凝土等建造的道路、停车场和人行道)在土地开发过程中不断建设,在暴风雨和其他强降水过程中,水流流过这些不透水的表面往往会携带道路和停车场中的汽油、机油、重金属、垃圾和其他污染物以及草坪中的化肥和农药,这些污染物随着城市径流汇集流入雨水排水系统,大多数城市的雨水排水系统会将未处理的雨水直接排入溪流、江河和海湾,而不是通过植被和土壤对污水进行过滤。

城区径流污染的突出特征是污染源时空分布离散性、污染途径随机多样性、污染成分复杂多变性、污染源和污染成分监控困难性等。污染来源主要体现在如下几个方面:

① 屋面雨水 一般认为,屋面雨水水质较好。但有的屋面雨水水质并非如此,这主要与屋面材料、空气质量、气温等外部因素有关。其中,屋面材料受季节和温度的影响对径流水质的影响最大。一般来说,屋顶雨水内含有大量的有机化合物与锌(由镀锌水槽产生)。

② 道路及停车场径流雨水 道路及停车场径流雨水中的污染物主要为路面沉淀物和垃圾等,主要来源于车辆的泄漏和燃烧产生的副产品、丢弃的废弃物、轮胎摩擦、防冻剂使用、杀虫剂和肥料的使用等,污染成分主要包括有机或无机化合物、氮、磷、金属和油类等。道路径流初期雨水中污染物如 COD、TSS、重金属和石油类不仅浓度很高,而且是城区路面雨水中最主要的污染物。

③ 绿地径流雨水 城市绿地作为城市的一个重要组成部分,在美化城市环境、减少地面降雨径流量、补充地下水等方面起到重要的作用。绿地径流雨水通过土壤、植物的过滤和渗析作用,其污染物浓度远远低于同一场次降雨过程中在商住综合区和工业区屋面雨水以及道路径流雨水中污染物的浓度。但是由于冲刷效应,少部分污染物会随着雨水径流冲刷出去,对城市水体造成一定的污染。此外,住宅的草坪、公园和高尔夫球场中使用的化肥是硝酸盐和磷的一个重要来源。

(2) 黑臭水体 所谓“黑臭”,主要属于环境景观、物理指标范畴,是指在视觉上河流水体因污染而呈现的明显异常颜色(通常是黑色或泛黑色),同时产生在嗅觉上引起人们感觉不适甚至厌恶的气味,是水体感官性污染最常见的一种现象。

在我国城市化和工业化进程加快的过程中,由于水污染控制与治理措施滞后,或者能力有限与水平低下,一些城市水体尤其是中小城市水体,直接成为工业、农业及生活废水的主要排放通道和场所,导致城市水体大面积受污染,引起水体富营养化,形成黑臭水体。

近几十年来,我国城市黑臭水体的范围和程度不断增加,在全国大部分城市河段中,流经繁华区域的水体部分受到不同程度的污染,尤其是各大流域的二级与三级支流的黑臭问题比较多,且劣化程度逐年提高。如淮河,2014 年国家环境质量状况公报数据表明,干流水质全年都在Ⅳ类水以上,但主要支流的劣Ⅴ类水体超过 23%。在各大水系中,海河的劣Ⅴ类水质程度最高,国控断面监测数据表明,干流劣Ⅴ类达 37%,支流劣Ⅴ类达 44%。

水体黑臭主要是水体缺氧造成的,同时也与水体富营养化和底泥沉积有关。国家重大水专项相关研究结果表明:当溶解氧降低到 2.0mg/L 时,水体将处于缺氧状态;当溶解氧为 3~5mg/L 时,水体中有机污染物和氨氮含量一般也会超过地表水Ⅴ类标准,呈现有色有味状态,但有水生生物存在;当溶解氧大于 6mg/L 时,水体处于有氧状态,有机物降解和氨氧化速率显著增加,水体开始具有自净能力。在以污水处理厂出水为主要补水水源的水域,

水中有机物主要为难降解有机物，BOD 接近零，COD 和氨氮通过自净也难以达到地表水 V 类标准的要求。

具体来说，水体发生黑臭的主要原因有如下几方面：

① 外源有机物和氨氮消耗水中氧气 城市水体一旦超量接纳外源性有机物以及一些动植物的腐殖质，如居民生活污水、畜禽粪便、农产品加工污染物等，水中的溶解氧就会被快速消耗。当溶解氧下降到一个过低水平时，大量有机物在厌氧菌的作用下进一步分解，产生硫化氢、胺、氨和其他带异味易挥发的小分子化合物，从而散发出臭味。同时，厌氧条件下，沉积物中产生的甲烷、氮气、硫化氢等难溶于水的气体，在上升过程中携带污泥进入水相，使水体发黑。

② 内源底泥中释放污染物 当水体被污染后，部分污染物日积月累，通过沉降作用或颗粒物吸附作用进入到水体底泥中。在酸性、还原条件下，污染物和氨氮从底泥中释放，厌氧发酵产生的甲烷及氮气导致底泥上浮也是水体黑臭的重要原因之一。有研究指出，在一些污染水体中，底泥中污染物的释放量与外源污染的总量相当。此外，由于城市河道中有大量营养物质，导致河道中藻类过量繁殖。这些藻类在生长初期给水体补充氧气，在死亡后分解矿化形成耗氧有机物和氨氮，导致季节性水体黑臭现象并产生极其强烈的腥臭味。

③ 不流动和水温升高的影响 丧失生态功能的水体，往往流动性降低或完全消失，直接导致水体复氧能力衰退，局部水域或水层亏氧问题严重，形成适宜蓝绿藻快速繁殖的水动力条件，增加了水华暴发风险，引发水体水质恶化。此外，水温的升高将加快水体中微生物和藻类分解有机物及氨氮的速度，加速溶解氧消耗，加剧水体黑臭。

根据《城市黑臭水体整治工作指南》，城市黑臭水体是指城市建成区内，呈现令人不悦的颜色（黑色或泛黑色）和（或）散发出令人不适气味（臭或恶臭）的水体的统称。根据黑臭程度的不同，可将其细分为“轻度黑臭”和“重度黑臭”两级。“轻度黑臭”和“重度黑臭”的分级标准如表 1-1 所列。

表 1-1 城市黑臭水体污染程度分级标准

特征指标	轻度黑臭	重度黑臭
透明度/cm	10~25 ^①	<10 ^①
溶解氧/(mg/L)	0.2~2.0	<0.2
氧化还原电位/mV	-200~50	<-200
氨氮浓度/(mg/L)	8.0~15	>15

① 水深不足 25cm 时，该指标按水深 40%取值。

从表 1-1 中可以看出，城市黑臭水体分级的评价指标主要包括透明度、溶解氧（DO）、氧化还原电位（ORP）和氨氮（NH₃-N）浓度。值得注意的是，有机物污染是导致黑臭的直接原因，但评价指标并不包括用以表征有机物含量的化学需氧量（COD）或生化需氧量（BOD），这主要是因为 COD 或 BOD 虽是水体黑臭的诱导因素，但不是黑臭水体的特征。

目前，普遍接受的观点是：水体中有机污染物含量过高时，在好氧微生物的作用下，有机物分解会大量消耗水中的氧气，使水体转化成缺氧或厌氧状态。在缺氧和厌氧条件下，水体中的铁、锰等金属离子与水中的硫离子形成硫化亚铁、硫化锰等化合物。悬浮颗粒吸附硫化亚铁、硫化锰等，致使水体变黑；有机物腐败、分解，产生氨、硫化氢、硫醇、硫醚、有机胺和有机酸等恶臭物质，致使水体变臭。

综上所述，影响水体黑臭的主要因素有有机污染物浓度、营养物质浓度、污染时间（污

染形成后经历的时间)、水力条件、温度条件等。

(3) 水体富营养化 水体富营养化(eutrophication)是指在人类活动的影响下,生物所需的氮、磷等营养物质大量进入湖泊、河口、海湾等缓流水体,引起藻类及其他浮游生物迅速繁殖,水体溶解氧量下降,水质恶化,鱼类及其他生物大量死亡的现象。水体出现富营养化现象时,浮游藻类大量繁殖,形成水华,因占优势的浮游藻类的颜色不同,水面往往呈现蓝色、红色、棕色、乳白色等。这种现象在海洋中则叫作赤潮或红潮。其实质是由于营养盐的输入、输出失去平衡性,从而导致水生态系统中物种分布失衡,单一物种疯长,破坏了系统的物质与能量的流动,使整个水生态系统逐渐走向灭亡。

水体富营养化与生活污水排入、地表径流、雨污水排入都有关系。种植用的化肥、农药中的氮磷等营养盐、空气中的污染物等通过降雨径流都会给水体带来营养物质,久而久之,水体中的营养物质富集,就会造成水体富营养化。

在地表淡水系统中,磷酸盐通常是植物生长的限制因素,而在海水系统中往往是氨氮和硝酸盐限制植物的生长以及总的生产量。导致富营养化的物质,往往是这些水系统中含量有限的营养物质。例如,在正常的淡水系统中磷含量通常是有限的,因此增加磷酸盐会导致植物的过度生长,而在海水系统中磷的含量十分丰富,氮含量却是有限的,因而含氮污染物的加入就会消除这一限制因素,从而出现植物过度生长的现象。生活污水和化肥、食品等工业废水以及农田排水都含有大量的氮、磷及其他无机盐类,天然水体接纳这些废水后,水中营养物质增多,促使自养型生物旺盛生长,特别是蓝藻和红藻的个体数量迅速增加,而其他藻类的种类则逐渐减少。水体中的藻类本来以硅藻和绿藻为主,蓝藻的大量出现是富营养化的征兆,随着富营养化的发展,最后变为以蓝藻为主。藻类繁殖迅速,而且生长周期短。藻类及其他浮游生物死亡后被需氧微生物分解,不断消耗水中的溶解氧,或被厌氧微生物分解,不断产生硫化氢等气体,从两个方面使水质恶化,造成鱼类和其他水生生物大量死亡。藻类及其他浮游生物的残体在腐烂过程中又把大量的氮、磷等营养物质释放入水中,供新一代藻类等生物利用。因此,已经产生富营养化的水体,即使切断外界营养物质的来源,水体也很难自净和恢复到正常状态。

水体富营养化常导致水生生态系统紊乱,水生生物种类减少,多样性受到破坏。水体富营养化的危害主要表现在如下几个方面:

① 富营养化造成水的透明度降低,阳光难以穿透水层,从而影响水中植物的光合作用和氧气的释放,同时浮游生物的大量繁殖消耗了水中大量的氧,使水中溶解氧严重不足,而水面植物的光合作用则可能造成局部溶解氧的过饱和。溶解氧过饱和以及水中溶解氧少都对水生动物(主要是鱼类)有害,造成鱼类大量死亡。

② 富营养化水体底层堆积的有机物质在厌氧条件下分解产生的有害气体以及一些浮游生物产生的生物毒素(如石房蛤毒素)也会伤害水生动物。

③ 富营养化水中含有亚硝酸盐和硝酸盐,人畜长期饮用这些物质含量超过一定标准的水会中毒致病等。

1.2.3 海绵城市理念的提出

基于极端气候变化和城市水环境问题的日益加剧,人们开始寻求理想的城市建设与管理方法来提高应对灾害的能力和消除这些负面影响。“海绵城市”的理论基础是最佳管理措施

(BMPs)、低影响开发 (LID) 和绿色基础设施 (GI), 都是将水资源可持续利用、良性水循环、内涝防治、水污染防治等作为综合目标。

20 世纪 70 年代, 美国提出了“最佳管理措施”, 最初主要用于控制城市和农村的面源污染, 而后逐渐发展成为控制降雨径流量和水质的生态可持续的综合性措施。

在最佳管理措施的基础上, 20 世纪 90 年代末期, 由美国东部马里兰州的乔治王子县 (Prince George's County) 和西北地区的西雅图 (Seattle)、波特兰市 (Portland) 共同提出了“低影响开发”的理念。其初始原理是通过分散的、小规模源头控制技术, 来实现对暴雨所产生的径流和污染的控制, 减少城市开发行为活动对场地水文状况的冲击, 是一种发展中的、以生态系统为基础的、从径流源头开始的暴雨管理方法。在 1990 年, 马里兰州乔治王子县环境资源部首次正式倡导和提出低影响开发 (low impact development, LID) 雨水系统的设计理念和策略。1998 年, 乔治王子县推出了第一个 LID 的使用手册, 后被修改扩展为向美国全国发行的 LID 手册, 该手册于 2000 年正式出版。LID 是一种基于小尺度、分散式、以修复和维持天然条件下的水文生态自循环为目标的可持续综合雨洪污染控制与利用模式。同传统的雨水管理系统设计方法不同, LID 理念重视雨水排放的源头控制, 强调人工排水系统应最大限度模拟自然界的水文环境, 尽可能降低雨水系统对自然环境的影响。它融合了绿色空间、自然景观、大自然原有的水文地理功能及其他多学科的技术, 达到减少建设场地雨洪水排水量及污染负荷的目的。它也是美国绿色建筑委员会 (USGBC) “LEED” (leadership in energy and environmental design) 认证中可持续的场地设计策略之一。其核心是维持场地开发前后水文特征不变, 包括径流总量、峰值流量、峰现时间等。从水文循环角度考虑, 采取渗透、储存等方式来维持径流总量不变, 实现开发后一定量的径流量不外排。要维持峰值流量不变, 就要采取渗透、储存、调节等措施削减峰值、延缓峰值时间。

1999 年, 美国可持续发展委员会提出绿色基础设施理念, 即空间上由网络中心、连接廊道和小型场地组成的天然与人工化绿色空间网络系统, 通过模仿自然的进程来蓄积、延滞、渗透、蒸腾并重新利用雨水径流, 削减城市灰色基础设施的负荷。

上述 3 种理念在雨洪管理领域既存在差异也有部分交叉, 均为构建“海绵城市”提供了战略指导和技术支撑。

2012 年 4 月, 在“2012 低碳城市与区域发展科技论坛”中, “海绵城市”的概念首次被提出; 2013 年 12 月 12 日, 习近平总书记在“中央城镇化工作会议”的讲话中强调: “在提升城市排水系统时要优先考虑把有限的雨水留下来, 优先考虑更多利用自然力量排水, 建设自然存积、自然渗透、自然净化的‘海绵城市’。”而《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建 (试行)》(建城函〔2014〕275 号) 以及仇保兴发表的《海绵城市 (LID) 的内涵、途径与展望》则对“海绵城市”的概念给出了明确的定义, 即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”, 即下雨时吸水、蓄水、渗水、净水, 需要时将蓄存的水“释放”并加以利用, 提升城市生态系统功能和减少城市洪涝灾害的发生。

海绵城市是一种城市发展的新理念和新模式, 建设海绵城市就是要转变城市传统的开发模式, 从粗放的建设模式向生态绿色文明的发展方式转变。《国务院办公厅关于推进海绵城市建设的指导意见》(国办发〔2015〕75 号) 指出: “海绵城市是指通过加强城市规划建设管理, 充分发挥建筑、道路和绿地、水系等生态系统对雨水的吸纳、蓄渗和缓释作用, 有效控制雨水径流, 实现自然积存、自然渗透、自然净化的城市发展方式。”传统城市建设模式