

海绵城市建设之 城市道路雨水生物滞留 技术研究

张书函 孟莹莹 陈建刚 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

海绵城市建设之 城市道路雨水生物滞留 技术研究

张书函 孟莹莹 陈建刚 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是在国家自然科学基金项目“城市道路雨水生物滞留净化排放原理与技术研究”的成果基础上编写的,内容包括:绪论,道路径流水量水质特性,生物滞留设施适宜植物筛选,生物滞留系统填料选配,道路生物滞留系统的降雨径流规律,道路生物滞留系统的数值模拟,生物滞留系统设计方法。

本书可供水利技术、市政排水、园林绿化等专业的研究、规划、设计人员使用,也可供大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

海绵城市建设之城市道路雨水生物滞留技术研究 / 张书函, 孟莹莹, 陈建刚等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-5170-6001-7

I. ①海… II. ①张… ②孟… ③陈… III. ①城市道路—降雨径流—生物净化—研究 IV. ①X52

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第267671号

书 名	海绵城市建设之城市道路雨水生物滞留技术研究 HAIMIAN CHENGSHI JIANSHE ZHI CHENGSHI DAOLU YUSHUI SHENGWU ZHILIU JISHU YANJIU
作 者	张书函 孟莹莹 陈建刚 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	140mm×203mm 32 开本 6.625 印张 178 千字
版 次	2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—1300 册
定 价	30.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《海绵城市建设之城市道路 雨水生物滞留技术研究》

编委会

主 任	张书函	孟莹莹	陈建刚		
委 员	李其军	刘洪禄	潘兴瑶	李永坤	赵 飞
	龚应安	高晓丽	邸苏闯	殷瑞雪	来海亮
	尤 洋	孔 刚	苏东彬	潘 姣	焦 阳

前 言

随着城市化进程的加快，城市中硬化面积不断增加，排水更加快捷，径流对降雨的响应更加敏感，城市地表产流时间和径流消退时间更快，导致城市内涝风险加剧，特别以低洼地区及道路立交桥区出现内涝情况尤为频繁。此外，城市降雨径流污染带来的水体水质恶化问题也日益突出，其中道路径流污染已成为城市地表径流污染的主要来源。目前，城市雨水径流问题已经得到广泛的重视，对待城市雨水的观念也从传统的“直接排放”“排用结合”提升至“系统管理”层面。随着财政部、住房和城乡建设部、水利部两批共 30 个海绵城市试点建设的推进，海绵城市必将成为中国新型城镇化发展的方向。

城市道路作为城市径流污染和内涝产生的源头之一，是解决径流污染和内涝问题的第一环节，也是最关键环节。从源头预防潜在积水及污染的产生，尽可能减少径流、积水及污染物的产生和迁移，对于径流污染和内涝防控具有“防患于未然”的效用。将城市道路排水与雨洪控制和利用密切结合，使得城市道路在一定标准下产生的雨水径流能够通过雨水生态处置措施进行处理后排放，超过处理标准的雨水径流再通过传统的雨水排水系统排放。这可大大减少常规降雨事件中雨水径流的排放，促进雨水资源的利用和面源污染物的消减。这种理念的推广应用，将有助于解决我国城市道路快速建设中亟待解决的重大问题，对于城市道路生态系统功能的恢复重建、城市水资源的节约利用、城市水环境的改善等具有重要意义。

针对目前城市道路雨水直排所带来的面源污染、滞涝风险、水资源流失等问题，在国家自然科学基金项目“城市道路雨水生

物滞留净化排放原理与技术研究”的支持下，北京市水科学技术研究院系统研究了基于生物滞留的道路雨水生态排放技术。在北京的气候、土壤、道路、交通条件和道路雨水水量、水质特性的基础上，提出生物滞留技术的规模确定方法、植物品种选择方法、填料类型选配方法、集排水方式选型方法、结构形式构建方法，为生物滞留系统建立科学实用的设计方法体系，形成适合我国北方城市特点的城市道路雨水生态排放技术。为该技术在国内的推广应用、相关标准和政策的制定、城市道路排水系统设计理念的更新以及安全、生态、健康的城市排水体系的构建提供理论基础与技术支持。

全书主要分为7章。第1章为绪论，介绍研究背景、国内外研究现状、研究内容与技术路线等基本情况；第2章为道路径流量水质特性，介绍通过试验监测所得的道路径流量、水质特性；第3章为生物滞留设施适宜植物筛选，通过专家咨询法筛选生物滞留设施适用植物的评价指标，提出评价指标的分级量化标准及权重，建立植物评价的层次结构模型，对适宜于生物滞留槽的植物进行筛选；第4章为生物滞留系统填料选配，采用层次分析法建立了填料基质的评价模型，研究了单种填料和组合填料的水分特性，筛选出了适宜的生物滞留槽组合填料；第5章为道路生物滞留系统的降雨径流规律，基于大量试验，研究了生物滞留设施的入渗性能、径流调控排放效果及水质净化效果；第6章为道路生物滞留系统的数值模拟，建立了生物滞留设施的水文模拟模型，研究了影响径流调控效果的多种因素；第7章为生物滞留系统设计方法，从断面、进水、排水、规模、结构方面系统介绍了生物滞留设施设计方法。

本书是参与国家自然科学基金项目“城市道路雨水生物滞留净化排放原理与技术研究”全体科研人员辛勤劳动的结晶，全书由张书函、孟莹莹、陈建刚负责统稿，张书函审定，全书主要著者及分工如下。

第1章：张书函、孟莹莹、陈建刚、李其军、刘洪禄、李永

坤、来海亮。

第2章：张书函、孟莹莹、陈建刚、赵飞、龚应安、来海亮、尤洋、孔刚、苏东彬。

第3章：张书函、孟莹莹、陈建刚、刘洪禄、高晓丽、龚应安、潘姣、焦阳。

第4章：张书函、孟莹莹、陈建刚、李其军、刘洪禄、赵飞、高晓丽、邸苏闯。

第5章：孟莹莹、张书函、陈建刚、潘兴瑶、龚应安、高晓丽、殷瑞雪、李永坤。

第6章：孟莹莹、张书函、李其军、李永坤、潘兴瑶、邸苏闯、殷瑞雪。

第7章：孟莹莹、张书函、刘洪禄、潘兴瑶、李永坤、殷瑞雪、潘姣。

除上述参编人员外，参加项目研究与管理的人员还有张钟景、王建慧、范春芳、陈楠、郑凡东、郭凤、宋颀、胡爱兵、桑非凡、李坤娜等，本书也包含了上述同志的工作成果。另外，本书还参考了其他单位及个人的研究成果，均已在参考文献中列出，在此一并表示诚挚的感谢。

由于时间仓促，作者水平有限，书中欠妥或谬误之处敬请读者批评指正。

作者

2017年5月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 研究内容与技术路线	20
第 2 章 道路径流水量水质特性	23
2.1 材料与方法	23
2.2 道路径流的污染物浓度	25
2.3 径流水质随时间的变化	43
2.4 道路径流的初期效应	48
2.5 道路径流水质的影响因素	51
2.6 小结	58
第 3 章 生物滞留设施适宜植物筛选	60
3.1 植物筛选评价方法	60
3.2 植物生理特性研究	70
3.3 适宜植物的筛选	75
3.4 小结	76
第 4 章 生物滞留系统填料选配	78
4.1 填料筛选评价方法	78
4.2 单种填料特性研究	82
4.3 组合填料特性研究	95
4.4 适宜填料的筛选	108

4.5 小结	109
第5章 道路生物滞留系统的降雨径流规律	112
5.1 材料与方法	112
5.2 入渗性能	117
5.3 径流调控排放效果分析	118
5.4 水质净化效果	126
5.5 小结	129
第6章 道路生物滞留系统的数值模拟	131
6.1 模型比选	131
6.2 模型原理	136
6.3 模型构建	141
6.4 模型率定与验证	142
6.5 径流调控效果影响因素分析	148
6.6 小结	166
第7章 生物滞留系统设计方法	169
7.1 断面设计	169
7.2 进水设计	171
7.3 排水设计	180
7.4 规模设计	189
7.5 结构设计	195
7.6 小结	196
参考文献	198

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

随着城市化进程的加快，不透水的道路面积急剧增长。传统的道路排水系统设计思路是将雨水径流尽早、尽快排除，从而建造尽可能发达的雨水排放设施。但不透水面积的扩大和雨水径流的迅速、高效排除使得径流流量增大、洪峰时间提前，加剧了城市内涝风险，增大了河道行洪压力；同时，径流携带道路沉积的大量污染物进入雨水管道、排入河湖水体，直接导致河湖水体水质的恶化，道路径流已成为城市面源污染的主要来源。道路雨水的迅速排除也使得大量雨水未经利用迅速流失，不仅浪费了珍贵的雨水资源，同时也破坏了自然水循环过程，减少了雨水下渗量。因此，发达国家已转变发展思路，从只重视雨水径流排放转为实施全方位、多角度的雨水径流综合管理，对径流的源头、中途、末端进行全过程控制，“最佳管理措施”（Best Management Practices, BMPs）、“可持续城市排水系统”（Sustainable Urban Drainage System, SUDS）、“低影响开发”（Low Impact Development, LID）等雨洪管理体系应运而生。特别是“低影响开发”从减少城市开发建设对水循环影响的角度出发，处理城市排水问题，侧重于源头性措施的运用，更符合现代城市发展。在 LID 体系中，生物滞留技术（Bioretention）在调节雨洪、涵养地下水、削减面源污染、缓解热岛效应、保护生物多样性、改善周边环境、增加景观观赏性、节省能源消耗等方面的生态、环境、社会、经济效益尤其显著，同时，其建造费用低廉、构造形式多样、应用范围广泛、运行管理简单，也是美国绿色建筑评估体系（Leadership



in Energy and Environmental Design, LEED) 的标准之一, 具有良好的推广应用前景。目前, 该技术已被较多地应用于处理建筑屋面雨水、城乡分散的单户庭院径流以及城区道路、广场、停车场的径流等。然而, 虽然生物滞留技术在国外的应用较多, 但目前仍没有形成科学、系统的设计理论, 关于其实际运行效果的长期观测资料也非常少。同时, 由于国内外的气象条件、土壤条件、道路特性、交通特性不同, 生物滞留系统的植物品种、填充材料、结构形式等必然有所不同, 因此, 国外的技术成果也难以在国内直接应用。由于国内研究起步较晚, 相关文献大多是对其发展状况、构成要素、设计方法、应用价值等方面的概述, 缺乏具有指导意义的理论研究和实用技术总结, 更少见有价值的工程实例。因此, 为解决城市道路雨水直排所带来的面源污染、滞涝风险、水资源流失等问题, 本书借鉴国外的理念和经验, 基于北京的气候类型、土壤条件和道路形式, 对用于道路雨水就地滞蓄净化的生物滞留系统设置的关键科学问题展开全面、深入、系统的研究, 主要包括其规模大小确定、植物品种选择、填料类型选配、集排水方式选型等关键问题, 以期建立科学的设计方法体系, 形成适合我国北方城市特点的基于生物滞留滞蓄净化的城市道路雨水生态排放技术。研究成果对于改进我国城市道路排水系统的设计理念, 构建安全、生态、健康的城市排水体系具有重要的理论、技术支撑作用和实际应用价值, 具有重要的现实意义和广阔的推广应用前景。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 城市道路雨水排除与管理

近年来随着城市化进程加剧, 不透水面积急剧增长, 城市洪峰流量增加、洪峰峰形更加尖瘦, 加剧了城市内涝风险、增大了河道行洪压力。然而, 径流携带大量道路沉积污染物进入雨水管道、排入河湖水体, 导致河湖水体水质的恶化, 道路径流已成为



城市面源污染的主要来源。与此同时,道路雨水快速排除也使得大量雨水未经利用迅速流失,不仅浪费了珍贵的雨水资源,同时也破坏了自然水循环过程,减少了雨水下渗量。因此,发达国家已转变发展思路,从注重雨水径流排放转为实施全方位、多角度的雨洪资源综合管理,从径流的源头、中途、末端进行全过程调控,BMPs、SUDS、LID等雨洪管理体系应运而生。特别地,“低影响开发”从减少城市开发建设对水循环影响的角度出发处理城市排水问题,侧重于源头性措施的运用,更符合现代城市发展需求,逐渐成为研究和应用的重点、热点。

美国在20世纪70年代末提出了城市雨水资源管理和径流污染控制的“最佳管理措施”,从控制雨水径流量及造成的污染出发解决雨水排放问题,即进行雨水的收集、储存和净化。在英国,类似BMPs的管理体系称为“可持续城市排水系统”,它对城市排水系统进行统筹考虑,在设计中引入了可持续发展的概念和措施。这些管理体系由于环境和经济上的优势,在北美洲、欧洲、大洋洲的多数发达国家被普遍应用于解决城市洪灾、溢流等雨水问题。发达国家对于城市雨水已转变了传统的“排”水概念,而是将雨水视为资源,将雨水循环视为城市水文循环的重要环节,在开发建设过程中,通过各种管理措施“留住”雨水,在城市中恢复城市开发前的自然水文循环过程。在这些概念的基础上,“低影响开发”的理念日渐形成,它更注重采用各种分散、小型、多样、本地化的技术对径流实施小规模源头控制。如对于城市道路雨水,在20世纪80年代初,美国提出了“就地滞洪蓄水”(On-Site Detention)的概念,道路绿化带通常被设计成一些暴雨管理措施(如植被沟渠、雨水花园、干塘/湿塘、湿地等),以进行径流污染控制、雨水资源化利用及改善生态。日本利用城市路面收集雨水,同时采取蓄排设施有效利用雨水,将道路排水和雨水利用结合了起来。通过对城市道路雨水排放的管理,发达国家基本实现了道路绿化、生态排水、水环境有效改善及城市可持续发展。

而在我国城市中,道路雨水仍以直接排放为主,对道路雨水生态排放方面的研究较为缺乏。道路绿化带、隔离带等宝贵空间滞蓄雨水功能基本上未进行充分利用,道路绿化多为单纯的造景绿化,甚至是耗水的园林景观。“绿地高于道路”情况的普遍存在,造成了水土流失加剧、土地功能单一。总体上,我国道路雨水排放系统几乎没有针对道路自身特点对城市宝贵的雨水资源进行滞蓄、净化和充分利用,而是直接、快速排入管道和河道,引发城市滞涝风险、河道行洪压力增大、河湖面源污染、雨水资源流失等问题。

1.2.2 城市机动车道径流污染控制技术

1.2.2.1 工程措施

城市机动车道径流污染控制措施通常包括非工程措施和工程措施。非工程措施采取控制污染源的管理方法,主要包括路面清扫和控制除冰盐的使用等;工程措施主要有植被控制、湿式滞留池、湿地系统、渗滤系统等多种形式,见图 1.1。

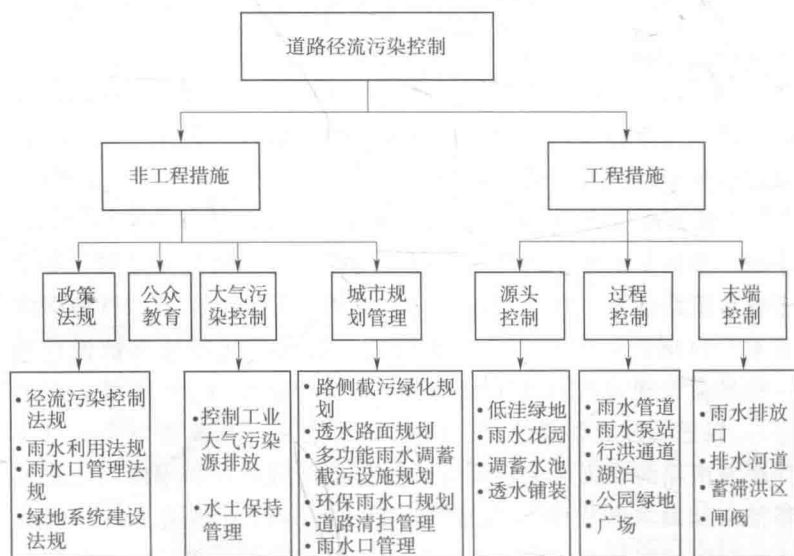


图 1.1 道路径流污染控制技术框架图



Maestri 和 Lord 认为植被控制、湿式滞留池、渗滤系统和湿地是几种有效的道路径流污染控制措施; Lee 采用沉淀和升流式过滤的方法处理城市道路雨水, 经过 4 个月试验, 对 SS、COD、重金属和 PAHs 的去除率分别保持在 60%、40%、60% 和 40% 以上; Sansalone 等研究表明渗滤系统可以有效去除道路径流中的重金属、SS 和 PAHs; Alexandre 等研究了渗滤系统、干式和湿式滞留池、沉淀池等径流控制设施, 分析了各种设施的设计方法及对污染物的去除机理和去除效率, 认为渗滤系统中的渗坑是一种最有效的径流污染控制措施。

(1) 植被控制。植被控制是控制路面径流污染的一种有效而广泛使用的方法, 其主要原理是通过延缓径流的汇集时间, 增加径流的渗透率, 通过过滤、吸附、沉淀、共沉淀和生物作用将污染物从径流中分离并去除, 此外, 地表植被还有助于减轻径流对土壤的侵蚀。植被控制包括地表漫流和植草渠道两种形式。其中植草渠道即在径流输送的水渠中密植草皮, 通过水草降低流速, 起到防止土壤侵蚀并提高悬浮固体的沉降效率的作用。渠道的尺寸、植草面积以及草的种类、密度, 叶片的尺寸等都会影响去除率。美国学者 Youself 和 Jacobsen 对佛罗里达州两座立交桥的植草渠的研究发现: 植草渠道对重金属, 尤其是溶解性的重金属具有较好的去除作用, 渠道内水流流速越小, 对重金属的去除效率越高, 对 Zn、Pb、Ni 和 Cd 的去除效率可分别达 62%、57%、51% 和 43%; 对 P 和无机氮也有较好的去除效果。Barrett 等人研究表明, 植草渠道对 TSS、油脂、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和重金属有较好的去除效果, 对 TSS、油脂、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、Zn、Pb 的去除效率分别为 67%、67%~93%、74%、73%、83%。因此, 在高速公路两侧设置绿化缓冲带和植草渠道是处理道路雨水的有效方法。

(2) 湿式滞留池。滞留池是一种经济有效的控制路面径流污染的措施, 常见的有湿式、干式和双重滞留池三种形式, 其中湿式滞留池由于去除 TSS 的效果明显, 是一种更广泛接受的形式,



实践证明,湿式滞留池可以有效地去除 SS、重金属、TN、TP、BOD 等污染物质。Pettersson 对瑞典 Jarnbrott 一个湿式滞留池的研究结果表明其对 TSS、Zn 和 Pb 的去除率分别可达 14%~82%、74%和 10%~82%。Hossain 对华盛顿 Spokane 地区一个湿式滞留池的研究表明其对 TSS 去除率为 68.1%~99.4%,平均达 83.9%,对金属的去除率为 54.7%~64.6%,并指出湿式滞留池的处理效率随径流污染物浓度、交通量、降雨前期干旱持续时间、季节、周围土地利用性质、汇水区地形等影响因素的变化而有较大的变化。在美国佛罗里达州,已有许多为处理暴雨径流而设计的湿式滞留池,在控制暴雨径流污染方面起到十分重要的作用。

(3) 湿地系统。在路面径流汇集进入水体之前通过湿地进行处理,是一种有效控制径流污染的方法,它通过沉淀、植物吸收、生物降解、吸附、过滤等作用来去除悬浮态或溶解态的污染物质,是一种高效的径流污染控制措施。Yousef 等的研究表明,暴雨径流在人工湿地中停留 72h,SS 的去除率可达 95%。赵剑强总结了美国佛罗里达州数十年暴雨径流控制的经验,认为一般情况下,湿地对 TSS、BOD 及 TN 的去除率可达 60%~85%,P 的去除率变化很大,难以确定。湿地系统有天然湿地和人工湿地两种,后者只有在具备条件的地方才能应用,具有一定的局限性。

(4) 渗滤系统。渗滤系统是控制径流污染、补充地下水资源的常用方法,包括敞开式渗坑、渗水渠和渗井、多孔路面以及部分出流渗渠(Partial Exfiltration Trench, PET)系统等形式,其对污染物的去除机理主要是过滤、颗粒吸附和离子交换等。Sansalone 和 Buchberger 等的研究表明, PET 系统可以有效去除公路路面径流中的重金属、SS 和 PAHs 等污染物质。Alexandre 和 Barry 研究了干式滞留池、湿式滞留池、渗滤系统、沉淀池等径流控制措施的特点,以及对污染物的去除机理、处理效率和设计计算,指出 PET 系统中的渗坑是最有效的径流污



染控制设施,设计合理、维护良好的渗坑对污染物的去除效率可达98%。

1.2.2.2 非工程措施

欧美国家早就提出保持地面清洁是最简便、最经济且最有效的径流污染控制措施,它从源头上消除地面扬尘-地面沉积-径流污染的恶性循环,因此,非工程措施通过加强对路面的管理和群众教育、参与来达到路面径流污染削减目的,主要包括以下几个方面。

(1) 合理规划与设计城市用地,减少地面污染的侵蚀。

(2) 对城区内建筑施工场地、垃圾堆放场地、储煤场等处进行重点监控,要求将土堆、煤堆等覆盖以防止扬尘及减少地面和屋面的沉积物。

(3) 强化路面交通管理。交通管理部门应控制适当的车流量和速度,尽可能减少因加速、减速、刹车、起动等带来的污染,实施严格的车辆漏油、尾气排放超标控制等。严格控制污染物排放量明显超标的车辆上路,禁止超载及运送散装粉状货物的车辆上路,严格监控运载危险品的车辆。

(4) 加强对雨水口的管理,严禁倾倒污水和垃圾。

(5) 制定道路清扫管理办法,对清扫范围、清扫次数等做出具体要求。路面清扫对改善地表径流水质具有重要影响,在某些大气降尘严重、交通繁忙的路段加大清扫频率是十分必要和有效的。路面污染的去除率很大程度上取决于清扫工作的方式,常见的清扫工具及作业效果见表1.1,可以看出,传统的人工清扫效率仅为50%,在条件可行时,可采用几种清扫工具相结合的作业方法。目前北京市有部分主要干道采用湿真空清扫,但是清扫频率不够高。一般道路多采用人工清扫,且每天清扫次数多在2~3次以上,但清扫的目标主要是可视垃圾。而且清洁工人喜欢在大雨后,路面积水尚未退尽时清扫道路边沟的沉积泥垢,此时进入管道的污染物很可能溢流进入水体。



表 1.1 常见的清扫工具及作业效果列表

清扫方式	工作原理	优点或不足
扫帚	人工用扫帚对街道进行扫除	对大直径垃圾（粒径大于 $2000\mu\text{m}$ ）的去除率达到 79%，但对粒径小于 $43\mu\text{m}$ 的小颗粒去除率仅为 15%，总效率仅能达到 50%
干真空抽吸	在干燥情况下真空抽吸	对粒径在 $200\sim 2000\mu\text{m}$ 范围内的去除效果很好，但对粒径小于 $50\mu\text{m}$ 的去除效率低
湿真空抽吸	洒水后再真空抽吸	在试验条件下，无论颗粒大小，去除效率均达到 95% 以上
水冲	以非饮用水冲刷街道边沟	微颗粒污染物去除率高，但所需水量大，需要完善的非饮用水管网
高压水枪冲洗	压力水从水枪喷口喷出，对街道进行冲洗	效率高于一一般机械清扫，但设备繁重

(6) 控制融雪剂的使用。NaCl、CaCl₂ 及砂粒、煤渣等融雪剂的使用，会加剧路面与轮胎的磨损，形成更多的颗粒物，且盐类融雪剂本身溶解于冰雪水中随径流排出，使径流水中氯离子含量大大增加，对地表水体造成严重污染，因此限制融雪剂的使用，可以有效减缓这种污染。

(7) 加强对道路及周边绿化带的维护和管理，使用环保型的除草剂、肥料等。

(8) 加强对群众的宣传教育，增加群众的参与行为，如定期举办展览、讲座，建立公共网站增加与群众的互动，对于热点问题征求群众意见等。

1.2.3 生物滞留措施净化雨水水质技术

削减雨水径流中污染物是雨洪管理措施最普遍的目标之一。在美国，许多州政府明确规定一次降雨过程中，一定量的径流量（如 1.8cm、2.5cm 或 5.1cm）应该被消纳并得到净化。通常认为如果这些径流量能够被有效控制，则其水质也能够达标。对城市径流污染物的监测结果表明，通过控制降雨初期径流，可以很