

The book cover features a blue background with numerous white raindrops falling diagonally. On the right side, there is a photograph of a traditional Chinese building with multiple tiers and ornate roofs, illuminated with warm yellow lights.

# 城市雨水径流净化 与利用 LID 技术研究 ——以西安市为例

李家科 李怀恩 李亚娇 沈冰等 著



科学出版社

# 城市雨水径流净化与利用

## LID 技术研究

——以西安市为例

李家科 李怀恩 李亚娇 沈冰等 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

近年来,我国城市化高速发展带来的内涝灾害、非点源污染加重、雨水资源流失,以及自然生态退化等问题受到了高度重视,城市雨水管理迫切需要新的技术、理念和智慧。本书系统地展示了作者在西北旱区城市非点源污染特征,两种典型控制技术(多级串联人工湿地、生物滞留技术)对城市地面径流量、水质的调控效果、规律及其效果模拟,多环芳烃高效降解菌群的优选与特性,生物滞留系统设计,城市低影响开发(LID)措施应用效果情景模拟等方面的研究成果。可为我国“海绵城市”建设、城市非点源污染防治的生态工程措施的设计、应用和推广提供科学依据和理论支撑,同时推动人工湿地、生物滞留技术在我国雨水净化与利用方面的发展。

本书可供城市非点源污染防治及模拟、水环境综合治理、雨洪管理和可持续发展等领域的科技工作者及研究生参考和借鉴。

### 图书在版编目(CIP)数据

城市雨水径流净化与利用 LID 技术研究:以西安市为例/李家科等著.  
—北京:科学出版社,2016.5  
ISBN 978-7-03-028888-2

I. ①城… II. ①李… III. ①城市-雨水资源-净化-研究 IV. ①X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 074309 号

责任编辑:杨帅英 / 责任校对:张小霞

责任印制:张 伟 / 封面设计:图阅社

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 5 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 5 月第一次印刷 印张:27 1/2 插页:6

字数:637 000

定价:169.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

随着城市化进程的加快和城市规模的扩大,致使不透水地面面积快速增长,引发一系列环境问题,主要包括城市内涝、城市面源污染加重、雨水资源流失,以及自然生态退化等。有关研究表明,不透水面积为开发前 10% 时,开发后径流体积为开发前的 1.5 倍,不透水面积为 100% 时,体积增量倍数为 6 倍。近年来,极端降雨导致我国城市内涝频发,暴雨积水严重,已危及城市安全,如何有效控制暴雨引起的城市内涝及非点源污染问题亟待解决。2013 年,国务院办公厅发布《关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知》(国办发[2013]23 号),力争用 5 年时间完成排水管网的雨污分流改造,用 10 年左右时间,建成较为完善的城市排水防涝工程体系。2015 年,我国大力推进建设自然积存、自然渗透、自然净化的“海绵城市”,建立尊重自然、顺应自然的低影响开发(LID)模式,以期系统解决水安全、水资源、水环境等问题。我国对城市地表径流污染研究开始于 20 世纪 80 年代,与美国、日本等发达国家相比起步较晚。但伴随着国家对非点源污染的重视以及近年来各大院校对非点源污染控制各项技术的大力投入,我国已逐步开始治理非点源污染,并且逐步开展对雨水的再利用。长期以来,我国对东中部城市(如上海、武汉等)降雨径流污染规律及其控制开展了一些研究;但对西北地区城市的相关研究很少,而且现有研究成果缺乏全面性和系统性。西北地区城市由于水文过程、人类活动等与其他城市差异显著,地表径流污染过程有其自身特点。因此,有必要加强西北地区城市非点源污染排放规律和控制技术的研究,以满足西北地区城市水污染控制的需要。

本书是在国家自然科学基金“低影响开发(LID)生态滤沟技术对旱区城市路面径流的净化机理研究”(51279158)和“西北地区典型城市降雨径流污染负荷定量化研究”(51209168)、陕西省自然科学基金重点项目“旱区城市低影响开发生物滞留技术的应用机理研究”(2015JZ013)等课题研究成果的基础上,系统总结编撰而成。以我国西北地区典型资源型缺水、生态环境脆弱型城市西安市为研究背景,通过现场降雨径流监测和人工模拟降雨试验,研究了西安市非点源污染时空变化特征和冲刷规律;结合非点源污染物累积冲刷模型,构建了基于可冲刷污染物量的非点源污染场次负荷模型。通过试验和理论分析,研究了水平潜流和复合流两组多级串联人工湿地对降雨径流的净化规律,分析了运行间隔天数、水力停留时间和水深等因素对人工湿地净化效果的影响,确定了试验条件下人工雨水湿地处理城市降雨径流的最佳运行工况;通过对两组人工湿地净化效果的对比,分析了湿地系统中水流方式对净化效果的影响;研究了不同水深条件下,水平潜流和复合流两组人工湿地对污染物 COD、氮、磷和重金属的沿程以及垂向净化效果;同时考察了人工湿地中植物的光合蒸腾速率变化规律,分析了影响光合蒸腾速率作用的主要因素及对人工湿地去除效果的影响;应用响应面统计分析法对复合流人工湿地处理总氮、总磷、氨氮等污染物的净化效果进行了建模和最佳运行工况分析。从水质(污染物浓度去除)和水量(径流削减)两方面,研究了生态滤沟对路面径流及其污染的调控效果。开展了生态滤沟净化城市路面径流的小型、中型(I、II)试验,定量研究了各种因素(水力负荷和污染负

荷、运行间隔时间、填料组合、填料厚度、植被条件、滤沟宽度、季节等)对生态滤沟系统调控效果的影响;建立了生态滤沟调控效果及其影响因素的多元回归模型,并运用HYDRUS-1D软件对装置的出水水质进行模拟。通过对生物滞留系统内菌群的驯化及高效多环芳烃降解菌群的优选,得到了能够高效降解PAHs的菌群;通过研究不同外加碳源、氮源和PAHs初始浓度对菌群生长和降解效果的影响,揭示了菌群对PAHs的降解特性;利用分子生物学方法分析了混合菌群的种群结构,揭示了菌群的协同作用机理。以西安市为例,研究生物滞留系统的设计方法。最后,分别以西安市浐河、皂河某片区及西咸新区沣西新城为研究区域,根据城市雨水管网系统以及实测资料,采用暴雨管理模型(SWMM)模拟了不同情景下,研究区域设置低影响开发(LID)调控措施前后的水量及水质情况,研究了低影响开发调控措施对城市降雨径流及其污染物的调控效果,以期为城市生态建设和雨洪管理提供科学依据。

全书由西安理工大学李家科、李怀恩、沈冰、李亚,西安科技大学李亚娇等统稿,由李家科定稿。第1章由李家科、李亚娇、陈虹、李亚执笔,第2章由李家科、李怀恩、李亚娇、董雯、陈虹、郭雯婧、李亚执笔;第3章由李家科、沈冰、李亚娇、高志新、张倩、李鹏执笔;第4章由李家科、李怀恩、张佳杨、程杨、梁正执笔;第5章由李家科、李亚娇、雷婷婷、张思翀、蒋春博执笔;第6章由林培娟、李家科、李怀恩、邓朝显、黄宁俊、李鹏、刘增超执笔;第7章由王东琦执笔;第8章由李家科、黄宁俊、李怀恩、万宁、王社平、蒋春博、邓朝显、刘增超、张佳杨执笔;第9章由李家科、李怀恩、陈虹、李亚、尚蕊玲、李亚娇执笔。此外,研究生邓陈宁、张彬鸿、刘力、阮添舜等参加了书稿的校对工作。感谢科学出版社杨帅英编辑在本书出版过程中付出的辛勤工作。

由于作者水平有限,书中不妥在所难免,敬请广大读者批评指正。

作者

2016年1月

# 目 录

## 前言

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论                        | 1   |
| 1.1 研究背景与意义                     | 1   |
| 1.2 国内外研究进展                     | 2   |
| 1.2.1 城市降雨径流污染过程研究进展            | 2   |
| 1.2.2 管理与控制研究进展                 | 4   |
| 1.2.3 人工湿地研究进展                  | 5   |
| 1.2.4 生物滞留技术研究进展                | 10  |
| 1.2.5 生物滞留系统去除多环芳烃的研究进展         | 17  |
| 1.2.6 模型模拟研究进展                  | 22  |
| 1.3 研究内容及技术路线                   | 30  |
| 1.3.1 研究内容                      | 30  |
| 1.3.2 技术路线                      | 31  |
| 参考文献                            | 33  |
| 第 2 章 西安市非点源污染监测与特性分析           | 43  |
| 2.1 西安市主城区非点源污染监测与特性分析          | 44  |
| 2.1.1 材料与方法                     | 44  |
| 2.1.2 结果与讨论                     | 47  |
| 2.2 城市雨水径流水质演变过程监测与分析           | 52  |
| 2.2.1 材料与方法                     | 52  |
| 2.2.2 结果与讨论                     | 54  |
| 2.3 浐河某片区非点源污染监测和特征分析           | 62  |
| 2.3.1 材料与方法                     | 62  |
| 2.3.2 结果与讨论                     | 66  |
| 2.4 人工降雨非点源污染监测与特性分析            | 80  |
| 2.4.1 试验方案                      | 80  |
| 2.4.2 结果与讨论                     | 82  |
| 2.5 城市降雨径流非点源污染场次负荷模型           | 94  |
| 2.5.1 非点源污染物累积、冲刷及场次负荷模型        | 94  |
| 2.5.2 非点源污染场次负荷模型应用             | 97  |
| 2.6 本章小结                        | 103 |
| 参考文献                            | 105 |
| 第 3 章 多级串联人工湿地对城市地面径流的净化效果和规律研究 | 106 |
| 3.1 多级串联人工湿地试验设计                | 106 |

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 3.1.1 | 试验装置设计                            | 106 |
| 3.1.2 | 试验设计                              | 113 |
| 3.2   | 多级串联人工湿地试验结果与分析                   | 117 |
| 3.2.1 | 人工湿地对城市降雨径流的净化效果                  | 117 |
| 3.2.2 | 两组人工湿地沿程净化实验结果分析                  | 125 |
| 3.3   | 多级串联人工湿地蒸发蒸腾与水质净化效果               | 138 |
| 3.3.1 | 芦苇和美人蕉蒸腾作用的变化规律及其影响因素             | 138 |
| 3.3.2 | 人工湿地蒸散量的变化规律                      | 145 |
| 3.4   | 多级串联人工湿地净化效果的模拟研究                 | 149 |
| 3.4.1 | Design-Expert 软件介绍以及响应面法的基本原理     | 149 |
| 3.4.2 | Design-Expert 对人工湿地净化效果的试验设计与结果分析 | 150 |
| 3.4.3 | 响应面法优化最佳工况分析                      | 158 |
| 3.4.4 | 人工湿地水质净化与植物蒸腾光合的关系                | 159 |
| 3.5   | 本章小结                              | 166 |
|       | 参考文献                              | 167 |
| 第 4 章 | 生态滤沟净化城市路面径流的小试研究与效果模拟            | 170 |
| 4.1   | 生态滤沟小型试验设计                        | 170 |
| 4.1.1 | 小型试验装置                            | 170 |
| 4.1.2 | 试验方案                              | 172 |
| 4.1.3 | 植物与填料性能参数的测定                      | 177 |
| 4.2   | 生态滤沟小试的调控效果及其影响因素分析               | 179 |
| 4.2.1 | 生态滤沟的水量削减效果及其影响因素研究               | 179 |
| 4.2.2 | 生态滤沟对 COD 浓度净化效果及其影响因素研究          | 189 |
| 4.2.3 | 生态滤沟对氮磷浓度净化效果及其影响因素研究             | 193 |
| 4.3   | 生态滤沟净化效果统计分析                      | 211 |
| 4.3.1 | 生态滤沟对水量削减效果的统计分析                  | 211 |
| 4.3.2 | 生态滤沟对 COD 浓度去除效果与其影响因素统计分析        | 217 |
| 4.3.3 | 生态滤沟对 TN 浓度去除效果与其影响因素统计分析         | 223 |
| 4.3.4 | 生态滤沟对 TP 浓度去除效果与其影响因素统计分析         | 228 |
| 4.4   | 生态滤沟小试净化效果模拟                      | 233 |
| 4.4.1 | 生态滤沟水分运移机理                        | 233 |
| 4.4.2 | 生态滤沟溶质运移机理                        | 234 |
| 4.4.3 | 运用 HYDRUS-1D 软件模拟生态滤沟中 TN 迁移      | 235 |
| 4.5   | 本章小结                              | 236 |
|       | 参考文献                              | 238 |
| 第 5 章 | 基于试验装置( I )的生态滤沟净化城市路面径流的中试研究与模拟  | 239 |
| 5.1   | 试验设计                              | 239 |
| 5.1.1 | 试验装置概况                            | 239 |
| 5.1.2 | 试验方案设计                            | 242 |

|       |                               |     |
|-------|-------------------------------|-----|
| 5.1.3 | 试验安排                          | 243 |
| 5.1.4 | 分析与评价方法                       | 253 |
| 5.2   | 试验结果与分析                       | 254 |
| 5.2.1 | 物化吸附水量试验结果分析                  | 254 |
| 5.2.2 | 物化吸附水质试验结果分析                  | 262 |
| 5.2.3 | 净化能力正交试验分析                    | 270 |
| 5.2.4 | 净化能力单因素对比试验结果分析               | 285 |
| 5.3   | 生态滤沟运行效果统计分析                  | 291 |
| 5.3.1 | 防渗滤沟统计分析及模拟                   | 291 |
| 5.3.2 | 不防渗滤沟统计分析及模拟                  | 297 |
| 5.4   | 运用 HYDRUS-1D 软件模拟生态滤沟中 TP 迁移  | 300 |
| 5.4.1 | 参数输入                          | 300 |
| 5.4.2 | 模拟结果                          | 301 |
| 5.5   | 本章小结                          | 304 |
|       | 参考文献                          | 306 |
| 第 6 章 | 基于试验装置(Ⅱ)的生态滤沟净化城市路面径流中试研究与模拟 | 307 |
| 6.1   | 生态滤沟中型试验设计                    | 307 |
| 6.1.1 | 试验装置概况                        | 307 |
| 6.1.2 | 试验设计                          | 308 |
| 6.2   | 生态滤沟中试结果与分析                   | 311 |
| 6.2.1 | 正交试验分析                        | 311 |
| 6.2.2 | 生态滤沟正交试验净化效果影响因素研究            | 331 |
| 6.3   | 生态滤沟净化效果统计分析                  | 337 |
| 6.3.1 | TN 净化效果回归分析                   | 337 |
| 6.3.2 | TP 净化效果回归分析                   | 342 |
| 6.4   | 生态滤沟中试装置对 TP 净化效果模拟           | 346 |
| 6.4.1 | 参数的选择                         | 346 |
| 6.4.2 | 模拟结果与分析                       | 347 |
| 6.5   | 生态滤沟冬季运行效果研究                  | 348 |
| 6.6   | 本章小结                          | 350 |
|       | 参考文献                          | 350 |
| 第 7 章 | 多环芳烃高效降解菌群的优选与特性研究            | 351 |
| 7.1   | 多环芳烃降解菌群的筛选及其降解特性             | 352 |
| 7.1.1 | 多环芳烃降解菌群的富集与优选                | 352 |
| 7.1.2 | 多环芳烃降解菌群的降解特性与影响因素            | 355 |
| 7.2   | 多环芳烃降解菌群的群落结构分析               | 359 |
| 7.2.1 | 材料与方法                         | 359 |
| 7.2.2 | 结果与讨论                         | 362 |
| 7.3   | 本章小结                          | 366 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 参考文献                                 | 367 |
| <b>第8章 生物滞留技术设计方法研究</b>              | 370 |
| 8.1 设计原则                             | 370 |
| 8.2 有关定义                             | 370 |
| 8.2.1 术语                             | 370 |
| 8.2.2 主要符号                           | 371 |
| 8.3 设计降雨量及径流水质                       | 372 |
| 8.3.1 雨量雨型确定                         | 372 |
| 8.3.2 径流水质                           | 373 |
| 8.4 生态滤沟系统设计                         | 374 |
| 8.4.1 生态滤沟布置方式和系统结构                  | 374 |
| 8.4.2 一般规定                           | 375 |
| 8.4.3 生态滤沟设计的一般步骤                    | 375 |
| 8.4.4 生态滤沟表面积计算                      | 376 |
| 8.4.5 生态滤沟纵向结构及深度设计                  | 379 |
| 8.4.6 入流口设计                          | 380 |
| 8.4.7 溢流口设计                          | 380 |
| 8.4.8 穿孔排水管布置                        | 381 |
| 8.4.9 植物选择                           | 382 |
| 8.4.10 地基处理                          | 382 |
| 8.5 施工安装                             | 382 |
| 8.5.1 一般规定                           | 382 |
| 8.5.2 施工工序                           | 383 |
| 8.6 管理维护                             | 383 |
| 8.7 工程实例                             | 383 |
| 8.8 本章总结                             | 385 |
| 参考文献                                 | 385 |
| <b>第9章 基于SWMM模型的城市低影响开发调控措施的效果模拟</b> | 386 |
| 9.1 SWMM模型概述及原理                      | 386 |
| 9.1.1 地表产流过程                         | 387 |
| 9.1.2 地表汇流过程                         | 389 |
| 9.1.3 地表污染物累积及冲刷模拟过程                 | 390 |
| 9.1.4 管网的汇流过程                        | 392 |
| 9.2 浐河某片区城市雨水花园调控措施效果模拟              | 393 |
| 9.2.1 材料与方法                          | 393 |
| 9.2.2 不同模拟情景设置                       | 397 |
| 9.2.3 结果与讨论                          | 401 |
| 9.3 皂河某片区城市雨水花园调控措施效果模拟              | 408 |
| 9.3.1 材料与方法                          | 408 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 9.3.2 不同模拟情景设置 .....          | 412 |
| 9.3.3 结果与讨论 .....             | 415 |
| 9.4 西咸新区低影响开发措施的效果模拟与评价 ..... | 420 |
| 9.4.1 材料与方法 .....             | 420 |
| 9.4.2 不同模拟情景设置 .....          | 423 |
| 9.4.3 结果与讨论 .....             | 425 |
| 9.5 本章小结 .....                | 427 |
| 参考文献 .....                    | 428 |

## 彩图

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景与意义

随着我国城市化水平发展的进一步加快,可渗透地面的面积比例越来越小,由降雨径流产生的突发性的、冲击性强的城市非点源污染已成为城市水环境污染的主要来源之一。广义的城市非点源污染,按成因可分为城市地表径流污染、大气的干湿沉降、城市水土流失及河流底泥的二次污染(杨柳等,2004;贺缠生等,1998);狭义的城市非点源污染是指城市降雨径流淋洗与冲刷大气和汇水面各种污染物引起的受纳水体的污染,即降雨径流污染(地表径流污染),是城市水环境污染的重要因素(林积泉等,2004)。降雨是城市非点源污染形成的动力因素,而降雨形成的径流是非点源污染物迁移的载体,也是城市非点源污染的最主要形式(张瑜英等,2006)。

城市是人类活动最频繁的区域,城市降雨径流污染有其特殊性。其一是具有面源和点源的双重性。污染物晴天时在城市地表累积,降雨时则随地表径流而排放,具有面源间歇式排放特征;污染物自城市地表经由排水系统进入受纳水体,又具有集中排放的特征。其二是随机性。影响城市降雨径流污染的因素很多,且许多为随机性因素,在地表污染物的累积和冲刷两个主要环节中都有随机性因素起作用,如两场降雨之间的间隔时间、降雨历时、降雨强度等。其三是污染负荷空间变化幅度大。不同的城市功能区,其人类活动的方式与强弱不同,相应的地表沉积物的数量和性质也不同,产生的径流污染负荷差异较大。其四是污染物来源复杂,组成复杂,量大面广。污染物来源包括城市路面的灰尘与垃圾、城市裸露地面的水土流失、机动车辆的部件及车胎磨损的碎屑、机动车漏油的油污、城市建筑垃圾、大型集贸市场的污水和垃圾、风景游览区的园林垃圾、城市建筑物屋顶上的降尘、大气的干沉降与湿沉降(包括机动车辆排放物的干沉降)等;污染物成分包括悬浮固体物、耗氧污染物、富营养化物质、重金属、有毒有机物等。总之,降雨径流污染过程复杂,污染源种类繁多,区域分异特点明显。

美国国家环保署(EPA)把城市降雨径流列为导致全美河流、湖泊污染的第三大污染源,城市雨水径流对河流污染的贡献比占9%,129种重点污染物中约有50%在城市径流中出现(USEPA,1995;汪慧贞和李宪法,2002);在一些州,城市径流和其他非农业的面源被列为主导污染源,城市水体BOD年负荷有40%~80%来自雨水径流(Dikshit and Loucks,1996;Marshall and Jaime,2001)。我国90%以上城市水体污染严重,很多城市水体有黑臭或水华现象发生,严重影响社会经济可持续发展(尹澄清,2006)。北京和上海城区雨水径流污染占水体污染负荷的10%~20%(中心区域超过50%);北京市路面、屋面雨水径流中TSS、COD、TP、TN、Pb、Zn等污染物指标也高于美、法、德等国家(车伍等,2003)。西安城市主干道SS、COD的EMC中值远大于《污水综合排放标准》三级标准(陈莹等,2011)。另外,城市化进程改变了原有的水文循环,使降雨入渗量大大减少,雨洪峰

值增加,汇流时间缩短,导致城市雨洪危害加剧,水涝灾害频发。同时,缺水已经成为制约我国城市,特别是旱区城市经济社会发展的一个瓶颈因素(胡继连等,2009)。

可见,城市化导致的城市地表径流污染和城市内涝等危害是相当大的。研究城市降雨径流污染过程(即研究城市地表径流污染的特性、排污规律等)以及防治措施已经成为城市水环境问题研究的重要内容。

城市非点源污染控制与城市雨水收集利用二者并不是独立的两个个体,发达国家将二者紧密结合,已经取得了一些成果。联邦德国早在 20 世纪 80 年代就已经开始了针对雨水利用方面的课题研究,并把此作为 90 年代控制水污染的三大课题之一。他们利用天然的和人工的设施来对雨水进行截留处理,不仅可以减少地面的径流量,还可减轻对城市雨水排水管网的压力,在一定程度上,还可以减轻污水处理厂的负荷,降低洪涝灾害频率(李志强和李泽琴,2008)。与此同时,美国和一些欧洲国家也相继效仿德国,逐步转变过去单纯解决雨水排放问题的观念,认识到雨水对城市的重要性。首先考虑雨水的截留、储存、回灌、补充地表和地下水源,还制定了相应的法规,限制雨水的直接排放与流失,并收取雨水排放费(徐晓辉等,2009)。基本与德国同一时间,日本在 80 年代也提出“雨水流出抑制型下水道”,采用各种渗透设施截留雨水或收集利用,做了大量的研究和示范工程,并纳入国家下水道推进计划,在政策和资金上给予支持(李俊奇等,2010)。

长期以来,我国对东中部城市(如上海、武汉等)降雨径流污染规律及其控制开展了一些研究;而对西北地区城市的相关研究很少,而且现有研究成果缺乏全面性和系统性。众所周知,西北地区城市由于水文过程、人类活动等与其他城市差异显著,地表径流污染过程有其自身特点。因此,有必要加强西北地区城市非点源污染规律和控制技术的研究,以满足西北地区城市水污染控制的需要。本书拟以我国西北地区典型资源型缺水、生态环境脆弱型城市西安市为研究背景,通过现场降雨径流监测、试验研究与理论分析,研究西安市城区降雨径流污染特征,两种典型控制技术(多级串联人工湿地、生物滞留技术)对城市地表径流量、水质的调控效果与规律,建立净化效果与主要影响因素之间的定量关系;同时以西安市片区为例,对低影响开发措施设置后的效果进行模拟。以此为西安市以及类似地区城市面源污染防治的生态工程措施的设计、应用和推广提供科学依据和理论支撑,实现环境效益、景观效益和经济效益的有机统一,同时推动人工湿地、生物滞留技术在我国雨水净化与利用方面的发展。

## 1.2 国内外研究进展

### 1.2.1 城市降雨径流污染过程研究进展

由于非点源污染来源的复杂性、发生时间的不确定性、排放污染物的偶然性和随机性等特点,使其研究较为困难。国外 20 世纪 70 年代就开始了城市非点源污染的研究,研究内容全面,包括计算模型、降雨径流初始冲刷以及径流污染的治理与控制等(Kyehyun et al., 1993; Jefferies et al., 1999; Chiew and McMahon, 1999; Kim et al., 2007; Chen and Barry, 2007; Bakri et al., 2008; May and Sivakumar, 2009; Eckley and Branfireun, 2009; Park et al., 2009; 杨寅群等, 2008)。早期的城市非点源研究,主要是以土地利用对

河流水质产生影响的认识为基础,对降水径流污染特征、影响因子、单场暴雨和长期平均污染负荷输出等方面进行研究,其具体的研究方法是根据统计分析建立模型,进而建立污染负荷与流域土地利用或径流量之间的统计关系(Haith,1976)。利用数学模型模拟城市径流非点源污染的形成是研究非点源污染来源和扩散的有效手段,70年代中后期,随着人们研究的深入和对城市非点源污染的了解,机理模型和连续时间序列响应模型成为模型开发的主要方向,重要的模型有暴雨洪水管理模型(SWMM)、储存处理与溢流模型(STORM)、统一运输模型(UTM)以及流域模型 ANSWERS 和 HSP 等(杨爱玲和朱藏明,1999)。这些模型的建立使得城市径流非点源污染的研究得到进一步的发展。到了80年代,美国农业部(USDA)研究所开发的化学污染物径流负荷和流失模型,采用 SCS 水文模型来计算暴雨径流(胡雪涛等,2002),并且充分考虑了污染物在土壤中的物理、化学形态和分布状况(Mccuen,1982),为城市降雨径流污染负荷模型的发展提供了很好的经验。到80年代末,非点源污染模型在建立新的应用模型的基础上,重点加强了 3S (GIS、GPS、RS)技术在非点源污染负荷定量计算、管理和规划中的应用研究。这一时期最突出的成果是 GIS 软件开发并用于潜在的非点源污染的三维图形输出(Gilliland et al.,1987)。进入90年代,城市径流非点源污染的研究取得很大进展,研究的领域也在不断地扩大。在对过去城市径流非点源污染模型多年应用经验进行总结的基础上,不断地完善和提高已经建立的模型,例如城市地表径流大肠杆菌数学模型(Canale et al.,1993),例如把 HRU 和 GRU 方法运用到洪水预报水文模型中(Leon et al.,2001),推出新的模型。与此同时,由于计算机技术的飞速发展和 3S 技术在流域研究中的广泛应用,为城市非点源污染的研究提供了很大的方便,开发出许多功能超大的流域模型,这些模型具有空间信息处理、数据库技术、数学计算、可视化表达等功能和特点,提高了模型的模拟精确度。经过30多年的研究,城市非点源污染模型逐步从统计模型过渡到机理模型和连续时间序列响应模型,这些模型不仅从城市本身的特性出发,而且采用农业非点源污染研究的经验,借鉴其参数和子模型,如水文子模型、侵蚀子模型和污染物迁移子模型等,其应用范围从小区域逐步扩大到整个城市河网水系,从单次暴雨扩大到了长期连续模拟,3S 技术的应用使得城市非点源模型的应用性和精度得到了很大的提高(温灼如等,1986)。

我国的非点源污染研究起始于20世纪80年代,相继在北京市、苏州市、天津于桥水库流域、四川沱江、云南滇池等地开展了城市非点源污染负荷的研究(李怀恩,1996)。而城市降雨径流污染负荷模拟模型主要从3个方面展开研究,即径流量与污染负荷相关分析(吴林祖,1987)、水量单位线(温灼如等,1986)、污染物负荷的研究以及地表物质累积规律(夏青,1982)。通用土壤流失方程首次在我国用于非点源污染的危险区域识别研究(宋枫等,1988)。进入90年代后,施为光(1993)按降雨强度以不同的雨强计算城区径流污染负荷,为城市径流污染负荷定量计算提供了新的研究方法。方红远(1998)提出了城市径流质量分析中污染物集聚、冲洗模型参数的率定法,使得模型在应用中的精度得到了提高,实用性增强。陈西平(1993)在夏青提出的地表物质累积规律的基础上,对城市流域非点源污染模型进行了完善,提高了模拟的精度。李怀恩(2000)提出了一种简单实用的流域非点源污染负荷估算方法——平均浓度法,可以利用有限的资料计算出多年平均或不同频率代表年的年负荷量。刘爱蓉(1990)于1990年对南京市城北地区暴雨径流污染的研究,主要测试了雨水中污染物的浓度,预测了排污负荷。车伍等(2001,2002)于1999~

2001 年研究发现城区屋面雨水径流尤其是初期径流的污染物浓度较高,主要污染物为 COD 和 SS,沥青油毡屋面初期雨水中 COD 浓度可高达上千毫克每升。赵剑强(2002)对公路路面径流的污染特性、排污规律及其与汽车交通的关系进行了研究。随着 GIS 技术 在城市非点源研究中的应用大大地推进了非点源污染的量化工作,提高了城市非点源污染负荷模型模拟的精度,扩大了应用范围(王少平等,2002)。

### 1.2.2 管理与控制研究进展

城市非点源污染的管理和控制研究集中于污染源和汇的管理和控制。其研究途径包括两个方面:一是将非点源污染物的排放控制在最低限度;二是对污染物扩散途径的控制。这两方面的研究成果以美国的“最佳管理措施”BMPs(best management practices)和 低影响开发(low impact development)最具有代表性。

BMPs 它起源于 20 世纪 70 年代后期,发展于 80 年代初期,成型于 80 年代中后期。美国环保局(USEPA)将 BMPs 定义为“任何能够减少或预防水资源污染的方法、措施或 操作程序,包括工程、非工程措施的操作与维护程序”(代才江等,2009),可以简单理解为: 能够削减或控制非点源污染的一切工程与非工程性措施,是一系列 BMP 的组合。①工 程性措施是通过工程设施或工程手段来控制 and 减少暴雨径流的排放量,以及减少污染物 在径流中的浓度和总量,它主要是在径流的流动过程中采取某种措施(赵建伟等,2007)。 例如,修建人工湿地、沉淀池、渗漏坑、多孔路面、蓄水池和处理污染的建筑物等,这些方法 对控制径流污染有很好的效果(Greb,1997;Matthews et al.,1997)。利用土壤过滤城市 雨水也是现在发达国家的控制措施之一。对现有排水系统,可采取的污染控制措施主要 有:雨水截留井、线内储存和线外储存,它们对分流制系统的雨水和合流制系统的污染控 制都适用(施为光,1993)。②非工程措施指用加强管理来达到控制污染的目的,它强调源 头控制、强调自然与生态措施、强调非工程方法。例如,分流制小区域水处理,增大城市绿 化面积,清扫街道,对施工现场、机修厂、停车场废弃物进行科学管理,控制城市绿地肥料、 农药的使用等。

LID 措施于 20 世纪 90 年代发源于美国马里兰州,主要采用分散、多样、小型、本地化 的技术从源头上储存、渗滤、蒸发以及截留雨水,最大限度保护开发改造地区的水文机制, 减少负面环境影响,其主要包括生物滞留(bio-retention)、绿色屋顶(green roof)、可渗透/ 漏路面铺装系统(peameable/porous pavement system,PPS)等措施(孙艳伟等,2011),均 是通过减少不透水面积、增加雨水渗滤、利用雨水资源,实现可持续雨洪管理(刘保莉和曹 文志,2009)。其中生物滞留技术目前较流行,其净化水质效果在美国及其他发达国家得 到广泛认同和应用,但在国内尚属新兴课题(孟莹莹等,2010)。

如前所述,德国、美国、日本等发达国家在城市非点源污染控制与雨水利用的结合上 做了大量工作(李志强和李泽琴,2008;徐晓辉等,2009;李俊奇等,2010;车伍等,1999)。 近年来,我国在上海、武汉、苏州等城市分别开展了一些控制非点源污染的工程实践。针 对非点源污染问题,上海市逐步完善并加紧落实城市非点源污染综合管理方案,以解决城 区非点源源污染控制问题(林莉峰等,2006)。武汉汉阳地区进行了城市非点源源污染控 制技术与工程示范的工程实践(倪艳芳,2008;尹澄清等,2009),非点源污染控制工程运行 正常,处理效果良好。苏州市通过调查城市非点源污染的水质特征,将生态集雨沟、植被

护坡、草沟和植被过滤带应用于城市的非点源污染控制。但是,由于非点源污染的复杂性,除水质问题外,还需考虑暴雨径流量。控制污染由单一的 BMP 难以实现,必须结合多种 BMPs。只有将非点源污染经过一连串的 BMP 单元,包括污染防治、源头控制、污染处理等方式,才能发挥 BMP 的功效,削减苏州市非点源污染(杨勇和操家顺,2007)。

1.2.3 人工湿地研究进展

人工湿地(constructed wetlands)是一种模拟自然湿地的人工生态系统,它由人工建造和监督控制、类似沼泽地的地面,由水、基质、植物、水生动物及其微生物群落五部分组成(宋志文等,2003);利用基质-微生物-植物这个复合生态系统的物理、化学和生物的重重协调作用,通过过滤、吸附、共沉、离子交换、植物吸收和微生物分解来实现对污水的高效净化,同时通过营养物质和水分的生物化学地球循环,促进绿色植物生长,使其增产,实现废水的资源化与无害化。按污水在湿地床中流动方式,人工湿地可分为三种类型(王平和周少奇,2005):表面流湿地(surface flow wetlands, SFW)、潜流湿地(subsurface flow wetlands, SSFW)和垂直流湿地(vertical flow wetlands, VFW)。

1. 人工湿地的净化机理

1) 氮的去除机理

湿地中氮主要以有机氮、氨氮、硝氮及亚硝氮四种形式存在。湿地对污水中氮的去除主要是通过植物和填料对污水中含氮化合物的吸附、过滤、微生物的硝化与反硝化作用、氮自身的物理挥发作用等。

作为植物生长的重要元素,污水中的无机氮(氨氮、硝氮)可以直接被湿地植物吸收,作为营养物质并参与光合作用,合成自身的细胞物质,通过收割从湿地系统中去除。但植物吸收去除的氮所占的比例还不到总氮的 20%。主要的途径是通过微生物的硝化-反硝化作用,因为硝化细菌、反硝化细菌和氨化细菌对植物根部以及附近的溶氧微环境极为敏感,非常有利于一系列转化的进行,如图 1-1 所示(王平和周少奇,2005)。

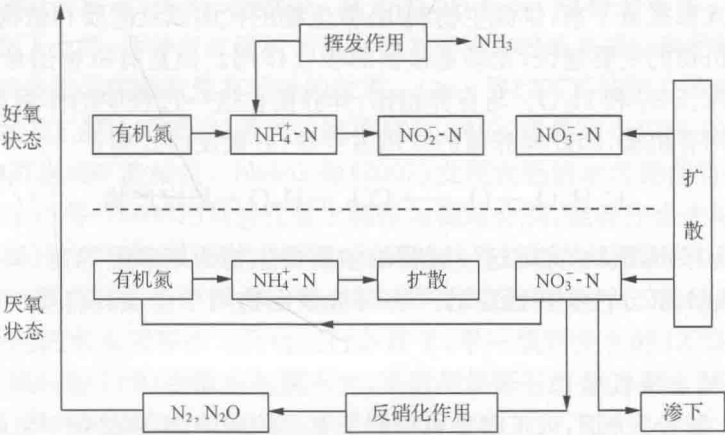


图 1-1 湿地中氮的形态

## 2) 磷的去除机理

在人工湿地中,基质、植物、微生物的协同作用,是去除磷的主要方式。磷循环不仅发生在颗粒物和溶解物之间,在无机态( $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}$ 、 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ )和有机态之间也有循环,因湿地中大部分磷在有机泥炭中,落叶层和污泥层中,所以主要的循环发生在沉淀物中;植物本身可以通过吸附作用去除磷,不同的植物及不同的植物部位对磷的去除能力不相同。另外对湿地植物的收割频度也会影响对磷的去除率;很多微生物(如聚磷菌)可以大量累积有机磷,最终将其分解为无机磷酸盐,使磷得以去除。如图 1-2 所示(戴兴春等,2004; Watson et al., 1989)。

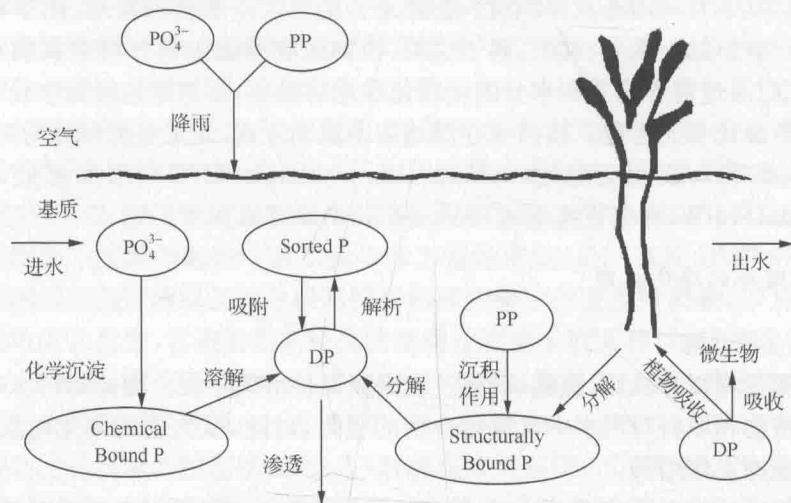


图 1-2 湿地中磷的迁移转化

PP: 颗粒磷; DP: 溶解性磷;  $\text{PO}_4^{3-}$ : 正磷酸盐

## 3) 有机物的去除机理

人工湿地对有机物的去除效果是显著的,不溶性有机物可通过沉降、植物拦截、土壤过滤等作用方式被截留下来,供微生物利用;微生物的代谢以及基质和植物的吸收则是去除溶解性的有机物的主要途径,尤其是植物的吸收作用。但是有机物的最终归宿是微生物体的自身物质、 $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。与自养相比,异养菌在这一过程中的作用更大一些,因为其可以直接利用有机碳,因此异养菌的作用占主导,好氧反应式为:



式中, ( $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$ ) 为有机物,完成这一过程的主要微生物为好氧异养菌,将有机物最终转化为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ,部分性质较稳定的产物则被微生物用于合成其自身的细胞(刘思瑶, 2010)。

## 4) 重金属的去除机理

最近几年,在工业方面,人工湿地也得到了充分的利用,主要是用于工业废水的处理。该类废水有一个典型的特点就是含有较高浓度的重金属,这使得人工湿地系统的流动性特点得到了充分发挥,因为流动的水相可以有效地去除重金属,如 Hg、Cd、Cr、Pb、As 等,它们都可以与湿地系统中的各种无机配位体合成配合物或不溶性的沉淀物,其中 pH 对

这一过程的影响较明显,如 Hg,在 pH 较低时,更容易发生沉淀作用,而 Cd 在此时更易被溶解,相反在 pH 较高时,Cd 更易发生沉淀。

在种植有根系发达的水生植物的湿地系统中,根系周围氧气含量较充足,其形成的高活性根区网络系统和浸水凋落物可以减缓废水在系统中的流动速度,这样更利于废水中悬浮物的沉降和金属离子的去除。此过程中,植物的作用非常明显,可以通过吸收、代谢、累积作用,对 Al、Fe、Ba、Cd、Co、B、Cu、Mn、Pb、V、Zn 等富集,且这种作用与植物的长势情况和种植密度成正比。例如,宽叶香蒲植物的根、茎、叶中重金属的含量都很高,可知它们具有极强的吸收和富集重金属能力,且各种植物的不同部分(如根、茎、叶等)对重金属的富集程度都是不一样的(Greenway,1997;Ye,1992;Greenway,1999)。

## 2. 国内外的人工湿地研究概况

在西方发达国家,由于对雨水资源化的认识较早,人工湿地作为一种暴雨径流资源化的生态工程措施得到了较多的研究和应用,并被证明效果良好。我国由于对雨水资源化认识较晚,虽也取得一定成果,但与国际先进水平相比,无论是在理论研究的深度、广度上,还是在控制管理的实践上,都存在较大的差距(汪俊三,2009a,2009b;崔理华,2009;李文奇,2009;王世和,2007;吴振斌,2008)。人工湿地的国内外研究进展、发展趋势及存在的主要问题如下。

虽然人类很早就有运用湿地处理污水的现象,但世界上公认的第一处用于污水处理的人工湿地是 1903 年建在英国约克郡 Earby 的湿地系统(Johansson et al.,2003),它连续运行到 1992 年。首例采用人工湿地净化污水的实验是在 1953 年由联邦德国 MaxPlanck 研究所的 Seidel 博士进行的,他证明了芦苇能有效地去除无机和有机污染物并且可以吸收、去除水中的重金属(于荣丽等,2006)。随后,1977 年,Seidel 与 Kickuth 合作并由 Kickuth(1977)提出了根区法理论(the root-zone method)。其后人工湿地作为新型的污水处理技术真正在世界各地受到重视并被运用,其相关研究逐渐增多。

基质是湿地植物和微生物赖以生存的基础。国外对人工湿地质基质的研究较多,常用的基质主要有沸石、页岩、砾石、粉煤灰、高炉渣、石灰石、沙和土壤等。Sakadevan 等(1998)比较研究了土壤、两种工业废料和沸石作为潜流型湿地质基质除磷的可行性,发现基质中氧化物铁铝含量与磷吸附量有显著的关系。Gray 等(2003)的研究表明,以钙化海藻为基质的潜流型人工湿地系统,对磷的去除率高达 98%,明显高于以砾石作基质时的情况,去除效果和页岩或矿渣相当。Nobak 等(2005)发现含铝给水污泥能有效吸附磷及改善土壤特性。Drizo 等(2004)用页岩代替土壤作为湿地介质,能够完全去除氨氮,并且能够去除 85%~95%的硝酸盐。国内学者对不同的基质材料的去除效果做了大量研究。汤显强等(2007)选取页岩、粗砾石、铁矿石、麦饭石及其组合作为人工湿地填料,小试研究结果表明:在相同进水水质和水力负荷运行条件下,单一填料页岩的 COD、TN、TP 去除效果最好,组合填料的 COD 去除率差别不大,页岩与粗砾石组合的 TN、TP 去除率较高。李怀正等(2007)对几种经济型人工湿地质基质的除污效能进行了研究分析,得出钢渣和煤灰渣对出水 pH 的影响较大,基质粒径越小则对 SS 的去除效果越好;对有机物去除效果的高低顺序为:沙子>煤灰渣>瓜子片>砾石>钢渣>高炉渣;对氨氮去除效果的高低顺序为:沙子>煤灰渣>瓜子片>高炉渣>砾石>钢渣;6 种基质对 TP 都有较好的去除效