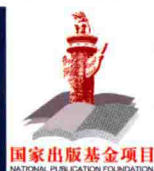


“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

# 暴雨径流管理模型理论及其应用 ——以SWMM为例

刘家宏 陈根发 王海潮 陈向东 卢路等编著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

# 暴雨径流管理模型理论及其应用 ——以SWMM为例

刘家宏 陈根发 王海潮 陈向东 卢路等编著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统介绍了暴雨径流管理模型 SWMM 的原理、发展历程和操作方法。以北京香山地区、亦庄地区和东升园小区为对象,详细阐述了 SWMM 模型构建、参数率定、水文分析计算等实际应用中的具体操作过程。本书参阅并翻译了 SWMM 的用户手册,并加入了案例研究中的经验和体会,深入浅出,具有一定的科学理论价值和较强的可操作性。

本书既可以作为初学者学习 SWMM 的入门教材,也可作为暴雨洪水科研人员、政府市政管理部门的参考材料。

### 图书在版编目(CIP)数据

暴雨径流管理模型理论及其应用:以 SWMM 为例 / 刘家宏等编著.  
—北京:科学出版社,2015.9

(海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-045570-3

I. 暴… II. 刘… III. 暴雨—水文模型—研究 IV. P331.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 200281 号



责任编辑:李 书 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:肖 芳 / 封面设计:王 浩

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 9 月第一次印刷 印张:14 插页:2

字数:980 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

国家自然科学基金项目 (51522907, 51279208, 51409275)

中国工程院重大咨询项目 (2015-ZD-07)

资助

国家重点基础研究发展计划(973计划)项目 (2006CB403400)

# 总 序

流域水循环是水资源形成、演化的客观基础，也是水环境与生态系统演化的主导驱动因子。水资源问题不论其表现形式如何，都可以归结为流域水循环分项过程或其伴生过程演变导致的失衡问题；为解决水资源问题开展的各类水事活动，本质上均是针对流域“自然-社会”二元水循环分项或其伴生过程实施的基于目标导向的人工调控行为。现代环境下，受人类活动和气候变化的综合作用与影响，流域水循环朝着更加剧烈和复杂的方向演变，致使许多国家和地区面临着更加突出的水短缺、水污染和生态退化问题。揭示变化环境下的流域水循环演变机理并发现演变规律，寻找以水资源高效利用为核心的水循环多维均衡调控路径，是解决复杂水资源问题的科学基础，也是当前水文、水资源领域重大的前沿基础科学命题。

受人口规模、经济社会发展压力和水资源本底条件的影响，中国是世界上水循环演变最剧烈、水资源问题最突出的国家之一，其中又以海河流域最为严重和典型。海河流域人均径流性水资源居全国十大一级流域之末，流域内人口稠密、生产发达，经济社会需水模数居全国前列，流域水资源衰减问题十分突出，不同行业用水竞争激烈，环境容量与排污量矛盾尖锐，水资源短缺、水环境污染和水生态退化问题极其严重。为建立人类活动干扰下的流域水循环演化基础认知模式，揭示流域水循环及其伴生过程演变机理与规律，从而为流域治水和生态环境保护实践提供基础科技支撑，2006年科学技术部批准设立了国家重点基础研究发展计划（973计划）项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”（编号：2006CB403400）。项目下设8个课题，力图建立起人类活动密集缺水流域二元水循环演化的基础理论，认知流域水循环及其伴生的水化学、水生态过程演化的机理，构建流域水循环及其伴生过程的综合模型系统，揭示流域水资源、水生态与水环境演变的客观规律，继而在科学评价流域资源利用效率的基础上，提出城市和农业水资源高效利用与流域水循环整体调控的标准与模式，为强人类活动严重缺水流域的水循环演变认知与调控奠定科学基础，增强中国缺水地区水安全保障的基础科学支持能力。

通过5年的联合攻关，项目取得了6方面的主要成果：一是揭示了强人类活动影响下的流域水循环与水资源演变机理；二是辨析了与水循环伴生的流域水化学与生态过程演化的原理和驱动机制；三是创新形成了流域“自然-社会”二元水循环及其伴生过程的综合

模拟与预测技术；四是发现了变化环境下的海河流域水资源与生态环境演化规律；五是明晰了海河流域多尺度城市与农业高效用水的机理与路径；六是构建了海河流域水循环多维临界整体调控理论、阈值与模式。项目在 2010 年顺利通过科学技术部的验收，且在同批验收的资源环境领域 973 计划项目中位居前列。目前该项目的部分成果已获得了多项省部级科技进步一等奖。总体来看，在项目实施过程中和项目完成后的近一年时间内，许多成果已经在国家和地方重大治水实践中得到了很好的应用，为流域水资源管理与生态环境治理提供了基础支撑，所蕴藏的生态环境和经济社会效益开始逐步显露；同时项目的实施在促进中国水循环模拟与调控基础研究的发展以及提升中国水科学研究的国际地位等方面也发挥了重要的作用和积极的影响。

本项目部分研究成果已通过科技论文的形式进行了一定程度的传播，为将项目研究成果进行全面、系统和集中展示，项目专家组决定以各个课题为单元，将取得的主要成果集结成为丛书，陆续出版，以更好地实现研究成果和科学知识的社会共享，同时也期望能够得到来自各方的指正和交流。

最后特别要说的是，本项目从设立到实施，得到了科学技术部、水利部等有关部门以及众多不同领域专家的悉心关怀和大力支持，项目所取得的每一点进展、每一项成果与之都是密不可分的，借此机会向给予我们诸多帮助的部门和专家表达最诚挚的感谢。

是为序。

海河 973 计划项目首席科学家  
流域水循环模拟与调控国家重点实验室主任  
中国工程院院士



2011 年 10 月 10 日

# 序

在全球气候变化和局部高强度人类活动的双重影响下，全球范围内暴雨发生概率呈显著增加的趋势。近 50 年来的观测事实表明，虽然最大 1d、3d 雨量增减不明显，但短历时暴雨的强度增加，极端降水日数也在增加。据日本气象厅对 1460 个雨量观测站 1976 ~ 2007 年逐小时降雨量资料的分析发现：1998 ~ 2007 年序列相比 1976 ~ 1987 年系列，降水大于 200mm 的降水日数增加了 50%，降水大于 400mm 的降水日数增加了 100%。暴雨事件的增加并叠加城市化的水文畸变效应，导致我国城市内涝频发，“城市看海”现象屡屡上演。为强化我国城市洪涝灾害的综合管理和应急能力，急需开展城市复杂下垫面的产汇流机理和雨洪模拟研究，提高预警预报精度和预见期。

暴雨径流管理模型（SWMM）是一个基于水动力学的综合性城市径流模拟系统，由美国环境保护署（Environmental Protection Agency, EPA）在 20 世纪 70 年代组织研发。经过 40 多年的不断发展和持续改进，先后推出了 SWMM 1（1971 年）、SWMM 2（1975 年）、SWMM 3（1981 年）、SWMM 4（1988 年）、SWMM 5（2004 年）等多个版本。2014 年，EPA 推出了 5.1 版本，该版本在 SWMM 5 的基础上，新增了低影响开发（Low Impact Development, LID）的情景模拟功能。SWMM 5.1 以 Windows 为运行平台，具有友好的可视化界面和更加完善的处理功能，可以对研究区域输入的数据进行编辑，模拟城市水文过程、管网水动力学过程和水质演变过程，并可用多种形式对结果进行显示，提供计算结果的时间序列曲线、图表以及统计频率分析结果等。SWMM 丰富的功能和免费开源的特点，赢得了世界范围内城市水文与水务工程领域工程师和研究人员的青睐，在雨洪模拟、水质模拟和低影响开发效果评估等方面得到了广泛的应用。

该书以国家重大基础研究计划（973 计划）“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”、工程院重大咨询项目“我国城市洪涝灾害防治策略与措施研究”、国家自然科学基金项目等一系列项目为依托，搜集整理了大量的中英文文献资料，从发展历程、模型原理、系统构建等方面系统介绍了 SWMM 模型及其详细的操作流程，归纳总结并集中展示了作者及其研究团队在 SWMM 原理和模拟应用分析上取得的成果。具体的，在模型原理层面，详细介绍了 SWMM 模型原理及系统自带计算实例的计算过程；在应用案例层面，进行了城郊低山丘陵区、具有独立排水系统平原城区、典型高密度城市小区三类地区的

模拟和定量评价应用。特别指出,北京香山地区的应用案例在无排水管网铺设(排水以道路为主),且下垫面、降雨径流等基础资料缺乏的地区进行模拟,取得了较为理想的模拟效果,有别于以往 SWMM 在高度城市化地区的应用,为 SWMM 开拓了更为广阔的应用空间。

SWMM 模型在世界各地的应用过程中,也显现出一些局限和不足。例如:①单元划分依赖于排水管网,在管网资料缺乏地区的应用受到一定限制;②模型原理偏重于水动力学,水文过程机理考虑不全面,没有蒸散发模块;③地表地下耦合方面考虑不足;等等。该书的出版对增强城市水文研究人员和水务工程师对 SWMM 的系统认识,全面理清 SWMM 的优势和不足,明确 SWMM 的改进方向,加深 SWMM 在我国的适应性和本地化研究具有重要而深远的意义。

该书理论基础扎实、逻辑结构清晰、内容丰富、深入浅出,可作为暴雨径流管理模型(SWMM)研究的入门教材,特向各位从事城市洪涝管理和研究的科研人员推荐。衷心希望通过该书的介绍和推广,能够增进水文研究工作者对城市暴雨径流过程的认知,提高我国城市洪涝灾害的综合应对能力。

中国工程院院士  
南京水利科学研究院院长

张健云

2015年6月

# 前 言

我国城市化正在如火如荼地进行,城市的数量、规模越来越大,人口、经济的密集程度增加。由于城市排水管网规划与城市化进程不相适应、城市自然水面被填埋占用等一系列的原因,我国地不分南北、城不分大小,一旦发生暴雨,城市内涝就相当严重,给城镇居民生命财产安全带来巨大的威胁,甚至影响社会安定。

暴雨径流模拟可为治理城市内涝提供重要的技术支撑。现有技术、经济条件下,城市排水系统的建设和完善难以在短期内见效,而暴雨径流模拟则可为内涝防控提供决策依据。通过城市暴雨径流模拟可以识别城市排水系统的薄弱环节,分析天然和人工排水系统各自的特点和作用,为城市排水调度和管网设计优化提供决策依据,从而提高城市应对暴雨洪涝的能力。

SWMM (Storm Water Management Model) 是一款应用非常广泛的暴雨径流模拟软件,其核心基于动态的降水-径流模拟模型,主要用于模拟城市单一场次降水事件或长期的水量/水质模拟。作为国家重点基础研究发展计划(973计划)“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”的一项应用性成果,课题一“海河流域二元水循环模式与水资源演变机理”负责人秦大庸教授等组织课题组成员翻译了SWMM模型的说明书 *STORM WATER MANAGEMENT MODEL USER'S MANUAL VERSION 5.1* 及模型相关的应用实例,为本课题模拟计算海河流域城市化过程中的水循环演变、城市水文过程研究提供了有益借鉴。项目组翻译的技术文档得到了软件开发者魁北克大学 William James 教授的授权,被采纳为SWMM模型的中文说明书。

中国水利水电科学研究院组织翻译的中文说明书在网络上大受欢迎,在百度文库、豆丁文库、道客巴巴等文档共享网站均提供了下载链接,成为学习SWMM模型最基础、广受欢迎的中文教材。有鉴于此,为方便广大研究或使用SWMM模型的科研和技术人员查阅学习,海河“973”课题组特编纂了本书。考虑到初学者的实际需求,本书在中国水利水电科学研究院翻译的中文说明书的基础上,增加了中国典型城市内涝的实际情况和SWMM在北京典型区域实际应用案例。

本书共分为8章,较为系统地介绍了我国城市内涝概况及暴雨径流数值模拟的重要性、SWMM模型的原理、操作及应用实例。第1章介绍了我国城市内涝概况、形成原因、

治理措施及理念等；第2章介绍了 SWMM 模型的研究进展、局限性及与城市雨洪模型的对比分析；第3章介绍了 SWMM 模型结构、操作界面、模型原理及操作步骤；第4章基于 SWMM 模型计算实例翻译而成，部分内容进行了适当的调整；第5章介绍了 SWMM 模型在北京山区地貌典型单元——香山地区的实际应用；第6章介绍了 SWMM 模型在北京平原地貌典型单元——北京亦庄地区的实际应用；第7章介绍了 SWMM 在典型的房地产开发小区、不透水面积比例高地区的实际应用；第8章对 SWMM 模型应用做了总结和展望。

本书在重点基础研究发展计划（973 计划）“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”，国家自然科学基金优秀青年基金（51522907）、面上项目（51279208）、青年项目（51409275），工程院重大咨询项目“我国城市洪涝灾害防治策略与措施研究”的共同资助下，由中国水利水电科学研究院、中国国际工程咨询公司、北京市水科学技术研究院、河北工程大学、长江水资源保护科学研究所等单位的科研人员编写而成，具体人员如下：第1章，陈根发、陈似蓝、付潇然、王开；第2章，王海潮、宋翠萍、陈向东、王开、刘家宏；第3章，卢路、高学睿、陈根发、尹炜、张君、魏素洁；第4章，陈向东、刘家宏、高学睿、王开、徐鹤、刘淼；第5章，王海潮、宋翠萍、陈向东、王开；第6章，王海潮、刘家宏、付潇然、栾清华；第7章，陈根发、梁云、刘家宏、王开；第8章，刘家宏、陈根发。全书由刘家宏、陈根发、栾清华统稿。

本书在编写过程中得到了中国工程院王浩院士、中国水利水电科学研究院水资源研究所各位领导的大力支持。中国水利水电科学研究院、北京市水科学技术研究院、河北工程大学等单位的专家对书稿提出了宝贵的意见，在此一并感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者不吝批评赐教。

作 者

2015 年 5 月

# 目 录

总序

序

前言

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 中国城市内涝概况 .....            | 1  |
| 1.1 城市内涝概念 .....                | 1  |
| 1.2 城市内涝原因 .....                | 2  |
| 1.3 城市内涝典型案例 .....              | 6  |
| 1.3.1 北京市 2012 年“7·21”涝灾 .....  | 6  |
| 1.3.2 北京市 2011 年“6·23”涝灾 .....  | 7  |
| 1.3.3 广州市 2010 年“5·7”暴雨洪涝 ..... | 7  |
| 1.4 城市排涝典型案例 .....              | 8  |
| 1.4.1 江西省赣州市 .....              | 8  |
| 1.4.2 山东省青岛市 .....              | 8  |
| 1.4.3 福建省福州市 .....              | 8  |
| 1.4.4 江西省景德镇市 .....             | 9  |
| 1.4.5 广西壮族自治区南宁市 .....          | 9  |
| 1.5 城市内涝治理的主要措施和理念 .....        | 10 |
| 1.6 暴雨径流模拟的重要性 .....            | 13 |
| 第 2 章 SWMM 研究进展与发展趋势 .....      | 15 |
| 2.1 模型基本介绍 .....                | 15 |
| 2.2 研究进展及应用 .....               | 16 |
| 2.2.1 SWMM 应用现状 .....           | 16 |
| 2.2.2 国内外研究进展 .....             | 17 |
| 2.3 SWMM 局限性 .....              | 21 |
| 2.4 发展趋势 .....                  | 21 |
| 2.4.1 SWMM 衍生模型 .....           | 21 |
| 2.4.2 SWMM 应用展望 .....           | 23 |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 2.5 模型对比分析 .....               | 24        |
| <b>第3章 SWMM 模型、原理及操作</b> ..... | <b>26</b> |
| 3.1 SWMM 模型及功能 .....           | 26        |
| 3.2 SWMM 模型模拟能力与模拟原理 .....     | 27        |
| 3.2.1 模型模拟能力 .....             | 27        |
| 3.2.2 水文过程模拟原理 .....           | 27        |
| 3.2.3 水力过程模拟原理 .....           | 32        |
| 3.2.4 水质模拟原理 .....             | 35        |
| 3.3 模型界面与操作步骤 .....            | 35        |
| 3.3.1 模型界面 .....               | 35        |
| 3.3.2 模型的操作步骤 .....            | 38        |
| <b>第4章 SWMM 计算实例</b> .....     | <b>61</b> |
| 4.1 蓄满产流 .....                 | 61        |
| 4.1.1 问题阐述 .....               | 61        |
| 4.1.2 系统代表性 .....              | 63        |
| 4.1.3 模型设置——未开发区域 .....        | 65        |
| 4.1.4 模型计算结果——未开发区域 .....      | 69        |
| 4.1.5 模型设置——开发后区域 .....        | 72        |
| 4.1.6 模型计算结果——开发后区域 .....      | 75        |
| 4.1.7 小结 .....                 | 77        |
| 4.2 滞留池设计 .....                | 77        |
| 4.2.1 问题描述 .....               | 77        |
| 4.2.2 系统描述 .....               | 79        |
| 4.2.3 模型建立 .....               | 80        |
| 4.2.4 模型结果 .....               | 88        |
| 4.2.5 小结 .....                 | 90        |
| 4.3 低影响开发 .....                | 91        |
| 4.3.1 问题描述 .....               | 91        |
| 4.3.2 系统代表 .....               | 92        |
| 4.3.3 模型建立——过滤带 .....          | 93        |
| 4.3.4 模型建立——渗透沟 .....          | 98        |
| 4.3.5 模型结果 .....               | 100       |
| 4.3.6 小结 .....                 | 103       |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 4.4 地表水系统模拟 .....                    | 103        |
| 4.4.1 地表排水系统 .....                   | 103        |
| 4.4.2 地表水质模拟 .....                   | 116        |
| 4.4.3 水质净化模拟 .....                   | 131        |
| <b>第5章 SWMM 应用实例 1: 北京香山地区 .....</b> | <b>143</b> |
| 5.1 香山地区概况 .....                     | 143        |
| 5.1.1 自然地理条件 .....                   | 143        |
| 5.1.2 水文气象条件 .....                   | 144        |
| 5.1.3 河流水系条件 .....                   | 145        |
| 5.2 模型适用性分析 .....                    | 146        |
| 5.3 模型构建 .....                       | 146        |
| 5.3.1 排水系统概化 .....                   | 146        |
| 5.3.2 汇水区域概化 .....                   | 147        |
| 5.3.3 参数及断面设置 .....                  | 149        |
| 5.4 参数率定 .....                       | 156        |
| 5.5 结果分析 .....                       | 158        |
| <b>第6章 SWMM 应用实例 2: 北京亦庄地区 .....</b> | <b>159</b> |
| 6.1 亦庄地区概况 .....                     | 159        |
| 6.1.1 地理条件 .....                     | 159        |
| 6.1.2 水文气象条件 .....                   | 162        |
| 6.1.3 地质与土壤 .....                    | 163        |
| 6.2 数据库的建立 .....                     | 165        |
| 6.2.1 现状工作调研 .....                   | 165        |
| 6.2.2 排水区域划分 .....                   | 166        |
| 6.2.3 基础数据收集 .....                   | 167        |
| 6.2.4 数据库建设 .....                    | 167        |
| 6.3 水文分析计算 .....                     | 169        |
| 6.4 模型构建 .....                       | 171        |
| 6.4.1 子集水区域划分 .....                  | 172        |
| 6.4.2 排水系统概化 .....                   | 172        |
| 6.4.3 参数及断面设置 .....                  | 174        |
| 6.5 参数率定 .....                       | 175        |
| 6.5.1 模型初步运行 .....                   | 176        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 6.5.2 模型参数率定 .....           | 176 |
| 6.6 结果分析 .....               | 185 |
| 第7章 SWMM 应用实例3：北京东升园小区 ..... | 186 |
| 7.1 研究区概况 .....              | 186 |
| 7.2 研究背景与研究内容 .....          | 187 |
| 7.3 水文分析计算 .....             | 187 |
| 7.4 流域行洪影响分析计算 .....         | 190 |
| 7.4.1 SWMM 模型构建、率定 .....     | 190 |
| 7.4.2 建设项目对流域行洪影响计算 .....    | 193 |
| 7.5 洪水对建设项目的影晌分析计算 .....     | 195 |
| 7.5.1 排水能力计算 .....           | 195 |
| 7.5.2 内涝积水计算 .....           | 196 |
| 7.6 研究结论 .....               | 198 |
| 第8章 结论和展望 .....              | 199 |
| 8.1 模型特点及局限性总结 .....         | 199 |
| 8.2 模型推广及应用展望 .....          | 200 |
| 参考文献 .....                   | 202 |
| 索引 .....                     | 212 |

# | 第 1 章 | 中国城市内涝概况

## 1.1 城市内涝概念

城市内涝是指由于强降水或连续性降水超过城市排水能力致使城市内产生积水灾害及相关次生灾害的现象。城市内涝灾害发生时，城市交通、通信、水、电、气、暖等生命线工程系统瘫痪，社会经济活动中断，其次生灾害损失已远远超过因物质破坏所引起的直接经济损失（董立人，2011）。

城市内涝主要具有以下两个特点。①城市内涝的普遍性。城市内涝在我国比较普遍，以前主要发生在一些沿海地势低洼地区，现在内陆城市也经常发生。②城市内涝的局部高发性。城市某些特定地点的发生率较高，如立交桥底、过街地下通道、铁路桥、公路桥等。

近年来，我国城市内涝出现的频率和造成的损失呈逐年递增趋势，其带来的不利影响显而易见。突出表现在：①城市内涝带来严重的公共卫生问题，甚至疾病；因路滑造成的行人跌倒骨折，趟水时被戳伤腿脚现象明显增多；受水浸泡后引发感冒及消化系统疾病的患者数量也急剧增加（石剑荣和陈亢利，2010）。②城市内涝造成城市道路交通系统运转失灵，甚至部分瘫痪，不仅不利于出行，而且引发的交通事故也明显增加。③城市内涝引发城市水电、通信等地下线缆故障；造成市场、仓储货物被淹，甚至人身伤亡。④城市内涝可能引起社会秩序短时间的混乱恐慌（胡盈惠，2012）。

城市内涝在中国比较普遍。从发生的区域来看，以前主要发生在一些沿海地势比较低的地区，现在内陆城市也经常发生。过去城市建设用地面积小，可选择的区域比较大，一般都选择地势比较高的地区建设；而现在城市用地十分紧张，可选择的余地少。随着现代城市的建设，排水和内涝方面也出现许多新问题，如过街的地下通道、铁路桥、公路桥等地降雨后容易出现积水（于海波，2012）。

住房和城乡建设部 2010 年对 351 个城市进行的专项调研结果显示，2008 ~ 2010 年，全国 62% 的城市发生过城市内涝，其中内涝灾害超过 3 次以上的城市有 137 个，2011 年前后的情况更为严重（鞠宁松和龚坤，2012）。

2012 年 7 月 21 日，北京遭遇 61 年一遇大暴雨袭击，造成至少 77 人死亡，经济损失上百亿元。2010 年 9 月 11 日，广州市普降暴雨，全市平均降雨 63.95mm，最大降雨为 229mm。由于白云区、天河区等地 4h 内出现了强降水过程，造成广州天河区华南师范大学门口、广州大道梅花园地铁工地、白云区白云大道体育馆对面等 26 个点出现了 30 ~ 100cm 的水浸（朱明安和李颖，2011）。2011 年 6 月 23 日 16 时至 24 日 8 时，北京

市平均降雨量达到 50mm，降雨量分布不均匀，局部地区降雨量达到大暴雨标准。北京地铁 13 号线、亦庄线、1 号线 3 条地铁线被迫维持区间运行，地面 76 条公交线路受到影响，其中 34 条运营线路无法正常行驶。据北京电视台报道，这场暴雨让北京多处成为“积水潭”，3000 多辆汽车被淹，2 名帮忙推车的男子因为井盖“消失”而不慎坠入排水井中被水冲走身亡。2011 年 6 月 9 ~ 24 日，一直遭受旱灾的武汉市遭遇 5 场特大暴雨袭击，三镇主要城区平均降雨量达到 417.7mm，全市 80 多处路段严重渍水，三镇沦为一片泽国，中心城区交通几近瘫痪，严重影响市民出行。

随着近年来全球气候变暖趋势的加剧，极端暴雨天气的频率、强度也在逐年上升。入夏以来，国内许多城市遭受大范围的强降雨，城镇的雨水排水系统在应对这种天气的时候，显得疲惫无“力”，弱不经“雨”，城市内涝频发，不仅对城市居民生命、财产安全造成威胁，也严重影响了城市经济的正常发展（白璐，2012）。

## 1.2 城市内涝原因

汛期的降雨时间长、强度大、范围集中是造成城市内涝的最直接原因。

### 1. 降雨量变化

城市化运动引起城市局部降雨量增加（曾重，2013）。影响城市降雨的因素主要有 3 个：①充足的水汽供应；②气流上升达到过饱和状态；③足够的凝结核（刘茂云，2007）。首先，人类对水汽供应的影响程度不大，但是人类活动对地表植被的影响间接对水汽输送供应产生影响。随着城市化进程加快，城市人口增加，工业集中分布，交通工具剧增，建筑物及设施建设使得混凝土覆盖面增大，形成热岛效应，导致城市热力对流加强。另外，城市化后，增加了地表的粗糙度，阻碍了降雨系统的移动，延长了降雨时间，增加了降雨强度。工业及交通工具尾气的排放，增加了大气污染，使得大气中存在大量污染颗粒物，为降雨提供了充足的凝结核。

近年来，由于气候的原因，自然灾害频发，城市遭遇十年一遇甚至百年一遇的暴雨天气，降雨量大，远超过城市防洪标准，容易出现内涝（辛玉玲和张学强，2012）。

有研究表明，城市的热岛效应、凝结核效应、高层建筑障碍效应等的增强，使城市的年降水量增加 5% 以上，汛期雷暴雨的次数和暴雨量增加 10% 以上，从而增加了城市洪水和城市内涝发生的概率和风险（卢晓燕等，2013）。

城市会出现“混浊岛效应”，指的是城市市区由于厂矿企业集中、机动车辆众多、人口密集，致使排出的污染气体和空气中的尘埃等增加，使混浊程度大大高于周边地区，形成“混浊岛”，导致形成降水的现象（钟成索，2009）。

### 2. 河湖水系的调蓄能力下降

湖泊、洼地、沟塘等是天然的“蓄水容器”，具有调蓄雨水、涵养渗流等调节径流的作用。在城市的建设过程中，由于认识缺位、急于求成，未做科学的规划和论证，盲目整

平洼地、填筑沟塘、挤占湖泊，人为破坏导致了湖泊等天然“蓄水容器”容量急剧减少，调蓄雨水的能力减弱（黄泽钧，2012）。

由于人类活动的影响，河湖污染严重，生态社会功能被破坏，调蓄能力急剧下降。同时，打破了城市原本所具有的自然排水系统，下游排水不畅，引起上游积水。河流和湿地的蓄水渗水作用丧失后，暴雨来临，造成地表径流量大大增加，给地表排水造成很大压力（鞠宁松和龚坤，2012）。

许多城市在建设中，因缺乏科学论证而盲目填水挖山，导致不少作为排洪命脉的河道被填平，具有蓄水作用的湿地被开发，建成楼房和道路，原有的自然水系遭到破坏，使得区间暴雨产生的径流无法及时排出，最终涌入城市形成内涝（辛玉玲和张学强，2012）。

### 3. 城市化影响

1980~1990年，我国城镇化率增加了7%；1990~2000年，城镇化率增长了10%；2000~2010年，城镇化率增长了13%。随着城镇化率的增加，城市用地急速扩张。以北京为例：2000年城市建成区面积仅有700km<sup>2</sup>，2010年已达近1400km<sup>2</sup>。从全国范围来看，城市建成区总面积从2.24万km<sup>2</sup>增长到了4.01万km<sup>2</sup>，年均增长速度为5.97%（李炜，2007）。

城区地面大量硬化，地面截水能力大大下降，在汇水面积和暴雨强度相同的条件下，地面径流系数越大，雨洪流量就越大。特别是在老城区，由于排水管道最初设计是按当时的地表径流系数确定管道管径，而对旧城区的改造导致如今的径流系数已大大超过以前的数值，在流量大幅增加的情况下，必然出现旧管道系统不堪重负，局部出现水涝灾害现象（曾重，2013）。

随着城市化进程的加快，新建的城区排水系统与之前存在的旧的管道无法良好衔接，无法使雨水顺畅排走；新建小区建设的雨水收集系统几乎没有，加剧了道路积水程度；城市低洼地带和立交桥下地区的雨水泵站欠缺或不配套；雨水系统清掏维护不及时等都会引起城市局部内涝（薛梅等，2012）。

城市面积越来越大，原来的河流和湿地被大面积的水泥地、柏油路、硬质铺装所取代，使本来“会呼吸的地面”变得无法渗水，从而使原本的平衡系统被打乱（鞠宁松，2012）。据统计，北京超过80%的路面被混凝土、沥青等不透水材料覆盖，雨水根本无法渗入，这也是导致北京近年来内涝问题严重的原因之一（辛玉玲和张学强，2012）。

城市建设的扩张，使原本具有自然蓄水调洪错峰功能的洼地、山塘、湖泊、水库等被人为地填筑破坏或填为他用，城市水面率下降，降低了雨水的调蓄分流功能（叶斌等，2010）。

城市新区选址上喜欢选择“临江、临海、临湖”等区域，在规划建设过程中，往往忽视对防洪问题深入论证，没有同步建设必需的排涝设施，加大了城市的洪涝风险。更为严峻的是部分城市建设侵占河道、水域现象严重，降低了河道的行洪排涝能力，同时也严重缩减了城市原有的洪水调蓄容量。城市河道、水面的大量减少必然导致城市内涝的发生（卢晓燕等，2013）。