

# 我国城市内涝问题研究综述

王江波<sup>1</sup>, 张茜<sup>1</sup>, 吴丽萍<sup>1</sup>, 苟爱萍<sup>2</sup> (1. 南京工业大学建筑学院, 江苏南京 210009; 2. 上海应用技术学院, 上海 201418)

**摘要** 通过对国内城市内涝问题的文献进行统计, 简述了该问题的研究进展, 归纳了城市内涝形成的主要人为因素, 并介绍了国内外先进的规划理念和技术手段, 以期在后续研究中为我国解决城市内涝问题提供参考。

**关键词** 城市内涝; 成因; 对策; 新理念; 新技术

**中图分类号** TU 984 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)30-12072-07

## Review on Researches about Urban Waterlogging in China

WANG Jiang-bo et al (School of Architecture, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 210009)

**Abstract** Through reviewing literatures about urban waterlogging in China, the research advances and the contributing factors were summarized. The advanced planning idea and techniques at home and abroad were introduced, so as to provide reference for solving urban waterlogging in the future in China.

**Key words** Urban waterlogging; Contributing factors; Countermeasures; New idea; New technology

国家住建部 2010 年对国内 351 个城市排涝能力的专项调研显示, 2008~2010 年, 有 62% 的城市发生过不同程度的内涝, 其中内涝超过 3 次以上的城市有 137 个, 57 个城市的最大积水时间超过 12 h。2011 年进入秋汛以来, 国内就有 137 个县级以上城市进水受淹, 北京、武汉、成都、南京、杭州等省会城市更是发生了严重内涝。“到市区去看海”甚至成为流传甚广的网络冷幽默。2013 年城市内涝依然到处肆虐, 不仅造成了巨大的经济与社会损失, 还造成了人员伤亡, 使受灾民众流离失所, 防治内涝已成为刻不容缓的事情。笔者

归纳总结了现有城市内涝研究文献中的内涝成因与对策, 以便能在后续研究中为我国城市内涝的解决提出一些参考。

## 1 城市内涝问题研究进展

**1.1 阶段划分** 城市内涝问题是由城市内的积水问题演变而来的, 国内最早的研究是在 20 世纪 80 年代。随着城市的快速发展, 城市内涝问题也日益严重。2000 年以前, 城市内涝的研究较少; 到 2009 年, 城市内涝问题开始突出, 研究文献增多。近 3 年来, 关于城市内涝的研究文献以较大的斜率呈直线增长(图 1)。

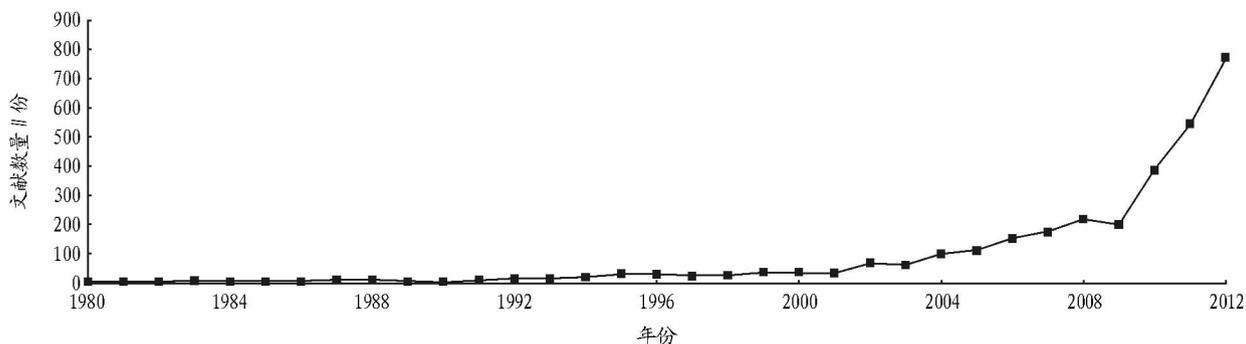


图 1 1980~2012 年我国研究城市内涝问题的文献数量

第一阶段(20 世纪 80 年代): 对城市内涝的成因进行简单、片面的描述, 主要研究暴雨引发的城市内涝, 大多关注沿江河流域城市因洪水灾害引发的内涝。在防涝对策中, 注重简单的机排。例如李昭淑等人在研究关中盆地内涝情况时, 将内涝归结于自然因素, 探讨了气象水文、地质地貌等方面的原因<sup>[1]</sup>。

第二阶段(20 世纪 90 年代): 深入研究各内涝成因, 开始研究城市建设等人为因素对城市内涝的影响, 但程度较浅; 开始给内涝形式进行分类, 引进国外先进理念。顾朝林等人在研究 1991 年苏皖城市洪涝灾害的时候分析了选址、

建设等方面的人为因素, 还将城市内涝归纳为点状、线状、片状 3 种涝灾类型<sup>[2]</sup>。董扬研究安徽省城镇洪涝灾害时提出了“截、排、蓄、分、引、植”多方法结合预防内涝的先进理念<sup>[3]</sup>。

第三阶段(2000~2013 年): 建立较精确的模型对内涝地区进行实况模拟; 对城市内涝的自然因素、人为因素进行总结或是对某一成因进行详细研究; 详细研究国外的先进理念、技术手段, 发掘适合我国国情的先进防涝对策, 并对已经引入的先进理念的实践情况进行归纳总结。为了直观展示内涝全过程, 王林等人建立了数字高程模型、降雨模型、产汇流模型、排水模型, 并以深圳为例进行了验证<sup>[4]</sup>。刘卓等人在 2011 年城市国际化论坛上介绍了在内涝治理方面居于世界前沿的法国、英国、日本的先进排水理念<sup>[5]</sup>, 对我国的排涝对策制定有很大的借鉴意义。

**基金项目** 国家自然科学基金项目成果(51008156, 51378010)。

**作者简介** 王江波(1976-), 男, 河南鹤壁人, 副教授, 博士研究生, 从事防灾减灾、城市规划研究。

**收稿日期** 2013-09-25

## 1.2 研究方法

**1.2.1 定性研究。**现有文献中的定性研究主要通过网络、采访等形式对城市内涝这一社会现象进行分析研究。例如 2012 年平安保险江苏分公司结合往年客户出险、风控查勘记录,参考以往南京市在洪水暴雨来临期间容易出现积水、内涝等情况的地点,绘制发布了一份《南京低洼易涝地区风险地图》,帮助市民做好梅雨季节内开车时的防灾防损准备<sup>[6]</sup>。

**1.2.2 定量研究。**张葆蔚、万金红在研究我国洪涝灾害时,用 2003~2012 年各省、自治区和直辖市的洪涝灾情统计数据,分析了这 10 年间我国农作物受灾面积、人口受灾、倒塌房屋、直接经济损失 4 类洪涝灾情数据的变化趋势<sup>[7]</sup>。

孙阿丽以上海市为例,运用 SWMM 模型构建了适合上海地区的城市暴雨内涝模型,将情景模拟和指标体系方法相结合来开展暴雨内涝风险评估<sup>[8]</sup>。

权瑞松等人以上海市中心城区为例,通过集城市地形模型、城市降雨径流模型、地形影响修正模型和 GIS 空间分析模块为一体的综合城市内涝模型,对中心各区建筑进水的数量以及进水深度的空间差异进行研究<sup>[9]</sup>。

管满以太原市为例,阐述了太原市 2011 年内涝的基本情况,从地形地貌、管网设计标准、暴雨强度公式、城市排涝系统、雨洪混排、单个排水系统汇水面积、径流系数选定、雨水管渠设计流量计算方法几方面分析了太原市城区内涝的原因,并相应提出了修订暴雨强度公式、调整雨水管渠的设计重现期、建设城市排涝系统、完善雨水管渠设计流量计算方法、实行雨洪分流的对策建议<sup>[10]</sup>。

## 2 内涝成因研究

城市内涝的原因可分为自然因素和人为因素两大类,自然因素是引发内涝的直接原因,而人为因素才是导致内涝的根本原因。笔者主要围绕人为因素进行全面的概括总结。

**2.1 城市规划的失误或不足** 由于城市的迅猛发展,城市规划赶不上城市化的步伐。城市管网的不完善也是导致内涝的重要原因。城市开发总是从中心区慢慢向周边辐射,城市规划部门也不能完全预料到城市发展的最终程度,在管道建设初期,周边区域没有完全规划好,导致排水系统的建设无法一步到位。后来,随着新开发区域逐渐成为城市中心区,以前的排水管网显然不能满足急剧膨胀的排水需求<sup>[11]</sup>。

**2.1.1 城市总体规划对涝灾重视程度不够。**中国进入快速城市化阶段,城市发展呈摊大饼的形式,不断向外扩张,部分地区由于用地紧张,不得不向地势低洼等不利于城市建设的地方发展,使得排涝规划被动地去适应总体规划所产生的城市空间形态,不能对城市总体规划提出反馈。

南京市河西地区原先为长江河岸的缓冲地带,其地势低于汛期的秦淮河和长江水位,有汛期蓄水的作用。然而南京市的总体规划却将河西定位为南京的副中心,进行高强度开发,使得河西地区区域排水系统面临很大压力<sup>[12]</sup>。

**2.1.2 城市规划中对都市化的洪水效应认识不足。**为了满足城市发展对土地的需求,在规划过程中将城区的许多支流小河道规划成可建设用地,导致城内硬地面面积增加而行蓄

洪面积减少,使城区雨水向低洼区域汇集,造成内涝之灾。

历史上北京城内有比较完善的排水系统。但随着城市的不断扩张和发展,好多明沟改成了暗沟。比如西城区的赵登禹路,原来的南、北新华街等,下面都有暗沟;北京内城的护城河包括宣武门、西直门、复兴门、阜成门等位置的西护城河和东护城河,基本上都变成暗沟。

北京城内原来还有很多水坑,也就是洼地,这些水坑尽管影响市容,但是有蓄洪的作用,下雨后洪水可以临时汇集到这里,现在大部分都填平了。

沿江城市基本处于水网地区,海拔相对较低。千百年来,这些地区被风雨冲刷出星罗棋布的沟塘水系,具有良好的调蓄雨水、涵养渗流的功能,与自然已形成天地合一、相对平衡的关系<sup>[13]</sup>。然而在建国后的城市建设中,由于没有考虑周全,盲目填埋天然水系,使得城市的排蓄功能锐减。据不完全统计,近年来,南京城区消失的城市较大河流有 20 条,全长超过 15 km。

**2.1.3 城市排涝规划与城市其他专项规划协调性差。**城市化使得城市暴雨越来越多,排涝规划中设计合理的排水机制,提高排水管网、泵站的排水能力虽然可行,但耗资大,见效慢,故解决城市内涝必须做到蓄、滞、排相结合,这需要与城市其他专项规划相协调。例如与城市雨水利用规划相结合,将雨水资源化,减少地表径流量;与城市景观规划相结合,使公园、广场的竖向标高低于周边用地,依托这些公园和广场建立一个临时滞洪区。

**2.2 城市建设的失误** 许多城市在不断开发建设过程中比较注重光鲜亮丽的城市景观、城市轮廓和天际线的打造,却疏于对城市地下管网、地下空间结构的关注。

规划、建设管理部门只重视主体建筑方案的论证把关,而对配套地下管网的设计是否和城市规划的要求相吻合,没有相应地论证把关。一旦隐蔽工程建设完毕,就留下永久隐患。殊不知,地上建筑完工投入使用后,问题爆发,再想梳理改造地下工程,无异于牛过拔尾,既增加了难度又浪费了资金。与此相比,国外很多城市,地上和地下的投入比例甚至是 1:1<sup>[14]</sup>。

**2.2.1 “重地表、轻地下”**使得老城区旧管道普遍“超期服役”。“重地表、轻地下”的思想观念使得决策者把投资的绝大部分用于地上设施的建设,而很少部分用于配套的地下管网建设,同时对老旧管网的更新改造得过且过、怕麻烦、疏于仔细研究测算。大部分地区在规划建设时忽略了地下建设,直接使用旧的管道设施,使得本该“退役”的管道还在“服役”。

**2.2.2 不同建设时期和建设标准的排水管网改造难度大。**地下管网经常是以“打补丁”的方式建设的,哪里内涝严重就在哪里建设新的管网,所以城市里的管网建设不成体系,而在对其进行改造时,不同的时期和不同建设标准的排水管网很难统一改造。

**2.2.3 高楼林立加大了地下排水管网的改造难度。**城市高速发展,城市用地紧张,为提高建筑面积,一栋栋高楼大厦拔

地而起。由于其建筑结构需要,通常会往地下发展,从而影响了地下排水管网的布局<sup>[15]</sup>。

**2.2.4 排水管道错接。**由于施工的失误,很多地方将雨水管道错接到污水管道上。由于同一段路污水管道管径往往小于雨水管径,暴雨来临时就可能局部积水甚至内涝。

**2.3 规范标准的不足** 国外发达国家城市雨水标准体系一般包含两个层面的标准。欧盟标准体系中明确规定了管道排水标准和涝灾控制标准;美国和澳大利亚标准体系明确规定了小暴雨排水系统标准和大暴雨排水系统控制标准。我国的香港特别行政区也有大小排水系统之分,但防洪、排涝和管道的标准是统一的(表 1~3)<sup>[16]</sup>。

表 1 美国 ASCE 雨水系统设计标准

| 地区          | 小暴雨系统重 | 大暴雨系统重 |
|-------------|--------|--------|
|             | 现期//a  | 现期//a  |
| 居民区         | 2~5    | 100    |
| 高产值的商业区     | 2~10   |        |
| 机场          | 2~10   |        |
| 高产值的闹市区     | 5~10   |        |
| 洲际高速公路或排水河道 | 100    |        |

表 2 欧盟 EN752 雨水系统设计标准

| 用地类型               | 小暴雨系统重 | 大暴雨系统  |
|--------------------|--------|--------|
|                    | 现期//a  | 重现期//a |
| 农村郊区               | 1      | 10     |
| 居民区                | 2      | 20     |
| 城市中心、工业和商业区(有洪水检测) | 2      | 30     |
| 城市中心、工业和商业区(无洪水检测) | 5      | 30     |
| 地铁和地下通道            | 10     | 50     |

表 3 中国香港排水系统设计重现期标准

| 序号 | 排水系统类别     | 重现期//a |
|----|------------|--------|
| 1  | 市区排水干渠系统   | 200    |
| 2  | 市区排水支渠系统   | 50     |
| 3  | 主要乡郊集水区防洪渠 | 50     |
| 4  | 乡村排水系统     | 10     |
| 5  | 密集使用农地     | 2~5    |

而大陆目前还没有城市内涝控制标准,或说还没有大排水系统的标准。已有的排水规划设计标准如《排水工程规划规范(GB50318-2000)》和《室外排水设计规范(GB50014-2011)》都仅仅是针对排水管道和泵站等雨水设施而言的,对城市内涝防治、城市排水系统应对超标雨水等没有明确的要求和规划标准。对城市初期雨水污染、雨水综合利用等方面也没有具体的要求和技术标准。

鉴于我国的降雨特征和经济水平、危害损失等原因,长期以来,我国的城市雨水系统设计重现期一直比较低。在 2011 年颁布的《室外排水设计规范(GB50014-2011)》中已将设计重现期提高(表 4),并提出“经济条件较好或有特殊要求的地区宜采用规定的上限”的要求;还提出校核城镇排水系统排出地面积水能力的概念,使雨水系统的建设标准大大提高。

虽然这一设计标准有所提高,但对大量建成区来说,要

表 4 2011 年《室外排水设计规范(GB50014-2011)》中雨水系统设计重现期标准

| 序号 | 地区                         | 小暴雨系统重现期//a |
|----|----------------------------|-------------|
| 1  | 一般地区                       | 1~3         |
| 2  | 重要干道、重要地区或短期积水即能引起较严重后果的地区 | 3~5         |
| 3  | 特别重要地区                     | >10         |

想改造达标还是有相当难度的,还需要多种措施综合解决。调查显示我国 70% 以上的城市排水系统设计暴雨重现期小于 1 年,90% 老城区的重点区域甚至比规范规定的下限还要低。

2013 年 7 月,中华人民共和国住房和城乡建设部发布了《城市排水(雨水)防涝综合规划编制大纲》,大纲中提出的城市内涝防治标准如表 5 所示。

表 5 2013 年《城市排水(雨水)防涝综合规划编制大纲》中城市内涝防治标准

| 序号 | 城市类型                         | 暴雨系统重现期//a |
|----|------------------------------|------------|
| 1  | 经济条件较好且暴雨内涝易发的城市             | >50        |
| 2  | 直辖市、省会城市和计划单列市(36 个大中城市)中心城区 | 50         |
| 3  | 地级城市中心城区                     | 30         |
| 4  | 其他城市中心城区                     | 20         |

**2.4 排水系统的问题** 政府在进行决策时缺乏前瞻性,往往“头痛医头,脚痛医脚”,没有系统综合地分析内涝产生的原因和防治办法,造成排水管网的系统性不够<sup>[11]</sup>。

我国现在的排水方式以管道为主,太过单一,且管道的密度和标准太低,暴雨天气时并不能完全排出所对应地块的降水以及部分地区由于地势低洼所带来的客水。

由于地块权属所带来的管网建设割裂问题大大降低了城市排水管网的整体性。各地块只考虑本身的排水需求,没有结合周边情况,使得规划出来的排水系统局限性较大,没有前瞻性。由于广州属于滨海地区,低平陆域城市的地下雨水管道一般直通邻近的海域,然而其竖向及坡度存在一些问题,潮差大时,管道内的水不能顺利汇入水系内,并且会引发海水倒灌<sup>[17]</sup>。排水系统规划时应考虑其特殊地理因素。系统内排水设施不配套,导致地面径流不能及时进入管道。

以广州市为例,受地块开发模式、基础设施建设模式的影响,新建小区的排水系统通常依靠地块开发“搭车”配套建设。不同地块之间的排水系统连接性不够好,部分出现割裂情况,城市交通主干线对原有城市排水也造成切割和分裂,城市整体的排水管网系统性极差<sup>[18]</sup>。

## 2.5 市政日常管理维护不力

**2.5.1 沟渠管道清理不到位。**刘诗雄研究泉州的城市内涝问题时指出,内河沟渠堵塞严重,排水通道不畅是城市内涝的主要问题。在城市内河沟渠、管道中淤泥垃圾等堵塞严重,缩小了过流断面,过流能力不足原来的 1/3,经常引起洪涝灾害。2009 年台风暴雨期间,由于排洪不畅,渠道积水漫过渠岸两侧,部分群众房屋受淹,部分土坡护堤被冲毁,造成

经济损失<sup>[19]</sup>。

**2.5.2 管道维修不及时。**由于管道埋设于地下,管道出故障时并不能及时发现,相关部门对于管道的后期检查做得并不到位,使得很多出故障的管道都不能得到维修,在内涝灾害发生时不能工作,甚至影响了其他管道的正常运行。另外国内管道标准较低,管径较小,检查、维修有一定困难。

### 3 对策研究

西方发达国家的城市化进程先于我国,城市内涝的产生在我国之前。目前国外已经有很多成功运行的先进的规划理念和技术手段,其中有很多值得我国学习借鉴,笔者将介绍一些适合我国国情,且利于长期可持续发展的理念与技术。

#### 3.1 新的规划理念

**3.1.1 低冲击开发。**低冲击开发(Low-Impact Development, 简称 LID)最早是由美国提出的一种概念,其基本内涵是通过有效的水文设计,综合采用入渗、过滤、蒸发和蓄流等方式减少径流排水量,使城市开发区域的水文功能尽量接近开发

之前的状况,这对建设“绿色城市”、“生态城市”以及城市的可持续发展具有重大意义。LID 排水体系旨在通过控制一些具有关键意义的区域和空间位置,对雨水资源进行就地蓄滞管理,在满足城市防洪排涝的基础上同时实现地表径流的下渗、回补地下水和雨水资源再利用等目标<sup>[20]</sup>(图 2,表 6)。

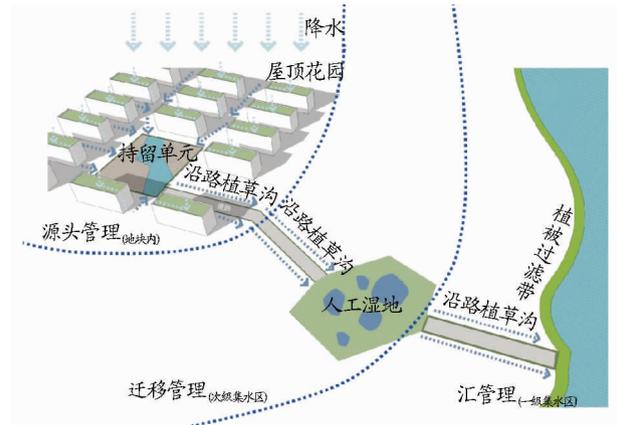


图 2 规划区内雨水径流管理示意

表 6 各级雨洪设施中所运用的 LID 技术

| 级别     | 主要类型                             | 作用                     | 示意图 |
|--------|----------------------------------|------------------------|-----|
| 三级径流设施 | 透水铺装、下凹绿地;小型滞留塘、绿色屋顶、雨水桶;草沟、雨水花园 | 就地滞蓄下渗雨洪水              |     |
| 二级径流设施 | 滞留池塘、湿地;草沟、明沟                    | 滞蓄利用;控制中小型雨洪水          |     |
| 一级径流设施 | 湿地、池塘、景观水体;草沟、明沟                 | 滞蓄利用,控制向下游排放速度;控制大型雨洪水 |     |

近年来,美国已经将 LID 技术列入可持续发展的核心技术之一。根据资料统计,LID 能减少暴雨径流的 30% ~ 99%,并延迟径流峰值 5 ~ 20 min,从而减轻市政排水管网的压力,对于城市内涝有非常积极的影响。

美国西雅图 High Point 住宅区就是利用 LID 技术重建的<sup>[21]</sup>,主要体现在以下几个方面:

(1)对于不透水铺装面积的控制。住宅区的街道与停车场都使用了透水性材料铺装(图 3),可有效减少地面雨水径流量,降低地下管道的负担。

(2)对于屋顶排水的要求。由于该住宅区的密度大,屋顶汇水面积也相应较大,设计公司针对不同类型的屋顶进行不同的屋顶排水设计,设置了屋顶雨水收集系统。

(3)植被浅沟。住宅区内有一条由植被浅沟组成的排水

网络系统(图 4),该系统沿着道路分布,道路的一侧或两侧设有绿化带,能收集、吸收、过滤来自屋顶、道路的雨水,然后排入地下,最终排入公共雨洪排水系统(图 5)。雨水浅沟通过一定的坡度和断面自然排水,表层植被能拦截部分颗粒物,小雨或初期雨水会部分自然下渗,使收集的径流雨水在沿途得到改善。

(4)调蓄水池。居住区北部的池塘公园的池塘最深可达 4.7 m,可以容纳 271 231 m<sup>3</sup> 的水量,居住区内屋顶与道路的雨水就是最终汇入到这里的。

(5)渗透沟。渗透沟是一个填满了石头的沟渠,十分适用于小型区域的排水要求。雨水先集中在沟表面,经过一定时间后渗入地下。

(6)屋顶绿化。绿色屋顶能够有效吸收一些重金属和营



图3 可渗透道路铺装



图4 浅沟现状

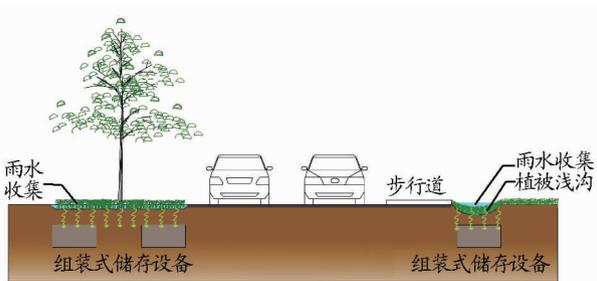


图5 道路玉树低绿地和浅沟收集示意

营养物质,如钙、铜、铅、锌、氮等。绿色屋顶还能够改善室内温度,减少空调等电器的能耗。

(7)土壤改良。改善土壤的方法有堆肥、增加覆土、添加营养物质或石灰等。改善后的土壤所含营养物质和渗透能力都会有所加强,更利于雨水渗透和植被生长。

现在北京、深圳、西安等城市也先后引进了LID技术进行建设。

**3.1.2 统一规划,与城市规划、城市景观全面结合。**城市内涝防治是系统工程,做好排水规划是内涝防治的关键环节,然而排水规划不可能只靠复杂庞大的排水工程来解决,与城市规划、城市景观相结合也是尤为重要的。

在进行城市用地分类时,基本没有考虑土地和地表径流的关系。做城市用地布局时很少考虑雨水排水的出路;做城市竖向设计和道路竖向设计时,也很少结合雨水的综合利用和排放,导致排水不畅。例如城市中的绿地是难得的透水地

面,但很多城市绿地都比道路标高要高,无法接纳附近的雨水。

在进行总体规划阶段,应合理确定排水系统的布局,优先解决排水去向和大通道,多专业协调联动,使规划能够顺应原有的自然水体,适应原有的自然蓄水和排水条件。这种规划方式才符合千百年来自然界水循环的机理<sup>[22]</sup>。

**3.1.3 全面的规划原则。**城市内涝治理是一项特殊的系统工程,国内外的成功经验表明,只有采取综合的治理措施,才能达到较好的效果。破解城市内涝的难题,可以通过“渗、滞、蓄、用、排”5个字来实现<sup>[11]</sup>。

(1)渗。是指回归雨水的自然属性,让雨水降落之后尽可能渗入地下,维护城市水循环系统平衡。有关部门应当加大修建城市雨水渗透设施的力度,如修建透水路面、透水停车场、透水广场、渗水井等。

(2)滞。主要是通过建设湿地等手段,减缓洪峰形成时间,减少洪峰峰值,尽可能避免大的洪水出现。城市在建设发展过程中应该保留足够多的湿地,以增强城市暴雨的调节能力。2010年11月哈尔滨建成雨洪公园一方面解决了新区雨洪的排放和滞留,使城市免受涝灾威胁,同时利用城市雨洪,恢复湿地系统,营造出具有多种生态服务功能的城市生态基础设施(图6)。

(3)蓄。是指利用低凹地、池塘、湿地等收集雨水,既能减轻防洪压力,还能改善城市小气候。荷兰鹿特丹部分地区采用干湿两用的“水广场”方案,水广场本身有比较浅的沟槽作为排水沟,下小雨时这些沟槽会形成天然的水景,下大雨时整个广场充满了水,形成一个大蓄水池,本身成为城市水景和水上游乐场(图7)。在城区内规划建设时,还可以建设低运动场、低公园、低草地等城市蓄水滞水设施,以减轻城市排水系统的压力。

(4)用。主要是指丰富雨水利用范围,可以用来灌溉、洗车、景观用水、道路清扫、冲厕、消防等领域。

(5)排。主要是指畅通排水管道和河道,让雨水能顺畅地排出城区。

### 3.2 新的技术手段

#### 3.2.1 渗的技术。

(1)生物渗透系统。由经过结构和景观处理的低洼地组成,用于促进暴雨径流的吸收和渗透,这种处理方式能够有



图6 哈尔滨雨洪公园



图7 鹿特丹水广场

效减少暴雨径流并去除径流中的污染物质。雨水花园是一种较常见也较简单的生物渗透系统,它仅仅依靠下层的土壤排出雨水。雨水花园特别适用于有足够空间吸收雨水的开发地区,在美国常用于停车场的分割带、居住区及商业开发区。

雨水花园的构造主要由5部分组成,其中在填料层和砾石层之间可以铺设一层砂石或土工织物(图8)。根据雨水花园与周边建筑物的距离和环境条件,可以采用防渗或不防渗两种做法,当有回用要求或要排入水体时,还可以在砾石层埋置集水穿孔管。

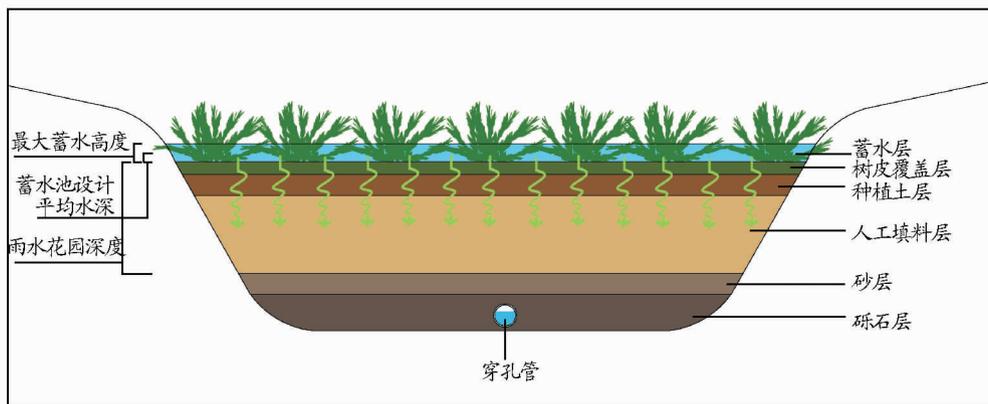


图8 典型雨水花园结构示意图

(2) 渗透排水沟。是一种扁平的、覆盖有植被的排水沟,用于排放或暂时储存雨水。通过渗透作用,这种排水沟也可以将部分雨水排入地下,并过滤雨水径流中的污染物。渗透排水沟可有效替代雨水管道和笔直的、经过铺砌的排水渠道(图9)。在某些地区,自然的渠道也可作为渗透排水沟。与传统的道路边沟和地下排水管网构成的排水系统相比,渗透排水沟能够削减暴雨径流的频率和径流量,对低强度的降雨尤为有效。在黏性土壤条件下,预计暴雨径流的削减量可达

到15%。渗透沟在美国的运用很广泛,用于各类地区的开发。即使在高密度的城市建设区,渗透沟也可用于连接雨水管道来构建排水系统。

(3) 植物过滤带。顾名思义是用于过滤地表径流的植被区。其工作原理是利用植被降低雨水径流的速度,截留雨水中的固体物质,并通过土壤吸收部分径流雨水,减少暴雨径流量(图10)。通常过滤带由大面积的绿化草坪构成,但如果可种植本地种属的草本植物和灌木,则可有效去除氮、磷

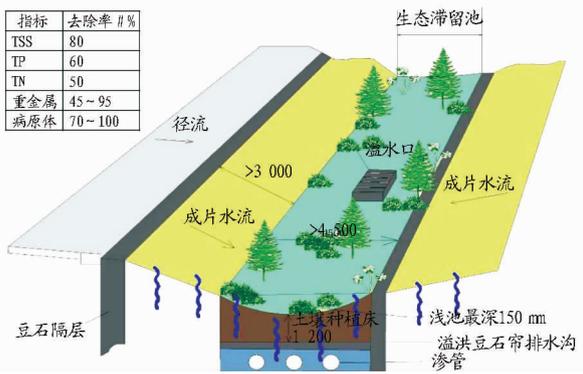


图9 渗透排水沟排水设计

等营养物质。管理得当的过滤带能够有效降低暴雨径流量,对于低强度的降雨事件,植物过滤带可以发挥最大效率,最多可削减40%的径流量、70%~90%的固体沉淀物以及25%~65%的营养物、生化耗氧量和其他有机污染物。植物过滤带常被用于建成区和敏感水环境区域间的缓冲带,特别是连接容易产生高度污染物质的地区,如停车场、道路、建筑工地等,此外植物过滤带也可作为生物渗透系统的预处理设施。

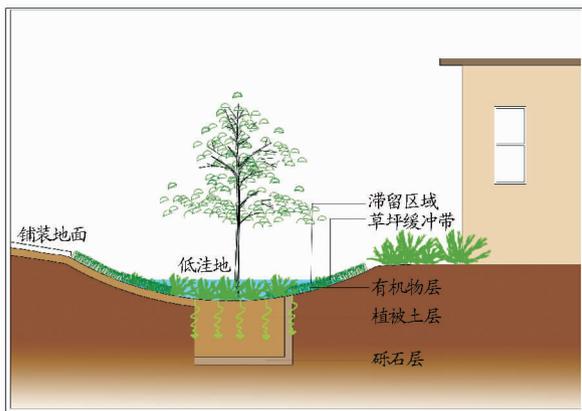


图10 植物过滤带

(4)绿色屋顶。又称屋顶花园,是铺设在建筑屋顶上的植物层(图11)。绿色屋顶有助于暴雨径流的控制,通过植物土壤的滞留和过滤作用,减缓流经屋顶的雨水流速,并将雨水过滤干净(图12)。相比传统屋顶,绿色屋顶估计能够削减降雨中超过95%以上的金属镉、铜、铅,对于营养物质的去除也非常有效果。除了在暴雨管理方面的益处外,绿色屋顶可以使建筑绝热,降低取暖和降温成本。此外绿色屋顶还能提供美学和生态环境方面的效益,例如美化建筑、在贫瘠的城市生态环境中提供生物的栖息场所等。

**3.2.2 一种基于GPRS的城市内涝报警装置。**这种装置包括有设在雨水管道的检查井内的终端水深监测仪。终端水深监测仪通过无线传感器感知节点与GPRS无线网关相连。GPRS无线网关与城市内涝报警装置相连。终端水深监测仪将获得水位数据信息通过无线传感器感知节点及GPRS无线网关传给城市内涝报警装置进行报警,具有体积小,方便安装、可靠性高的特点<sup>[23]</sup>。

## 4 结语

城市内涝的成因复杂多样,极端天气和强降雨虽是引起



图11 屋顶绿化

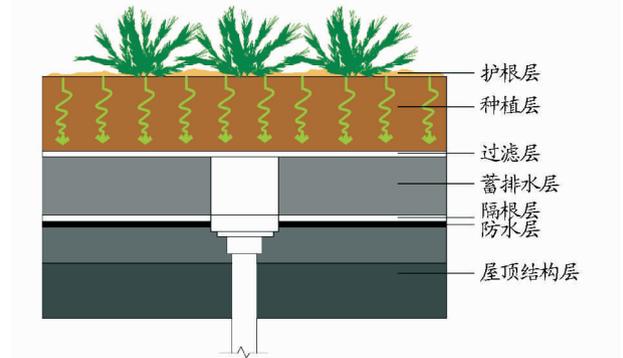


图12 屋顶绿化结构层

城市内涝的直接因素,但城市快速发展过程中的规划、建设失误与不足却是导致城市内涝的根本原因。解决城市内涝问题也不能单靠某一部门,而是需要各个部门协同作战。笔者主要归纳整理城市内涝研究文献中的城市规划管理方面内涝成因,介绍国内外先进的规划理念和技术手段,希望能用长远的眼光来建设和管理城市,编制新的防涝标准。

## 参考文献

- [1] 李昭淑,程永华,余峰. 关中盆地内涝成因与防治的探讨[J]. 西北大学学报,1987,8(17):91-98.
- [2] 顾朝林,陈田,史培军. 1991年苏皖城市洪涝灾害成因分析[J]. 地理学报,1992(4):289-300.
- [3] 董扬. 从安徽省城镇洪涝灾害谈城镇防洪规划[J]. 城市规划,1992(1):19-23.
- [4] 王林,秦其明,李吉芝,等. 基于GIS的城市内涝灾害分析模型研究[J]. 测绘科学,2004(3):48-51.
- [5] 刘卓,张越男,郭瑞,等. 案例5——国外大都市应对城市内涝的智慧[C]//2011城市国际化论坛—全球化进程中的大都市治理(案例集). 北京:北京市社会科学界联合会,2011.
- [6] 安产险江苏分公司. 南京低洼易涝地区风险地图[EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/2040494ae518964bcf847cac.html>.
- [7] 张葆蔚,万金红. 2003—2012年我国洪涝灾情评估与成因分析[J]. 中国水利,2013(11):35-36.
- [8] 孙阿丽. 基于情景模拟的城市暴雨内涝风险评估[D]. 上海:华东师范大学,2011.
- [9] 权瑞松,刘敏,张丽佳,等. 基于情景模拟的上海中心城区建筑暴雨内涝暴露性评价[J]. 地理科学,2011,31(2):140-150.
- [10] 管满. 太原市城市内涝剖析及解决对策[J]. 中国给水排水,2012,28(14):16-19.
- [11] 古文山. 城市内涝成因与防治对策浅析[J/OL]. (2012-08-10) <http://lunwen.1kejian.com/jianzhukexue/97741.html>.

(下转第12097页)

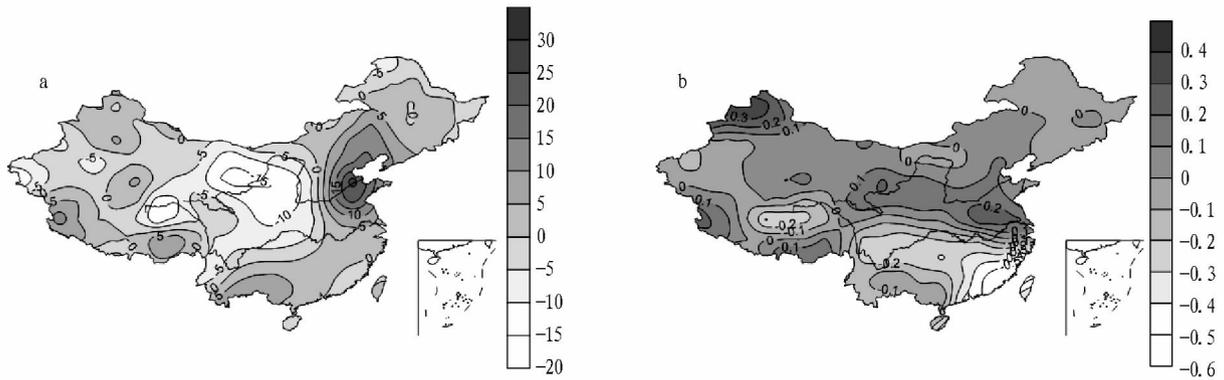


图 3 2013 年 1 月全国近地面相对湿度(a, %)和 700 hPa 水汽通量[ $b, g/(cm \cdot hPa \cdot s)$ ]距平分布

### 参考文献

- [1] 吴兑. 再论都市霾与雾的区别[J]. 气象, 2006, 32(4): 9-14.
- [2] 白志鹏, 蔡斌彬, 董海燕, 等. 灰霾的健康效应[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(3): 198-201.
- [3] 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 1-9.
- [4] 范新强, 孙照渤. 1953-2008 年厦门地区的灰霾天气特征[J]. 大气科学学报, 2009, 32(5): 604-609.
- [5] 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 584-588.
- [6] 胡亚旦, 周自江. 中国霾天气的气候特征分析[J]. 气象, 2009, 35(7): 73-78.
- [7] 李艳, 耿丹, 董新宁, 等. 1961-2007 年重庆芬苏的气候变化特征[J]. 大气科学学报, 2010, 33(3): 336-340.
- [8] 徐梅, 朱玉强, 余文韬. 天津地区灰霾特征初步研究[C]//中国颗粒学会 2006 年年会暨海峡两岸颗粒技术研究讨论论文集. 北京, 2006: 502-506.
- [9] 杨科, 吕校华, 黎芳, 等. 基于相对湿度的霾与轻雾区别方法[J]. 农业灾害研究, 2013, 3(Z1): 42-44.
- [10] WANG S, MENG X R, JIN L N. Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Fog Days and Hazy Days in Xi'an[J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(7): 1037-1040, 1048.
- (上接第 12078 页)
- [12] 胡茂川, 张兴奇. 南京市内涝灾害成因分析[J]. 重庆交通大学学报, 2011, 11(3): 29-30.
- [13] 司国良, 黄翔. 长江下游沿江城市内涝灾害的反思与对策[J]. 江淮水利科技, 2009(6): 182-185.
- [14] 鞠宁松, 龚坤. 城市内涝的成因及破解方法探讨[J]. 江苏建筑, 2011(z1): 90-93.
- [15] 张维, 欧阳里程. 广州城市内涝成因及防治[J]. 广东气象, 2011, 33(3): 52.
- [16] 张晓昕, 王强, 付征, 等. 国外城市内涝控制标准调研与借鉴[J]. 北京规划建设, 2012(5): 70-73.
- [17] 任希岩. 滨海城市内涝防治研究[R]. 中国城市规划设计研究院·工程规划所, 2012.
- [18] 郭常安, 邓立鸣. 广州市中心城区内涝分析及对策[J]. 中国给水排水, 2011, 27(10): 26-27.
- [19] 刘诗雄. 泉州市城市内涝治理工程措施探讨[J]. 中国水利, 2012(19): 48.
- [20] 姜立晖, 程小文. 低冲击开发模式解决城市雨洪[J]. 中国减灾, 2010(7): 32-33.
- [21] 王沛永, 张新鑫. 美国 HighPoint 住宅区低影响土地开发(LID)技术应用案例研究[C]//中国风景园林学会. 中国风景园林学会 2011 年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 1063-1069.
- [22] 谢映霞. 从城市内涝灾害频发看排水规划的发展趋势[J]. 城市规划, 2013(2): 45-50.
- [23] 徐红梅. 一种基于 GPRS 的城市内涝报警装置: 中国, 201220554238[P]. 2013-05-29.
- [24] 张艳娟. 牙克石市近 50 年气候变化特点及早涝趋势分析[J]. 内蒙古农业科技, 2012(5): 99-100, 112.
- [25] 刘明芝, 张海军. 本溪县洪涝灾害年发生规律及特点分析[J]. 农业灾害研究, 2011, 1(1): 61-62, 66.