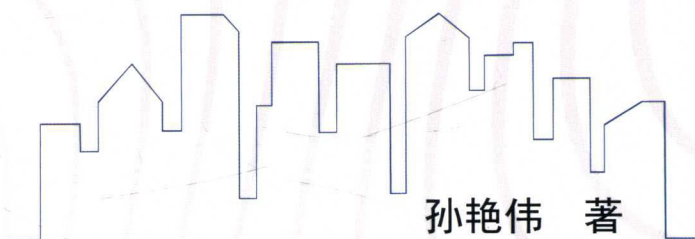


变化环境下 城市雨洪调控措施研究



孙艳伟 著



变化环境下城市雨洪 调控措施研究

孙艳伟 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者近 5 年来对变化环境下城市水文效应及城市内涝应对措施方面研究成果的总结。本书共分为 8 章,以中国具有典型城市化特征的城市居民小区为例,分析了其降水变化、城市化的水文效应,并从城市排水系统的地表径流输送系统和城市管网排泄系统两个方面出发,分析了直接不透水性面积比例、低影响开发措施以及城市输水管径在城市内涝方面的作用等多项成果。本书涉及气象学、城市水文学、模型模拟、概率分析等多学科的理论与方法的应用研究,一方面可为城市雨洪及管网设计提供理论指导,同时为相关研究提供分析思路及参考。

本书可供水文水资源、水生态、水利工程、市政工程及有关专业科技工作者和管理人员使用,也可供大专院校相关师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

变化环境下城市雨洪调控措施研究 / 孙艳伟著. —北京: 科学出版社, 2018.10

ISBN 978-7-03-058973-6

I. ①变… II. ①孙… III. ①城市-防洪工程-研究 ②降雨-水资源利用-研究 ③洪水-水资源利用-研究 IV. ①TU998.4 ②TU991.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 223937 号

责任编辑: 韦 沁 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 北京东方人华科技有限公司

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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 10 月第一次印刷 印张: 8 1/4

字数: 205 000

定价: 89.00 元

(如有印刷质量问题, 我社负责调换)

前 言

城市化以及全球气候变化关系到人类的生存和发展,涉及国家政治安全、社会经济发展,人类协调与合作等一系列问题。城市化和气候变化改变了水文循环过程,影响着水资源系统的结构与功能,对人类水资源的开发利用带来新的挑战,并深刻影响着人类社会资源的开发、利用、规划、管理等诸多环节。其中,因为城市化及全球气候变化所带来的最直接的关系是地表径流的增加以及强降雨事件的增多,从而使城市内涝问题更加严重。因此,在变化情境下研究城市化的水文效应,并探讨其应对措施具有重要意义。城市化的发展深刻改变了区域的水文循环过程,并对水环境产生了显著的负面影响。城市化发展通过改变城市的下垫面,将其从透水性区域转变为不透水性区域,并通过城市的热岛效应,改变了流域内降水的时空分布和降雨径流效应,这些改变与流域的水循环过程、雨洪资源的利用与调控紧密相关。高度发展的城市化对于城市排水系统的发展及城市产汇流理论提出了更高的要求。

本书从城市排水系统的地表径流输送系统和城市管网排泄系统出发,通过对影响地表径流输送系统的 DCIA 以及 LID 措施的水文效应进行分析,以及管径改变对管网的输水能力模拟方面研究了变化环境下的城市水文效应及其应对措施。取得的代表性成果如下:

(1) 采用滑动平均法、M-K 参数检验法,对研究区 1951~2017 年的降水资料进行了统计分析,研究结果表明:年平均降水量呈现下降的趋势,突变点为 1957 年和 2014 年;秋季降水量呈现上升趋势,其突变点在 1959 年,春季、夏季、冬季降水量呈现下降趋势,突变分别发生在 1957 年、1958 年、1960 年。汛期降水量呈下降趋势对于雨洪调控而言是有益的。

(2) 采用历时资料,对郑州市暴雨强度公式进行了修订,并将修订后的公式应用于城市管径的推求,在此基础上,通过建立水动力学模型对研究区的水动力学现状进行了模拟。模拟结果表明修订后的管道对于缓解城市内涝现象具有显著作用,且随着降水重现期的增大,其效果越明显,对于较小重现期的降水而言,其效果不显著。

(3) 对 DCIA 和 TIA 两种情形下的地表产流进行模拟表明:当区域的不透水性系数采用 DCIA 时,DCIA 会产生更缓的入渗过程,更大的入渗量和更小的入渗系数。这一结论对于我国的雨洪资源管理具有重要的理论指导意义,因为改变区域的 DCIA 相比修改管道直径而言更加容易实现。

(4) 通过对研究区各调控措施建立 SWMM 模型模拟其雨洪调控性能可为,并利用洪峰流量消减率、入渗补给比例以及流量过程曲线来分析各调控措施基于不同重现期降水事件的水文调控性能,结果表明 BMPs 措施中的截留池和入渗带在两年设计降水下的

洪峰流量消减性能比较显著,即对降水量较小降水事件的洪峰流量消减的水文效应相对比较显著;对于 LID 措施来讲,透水性路面无论是在洪峰流量的消减还是入渗补给方面,其性能均最为显著。各调控措施的调控性根据其设计要素的不同会发生改变,本书所模拟的各雨洪调控措施的设计要素均选取了其设计手册中的推荐值,且除透水性路面外,其余措施均具有相同的表面积,而其灵敏度分析结果表明面积是所有设计要素中对调控性能影响最大的要素。

(5) 利用基于 SWMM 的生物滞留池模拟模型,分析了在研究区内通过改变生物滞留池不同设计参数的 729 种情景模拟情况。通过控制变量法进行比较并进而分析了各个因子对生物滞留池调控性能的影响,结果表明:DCIA 和其他因子组合会对生物滞留池产生不同的影响,对于不同重现期的降水,当表层土壤为砂壤土时,径流消减率随 DCIA 的增加而增加;当表层土壤为沙土时,对于不同重现期的降水,径流消减率随 DCIA 的增加变化很小;当表层土壤为壤砂土时,对于 2 年一遇降水,径流消减率随 DCIA 的增加变化很小,且此时 DCIA=40%时的径流消减率略小于 DCIA=30%和 50%时的径流消减率;而对于 5 年一遇和 10 年一遇的降水来说此时径流消减率随 DCIA 的变化呈现出明显变化,随 DCIA 的增加而增加。

(6) 生物滞留池对降水的调控主要体现在对进入生物滞留池的水量进行下渗的能力,所以当降水条件相同时,一切有利于下渗的因素都将增强生物滞留池的调控性能,例如较大的表层土壤水力传导系数、蓄水层厚度的增加以及较大的天然土壤的水力传导系数都将增大生物滞留池的调控性能。

(7) 所建生物滞留池区域的天然土壤为沙土的条件下,表层土壤为沙土或壤砂土时,除降水量和 DCIA 因素外其余参数的变动不会对生物滞留池的调控性能造成影响;表层土壤为砂壤土时,此时随着蓄水层高度和土壤层高度的增加,生物滞留池调控性能增强,但效果不明显。综合来说,当天然土壤为沙土时,此时的生物滞留池的设计应尽量考虑植物的生长需要以及经济条件的限制。

书中参考和引用了大量国内外学者的研究成果,并得到了国家自然科学基金(41401038)、河南省水环境模拟与治理重点实验室以及河南省科技厅科技创新人才支持计划(174200510020);河南省高校科技创新团队支持计划(19IRTSTHN030)对本书出版的资助和支持。

由于变化环境下 LID 水文调控性能的研究设计水文学、土壤学、水力学等多个学科,加之作者水平有限,书中的错误和疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正,提出宝贵意见。

作者

2018 年 6 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.3 研究内容	12
第二章 基于 LID 的雨洪调控措施	14
2.1 LID 的产生背景	14
2.2 LID 的设计目标	14
2.3 LID 的设计理念	15
2.4 LID 的主要措施	15
2.5 LID 的设计方法、效果监测及模型模拟	20
2.6 LID 的优点及局限性	21
2.7 LID 调控性能的模型模拟	22
2.8 小结	34
第三章 研究区降水变化规律分析	35
3.1 研究方法	35
3.2 结果分析	38
3.3 本章小结	43
第四章 土地利用对城市产汇流的影响	44
4.1 概况	44
4.2 数据处理及模型建立	45
4.3 结果分析	51
4.4 本章小结	60
第五章 暴雨强度公式修订对区域产汇流的影响	62
5.1 暴雨强度公式修订	62
5.2 数据处理及模型建立	86
5.3 结果分析	87
5.4 本章小结	90
第六章 DCIA 和 TIA 对区域产流的影响	92
6.1 模型建立	92

6.2	结果分析	92
6.3	本章小结	98
第七章	生物滞留池调控性能影响因子分析	99
7.1	生物滞留池中各参数取值及表示	99
7.2	模拟情景系列介绍	101
7.3	生物滞留池设计要素对其调控性能的影响分析	104
7.4	本章小结	116
第八章	结论	117
参考文献		119

第一章 绪 论

1.1 研究背景与意义

城市化以及全球气候变化关系到人类的生存和发展,涉及国家政治安全、社会经济与发展,人类协调与合作等一系列问题(徐光来等,2010)。城市化和气候变化改变了水文循环过程,影响着水资源系统的结构与功能,对人类水资源的开发利用带来新的挑战,并深刻影响着人类社会资源的开发、利用、规划、管理等诸多环节(Barroca *et al.*, 2006; 赵安周等, 2013; 刘家宏等, 2014)。其中,因为城市化及全球气候变化所带来的最直接的关系是地表径流的增加以及强降雨事件的增多,从而使城市内涝问题更加严重(Oudin *et al.*, 2018; Shukla and Gedam, 2018; Sunde *et al.*, 2018)。因此,在变化情境下研究城市化的水文效应,并探讨其应对措施具有重要意义。城市化的发展深刻改变了区域的水文循环过程,并对水环境产生了显著的负面影响(Schreider *et al.*, 2000; Sunde *et al.*, 2018; Shukla and Gedam, 2018)。城市化发展通过改变城市的下垫面,将其从透水性区域转变为不透水性区域,并通过城市的热岛效应,改变了流域内降水的时空分布和降雨径流效应,这些改变与流域的水循环过程、雨洪资源的利用与调控紧密相关(Jung *et al.*, 2011; Caradot *et al.*, 2011)。高度发展的城市化对于城市排水系统的发展及城市产汇流理论提出了更高的要求。

在这种背景下,从城市排水系统的地表径流输送系统和城市管网排泄系统出发,通过对影响地表径流输送系统的 DCIA 以及 LID 措施的水文效应进行分析,以及管径改变对管网的输水能力模拟方面研究变化环境下的城市水文效应及其应对措施,对于城市雨洪及管网设计具有一定的理论指导意义。

一般而言,城市的排水系统一般由 3 个部分组成:地表径流输送系统、城市管网排泄系统以及地下透水性的含水层介质的排泄系统(周玉文和赵洪宾, 2000)。城市内涝的发生是多因素共同作用的结果,但是,采用了较低的重现期降水以及较短的降雨资料,从而不能与气候变化所引起的暴雨的强度的变化相匹配,并导致城市排水管网的设计不符合当前状态,是其中的一个主要原因(邱兆富等, 2004)。为了对这一问题进行修正,我国于 2014 年重新对原有的国家规范《室外排水设计规范》(GB50014-2006)(2011 年版)进行了修订,目前要求排水管网的设计必须遵循的设计规范是《室外排水设计规范》(GB50014-2006)(2014 年版)。为了改善这些情况,探索建立适合城市自身的暴雨强度计算公式,全国各地都积极开展了暴雨强度公式的修订工作,郑州市也不例外(张东海

等, 2016; 王睿和徐得潜, 2016; 王杰等, 2016; 环海军等, 2016; 高琳等, 2016; 姜友蕾和陆敏博, 2016; 戴有学等, 2017)。当暴雨强度公式修订以后, 相对应的其排水管网的设计也要发生相应的变化。因此, 在这种背景下, 对暴雨强度公式修订后的管网的输水能力进行分析具有重要的意义, 一方面可用来分析暴雨强度公式修订后对雨洪管理的启示作用, 另一方面也可分析暴雨强度公式修订后的管道是否能在某一定程度上因为暴雨强度改变而带来的城市内涝问题。

对于地表径流输送系统而言, 城市不透水性系数对于城市流域及水环境管理而言是非常重要的一个参数, 并引起了众多学者的重视(Jambhekar and Pardya, 2009; Roy *et al.*, 2009; Han and Burian, 2009; Lucas, 2011; Shields and Tague, 2015; Ebrahimian *et al.*, 2016)。直接排入城市管网系统的不透水性区域的面积(Directly Connected Impervious Area, DCIA)是城市整个不透水性区域面积的重要组成部分。由于这部分不透水的面积直接与城市排泄系统相连, 因此, 也被称为有效的不透水性面积。DCIA 对于由于城市化所导致的水文效应问题应负主要责任。与 DCIA 相对应的一个概念总不透水性区域的面积(Total Impervious Area, TIA)。DCIA 相比 TIA 而言, 是一个更能反映城市化对水文影响的指标。考虑到 DCIA 的重要性, 因此, 在这种背景下, 开展 DCIA 和 TIA 对区域产流影响的研究具有重要理论和实践指导意义。

在雨洪管理措施方面, 目前我国开展的海绵城市建设中的海绵体便是一系列具体的 LID 措施。LID 是以维持或者复制区域天然状态下的水文机制为目标, 通过一系列分布式的措施创造与天然状态下功能相当的水文和土地景观, 以对生态环境产生最低负面影响的设计策略。LID 的主要措施包括生物滞留池、草地渠道、植被覆盖、透水性路面等(Davis, 2005; Gilroy and Mccuem, 2009; Damodaram *et al.*, 2010; Qin *et al.*, 2013)。因此, 从微观尺度研究 LID 措施在不同重现期降水下的水文调控性能具有重要意义。

在城市内涝的大背景下, 本书试图从 3 个方面来寻求城市内涝问题的改善途径: ①采用暴雨强度公式修订后的管网进行水动力学模拟; ②采用 DCIA 代替 TIA 来表征城市区域不透水性系数, 进而分析 DCIA 的应用对于城市内涝的改善作用; ③微观海绵体的 LID 雨洪调控措施的水文调控性能。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 降水时空演变特征及其机理探讨

在全球气候变暖背景下, 极端降水事件增多, 严重影响人们的生产生活, 受到越来越多的关注。翟盘茂(2007)、杨金虎(2008)等研究认为中国极端降水事件的时间变化存在明显的区域性差异, 由此根据行政划分、水文流域、气候特征分类的相关研究纷纷开展。

任国玉等(2005)利用 1951 年至 1996 年地面气象记录资料, 计算了我国全年和季

节降水量长期变化趋势特征指数。结果表明,我国不同地区的降水变化呈现不同的规律且一些地区的降水呈现出季节性的变化;宋连春和张存杰(2003)利用英国东安哥拉大学气候研究中心(CRU)的 Hulme 最新的 1900~1998 年的全球降水量资料,分析了 20 世纪西北地区降水量的变化特征。结果表明,20 世纪西北地区降水量处于下降通道中,后期略有回升;西北地区东部和西部降水量的年代际变化有相反的趋势;20 世纪后期西北地区中西部降水量有明显的增多趋势,东部降水量持续偏少,干旱连年发生。徐宗学和张楠(2006)简要分析了黄河流域降水空间分布规律,结果表明,对于年降水序列,有 65 个气象站呈现下降趋势,4 月、7 月和 10 月对年降水下降趋势贡献较大,但其趋势空间分布情况存在差异。李红梅等(2008)基于中国地区 740 台站的日降水资料,细致分析了近 40 年我国东部盛夏即 7、8 月降水长期趋势和年代际变化特征。按小雨、中雨、大雨以及暴雨降水强度分类,探讨了不同强度降水在我国东部降水变化中的贡献。结果表明,中国东部地区盛夏降水变化主要受暴雨强度降水变化的影响,占总降水变化 60%以上。此外,国外对降雨时空变化规律也开展了大量研究,如 Nicholls 等(2012)对澳大利亚的降水规律进行了研究,其结果表明,1952~2002 年的年平均降水量要显著高于 1911~1951 年的年平均降水量,且其空间变异性也发生了一定的变化;Krishnamurthy 等(2009)利用 1951~2003 年的印度日降水数据进行分析,结果表明印度大部分地区的极端降雨量和频率均有显著的变化趋势。

通过对不同国家不同地区降雨时空变化趋势的研究可以发现,世界很多地区的降雨强度出现显著增加,极端降雨事件虽有较强的区域差异,但在各地区均表现出向极端化发展的趋势。

在降水时空演变的机理分析方面,目前研究已经达成共识,普遍认为全球气候变化和城市化是导致城市降雨发生变化的重要原因。近百年来,全球气候变化已经成为一个不争的事实。在全球气候变化的背景下,各地区随之而来的气温变化和降水量波动也尤为明显,因此基于较长时间尺度的气温和降水量变化带来的气候带界线波动成为人们关注的焦点。吴福婷和符淙斌(2013)利用 477 个地面观测站上的日降水数据分析了中国整个降水强度谱在 1961~2008 年的长期变化特征。结果发现,毛毛雨整体呈现出空间一致的减少趋势,但不同区域的减少幅度存在明显差异,合成分析的结果显示全球尺度上气温和降水之间存在着准线性关系,不同强度的降水对全球性增暖的响应有所不同。吴福婷(2011)根据全球和我国的逐日降水资料以及相关的气温、湿度、云量、地表辐射、蒸发等要素的观测数据,通过分析表明,在温度升高超过一定程度时,全球尺度上的极端降水与全球气温变化之间存在定量的相关。Changnon(1981)在对 METROMEX 观测资料分析和数值模拟的基础上,指出城市对夏季中等以上强度的对流性降水的增雨效果尤其显著,并提出了城市增强降水并影响其分布的 3 种假说机制:①城市热岛效应;②城市下垫面和冠层的摩擦效应;③城市凝结核效应。虽然这 3 种城市化增加降水的机制存在不确定性,但是几十年来仍不断地出现新的研究结果支持 METROMEX 计划的研究结论(束炯,1987;李昀英等,2008;蒋维楣等,2009)。

1.2.2 城市化的水文效应

城市化的水文效应主要体现在水文机制（hydrologic regime）的改变。水文机制是 一定气候条件及水文下垫面条件下的产物。水文下垫面包括地表面的岩石、土壤、植被 和水域等各种要素，在城市化区域主要指对透水性和汇水过程影响较大的城市地表面。 城市的快速扩张导致下垫面及地表情况发生了显著的变化，从而导致蒸发蒸腾量以及降 雨-径流过程中的截流、填注以及土壤入渗等产流和汇流过程发生了显著的变化（万荣 荣和杨桂山，2004）。水文机制的改变主要体现在水量平衡的变化，洪峰流量的峰值 和时间的变化、较大径流和较小径流在大小、时间及频率分布上的变化、以及水质的 恶化等。

1) 水量平衡的变化

除人口密度增加外，城市化的另一个显著特征是建筑物密度增加导致不透水性面积 增加以及天然排泄系统向人工排泄系统的转变。不透水性面积的增加减小了降水入渗速 率并显著增加了地表径流量（Paul and Mayer，2002），人工排泄系统在快速地输送径 流的同时，也减少了地下水的入渗补给并增加了地表径流量（Vicars-Groening and Williams，2006）。因此，城市化对水文机制最直接的影响表现为水量平衡的变化，并 主要体现在地表径流的增加、蒸发蒸腾量及地下水入渗补给量的减少（Poff *et al.*，1997； Sklar and Browder，1998；DeWalle *et al.*，2000；Kennish，2001）。研究表明（表 1.1）， 随着不透水性表面比例的增加，地表径流呈增加趋势，而蒸发蒸腾、浅层和深层地下水 入渗均呈递减趋势。自然地表覆盖的状态之下，地表径流仅占 10%，地下水入渗占 50%； 而当不透水性面积比例为 75%~100%时，地表径流占 55%，入渗地下水仅占 15%。

表 1.1 城市化对水量平衡的影响

水量平衡要素	蒸发蒸腾	地表径流	浅层地下水入渗	深层地下水入渗
自然地表覆盖	40%	10%	25%	25%
10%~20%不透水性表面	38%	20%	21%	21%
35%~50%不透水性表面	35%	30%	20%	15%
75%~100%不透水性表面	30%	55%	10%	5%

资料来源：Federal Interagency Stream Restoration Working Group（FISRWG），1998。

目前，国内在城市化对水量平衡影响方面的研究主要体现在利用监测手段以及模型 进行分析及模拟。金云（2003）通过对监测数据进行分析，发现上海的城市化使得该市 区年平均风速较郊区减小 20%~30%，无风日的天数增加了 5%~20%，从而减缓了蒸 发速度，并进而减小了蒸发蒸腾量。王玉成等（2008）对不同土地利用变化对沈阳市区 产流的影响进行了初步估算，结果表明 2005 年比 2001 年的径流系数增加了 58%；产流 增值最大的是 2001 年，这与同期该市建设用地面积增长最快相对应，从而验证了城市

化所导致的区域下垫面的变化改变了地表的入渗能力，显著增加了地表径流量。葛怡等（2003）、史培军等（2001）利用 SCS 水文模型分别对上海和深圳地区城市化引起的地表径流变化、洪峰流量以及径流系数变化进行了研究，证实了城市化所带来的土地利用变化是流域内径流发生变化的重要原因之一。王艳君等（2009）以城市化流域-秦淮河流域为例，采用 SWAT 分布式水文模型，探讨和研究了土地利用变化对水文过程的影响，结果表明，土地利用变化对流域的径流影响较大，城市化使得区域的年径流量明显增加。秦莉俐等（2005）利用 L-THIA 城市水文模型对浙江临安市南苕溪以上流域，定量分析了城市化对径流的长期影响，主要结论为在相同的雨量情况下，下垫面条件的变化是导致径流量变化的主要因素。

无论是国内还是国外的研究，均表明城市化对水量平衡产生了显著的影响。地表径流量的增加对城市的排泄系统及雨洪调控措施有了更高的要求，而入渗补给地下水量的减少也显著减小了地下水的可开采水量，从而在干旱缺水地区产生了严重的缺水问题。

2) 径流在大小、频率及持续时间上的变化

地表形态的变化将导致汇流过程的加速以及水文活跃区域的增加。水文活跃区域是指在降水时间中产生径流的区域，由于城市化使得植被丧失、地表的截留能力降低，因此，相比较天然状态，水文活跃区域呈明显增长趋势。不透水性面积的增加，使得地下水入渗补给水量减小、地表径流流量增加、曼宁系数减小，人工排泄系统缩短更进一步地地缩短了汇流过程（Vicars-Groening and Williams, 2006），增大了较大洪峰流量发生的频率（Arnold and Gibbons, 1996; Moscrip and Montgomery, 1997; Whitea and Greer, 2006），使得水文曲线的形状发生了显著的变化。图 1.1 为一次典型降水事件下，天然状态及城市化后的流量过程线。

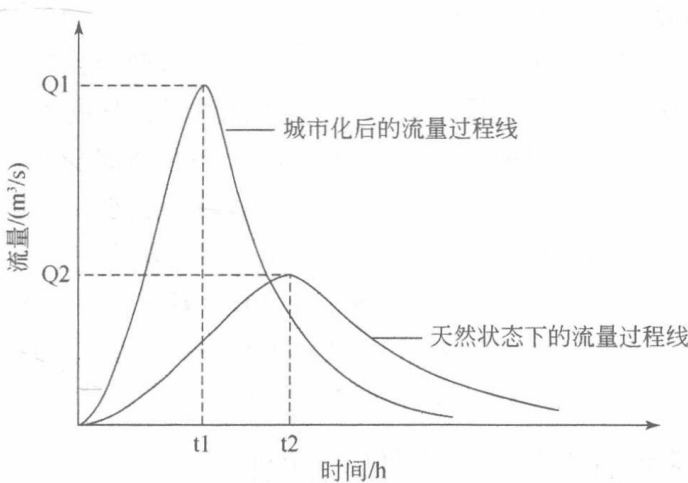


图 1.1 一次降水事件下不同发展情景的流量过程线
(据 Vicars-Groening and Williams, 2006, 修改)

由图 1.1 可以看出，在一次降水事件中，天然状态及城市化后的流量过程曲线发生

了显著变化,主要表现为基流量减少、洪峰流量增大、到达洪峰流量时间缩短以及总地表径流流量增加。城市化后,其水文曲线上升和下降速率都大于天然地表覆盖下的速率。地表径流流量在增加的同时,也增强了其输送污染物及对天然河道侵蚀的能力。除此之外,相比较天然状态,某一洪峰流量峰值出现的频率变大,意味着洪水事件的增多。随着地下水入渗的减少,地下水位下降,因此,由地下径流向河道的基流量减少。

目前,国内在该方面的研究主要为城市化对径流系数、最大洪峰流量以及汇流时间的缩短的影响,关于频率和持续时间方面的研究相对较少。程江等(2010)采用SCS-CN修正模型,研究了上海城中心土地利用变化对径流的影响,结果证实同等设计暴雨重现期条件下的径流系数有显著的增加。袁艺等(2003)以经历了快速城市化发展的深圳市典型小流域-布吉河流域为例,采用分布式水文模型就土地利用变化对城市化流域暴雨洪水汇流过程的影响进行了模拟,模拟结果表明,城市化通过改变土地利用形式,使得暴雨洪水的最大洪峰流量和径流量加大,汇流时间变短。郑璟等(2009)采用SWAT模型同样以深圳市布吉河流域为例,系统模拟了不同土地利用条件下的流域水文过程,主要理论成果为:土地利用条件的不同可导致流域水文过程发生极大的差异,并导致各水文要素的空间和年际分布特征发生改变。柳笛(2009)通过研究武汉城市化对径流的影响,得出城市化使得地表径流系数增大、洪峰流量增多、汇流时间缩短的结论。

总体而言,城市化使得洪峰流量增大,汇流时间缩短,较大洪峰流量的降水事件的频率增大,从而显著增加了洪涝灾害发生的概率,对城市防洪系统产生了巨大的压力。

3) 湖泊河网衰退消亡,水质恶化

城市化后,人口增长,人类活动增加,排放的污染物明显增多,其中难降解的有机物占很大比例,超出了天然水体自净能力,恶化了水体环境,并进一步影响区域水环境。据统计,1997年中国废污水排放量约584亿t,2008年为758亿t,12年间增加了450亿t。目前中国约80%的水域、45%的地下水、90%以上的城市水源受到污染。许有鹏等(2009)采用遥感和GIS为辅助手段,分析了长江三角洲地区的城市化的水文效应,发现城镇化的快速发展,改变了流域河网的形态,造成河流缩窄变短,平均河网密度和水面率下降,水质净化能力明显下降,并进而造成洪涝灾害加剧以及河流水质恶化等问题。在城市化对水质的影响方面,国外的研究相对比较深入,且主要集中在氨氮污染累积及其对生态系统的影响(Vitousek *et al.*, 1997; Lee and Caporn, 1998; Fenn and Poth, 1999; Fenn *et al.*, 2003; Meixner and Fenn, 2004)、重金属(Pouyat *et al.*, 2007; Bain *et al.*, 2012)以及泥沙量的增加(Nelson and Booth, 2002)等方面。

1.2.3 暴雨强度计算公式国内外研究现状

城市暴雨引起的城市洪水排放设计是城市功能设计的一项主要工作,也是保护人民群众生命财产安全的基本要求,是促进城镇化健康发展、建设生态文明社会的重要内容。城市建设在规划和设计时必须遵循和依据与国家城市建筑设计相关的规范要求,其排水管网系统遵循科学可靠的原则。城市雨水排水系统规划和设计的基本依据之一是城市暴

雨强度的推求(杨勇, 2010)。暴雨强度的变化会影响到城市排水系统的规划以及设计的合理性, 使其经济效益达到最大化。可是, 当前各城市使用的暴雨强度公式所收集的降雨资料年限很短, 大部分属于 20 世纪 80 年代以前。除此之外, 当时的城市对排水系统设计的要求不高, 所以重现期往往不长, 如 3 个月、6 个月, 在较大城市也不过是使用两年一遇的重现期。因此, 在这种背景下, 并为了响应中华人民共和国国家标准《室外排水设计规范》(GB50014-2006)(2014 版), 一些专家建议根据较长重现期的降雨资料, 采用年最大值法重新编制暴雨强度公式, 并建议采用年最大值法, 从而可以更好地反映水文气象规律的周期性以及统计样本的随机性和独立性。目前, 发达国家也一般采用年最大值法推求暴雨强度公式(周黔生, 1995; 周玉文等, 2011)。

这几年来, 城市化发展建设十分迅速, 高楼明显增多, 使城市的不透水性地面面积增大, 产生了城市的热岛效应; 与此同时, 随着全球变暖, 极端降水事件的频繁发生, 强度有不断加大的趋势。《IPCC 第五次评估报告》明确指出气候变暖对水循环已经产生了明显的结果, 极端天气, 诸如干旱、洪水等自 20 世纪 50 年代起显著增多(据联合国政府间气候变化专门委员会, 2013 年)。在这种情况下, 对排水管道不利的短历时雨强大的降水事件所出现的频率和强度均有所增加, 而我国大多数城市基础设施设计较早, 并没有对这一类型的降水事件进行充分考虑, 因此造成了排水管道设计能力不足, 所造成的直接后果是暴雨(或强降水)过后城市内涝和积水严重(岑国平, 1999)。

城市内涝的发生是多因素共同作用的结果, 但是, 采用了较低的重现期降水以及较短的降雨资料, 从而不能与气候变化所引起的暴雨的强度的变化相匹配, 并导致城市排水管网的设计不符合当前状态, 是其中的一个主要原因。为了对这一问题进行修正, 我国于 2014 年重新对原有的国家标准《室外排水设计规范》(GB50014-2006)(2011 年版)进行了修订, 目前要求排水管网的设计必须遵循的设计规范是《室外排水设计规范》(GB50014-2006)(2014 年版)该规范明确提出, 重现期的推求应该采用年最大值法, 但仍存在以下问题: ①现在大多城市所用的暴雨强度公式依然是年多个样法; ②根据规定, 城市在规划和设计排水工程时, 应根据当地的暴雨强度公式计算设计排水量; ③规范还要求, 应充分考虑气候变化对降水量及降雨特征的影响, 如影响较大, 需要对暴雨强度公式进行及时修订。因此, 规范使用的需要要求合理地编制当地的暴雨强度公式, 对提高城市防灾减灾和防洪排涝能力也有很大帮助。

根据上述内容, 因为温室效应, 热岛效应, 厄尔尼诺现象, 降水的强度频率均有所增加, 进而导致城市降雨也发生了较大变化, 导致城市内涝灾害频发, 严重影响了城市的正常运行, 收集最新的雨量记录资料, 并依据科学的方法对现有暴雨强度公式进行修订, 是当下急需去做的工作。为了改善这些情况, 探索建立适合城市自身的暴雨强度计算公式, 全国各地都积极开展了暴雨强度公式的修订工作, 郑州市也不例外。当暴雨强度公式修订以后, 相对应的其排水管网的设计也要发生相应的变化。因此, 在这种背景下, 对暴雨强度公式修订后的管网的输水能力进行分析具有重要的意义, 一方面可用来分析暴雨强度公式修订后对雨洪管理的启示作用; 另一方面也可分析暴雨强度公式修订

后的管道是否能在某一定程度上因为暴雨强度改变而带来的城市内涝问题。

1.2.3.1 暴雨资料的选择

有两种渠道可以获取暴雨资料,第一种是现代自动气象站的自动记录的逐分钟降雨量资料;第二种是当地的气象部门的自记纸形式记录的降雨资料。暴雨资料选择是编制暴雨强度公式的基础,暴雨资料选择方法的科学性对暴雨强度公式的精度和频率分布曲线有着直接的影响。目前,国内暴雨样本的选取方法主要有年最大值法、年超大值法、年多个样法、超定量法(郝树棠,1989;任伯帆等,2003)。由于自记雨量资料的年限较长,且可将较高重现期的降水用于排水管网设计,因此,国外发达国家在20世纪70年代已经采用年最大值法作为暴雨强度公式的选择方法,并在90年代开始采用年超大值法进行样本的选取(Amell *et al.*, 1984; Falkovich *et al.*, 2000)。在国内,由于缺乏自记雨量资料记录、计算技术相对落后,加上基础信息不够系统,因此在一定程度上限制了暴雨的选择,一般采用超定量法选择。

虽然自20世纪60年代起,根据规范要求,推荐使用年多个样法选择,但水文部门和国内气象一般选用年最大值法选择进行水文分析,主要是因为年多个样法选择的资料不仅独立性较差,在资料收集方面困难较大,除此之外,年多个样法选择的工作量大,且重现期概念与国际通行不符,这些因素均限制了年多个样法选择使用的限制。相对比,年最大值法具有选择简单、独立性好等优点,且其能够很好地与水利等部门衔接,因此,国内各城市多选用最大值法选择。80年代中期以来,邓培德(1996)、周黔生等建议采用年最大值法选择,邵尧明(2003)进一步通过实例论证了采用年最大值法选择的优点,并认为年最大值法选择是一个趋势。最新《室外排水设计规范》(GB50014-2006)(2014版)亦将年最大值法作为推荐的取样方法(邵丹娜等,2013)。至此,在推求新的暴雨强度公式时,应采用年最大值法选择。

1.2.3.2 暴雨资料的频率调整

确定选择方法后,接下来的工作就是根据原始资料建立统计样本,并在此基础上利用各种频率分布模型计算出反映当地暴雨发生规律,并统计其降雨强度-降雨历时-重现期的关系,即*i-t-P*关系表。调整频率后的*i-t-P*数据关系表是计算暴雨强度公式的源数据,因此该表的合理可靠对暴雨强度公式的精度有着直接影响,并起着保障性、基础性作用。作为一种常用的水文频率分析方法,暴雨资料频率调整,是指选取与现有资料契合最优的频率曲线模型,从而恰当准确地反映该地区暴雨发生的规律。频率曲线模型主要用于对水文系列进行内插或外延的频率分析工具。据不完全统计,目前国内外应用的有20多种频率分布曲线模型(Cunnane, 1989)。

各地在选取频率分布曲线模型时,一定要因地制宜,充分考虑当地的水文气象、自然地理等条件,选择依据充分、形式灵活、应用简单、易于接受的模型。表1.2列出了国内外在暴雨(洪水)频率分析中常采用的分布线型(Cunnane, 1989)。

表 1.2 暴雨（洪水）频率分布线型表

分布线型	国家
皮尔逊III型分布（P-III）	中国、保加利亚、奥地利、瑞士、匈牙利、罗马尼亚、泰国、波兰
对数皮尔逊III型分布（P-III）	美国、澳大利亚、新西兰、墨西哥、加拿大以及南美洲一些国家
广义极值分布（GEV）	爱尔兰、英国、法国等和非洲一些国家
极值II，极值III型分布（EV2，EV3）	英国、法国等和非洲一些国家
两、三参数对数正太分布（LN2，LN3）	日本
极值I型分布（EV I）	德国、比利时、瑞士、土耳其
K-M 分布	俄罗斯和东欧等国

目前，国内主要采用 3 种分布模型，即皮尔逊III型分布（P-III）（夏宗尧等，1990，1997）、指数分布（邓培德等，1985，1992；乔华等，1996）和耿贝尔分布（Chow，1953；Schaefer *et al.*，1990）。20 世纪 50 年代，P-III 曲线在水文部门被广泛用于水文以及城市暴雨资料的统计分析。之后，指数分布模型也被用于暴雨资料的统计中。但是，具体选用哪一种分布模型用于对样本资料进行频率调整，尚未有统一的结论。周文德（1983）建议使用两参数分布线型，主要因为 P-III 曲线是三参数模型，而原始资料对偏态系数 C_s 的影响较大。顾骏强（2000）对 4 种分布模型进行对比分析，且结果表明指数分布模型具有最好的拟合效果，推荐使用指数分布模型。邵尧明（2003）基于浙江省 32 个市（县）的暴雨资料为，进行了年多个样法和年最大值法，结合 P-III 曲线、指数分布曲线、耿贝尔分布曲线推求暴雨强度公式，并进行比较分析，其结果表明基于年最大值选样和指数分布曲线推导出的暴雨强度公式相比其他组合具有最高的拟合精度。季日臣（2002）则认为指数分布只是 P-III 分布中的一个特例，其 $C_s=2$ ，且 P-III 分布要优于指数分布，故推荐采用 P-III 分布模型推求暴雨强度公式。

1.2.3.3 城市管网水动力学模拟

城市排水管网系统是由节点和排水管道组成的网络。在排水管网水力模拟模型中，排水管网系统通常概化成节点和排水管道连接形成的环状或树状网络系统。其中，管道用线来表示，一般为圆形管道，其他形状的沟渠，如天然或人工渠道，可以采用自定义的形状，主要作用为输送雨水。节点用来表示交叉点、雨水口、调蓄设施、检查井、泵站、管网出水口等，其主要作用为连接管线、地表雨水调蓄的作用（黄学平和柯颖，2012）。

城市排水管网的水流状态主要是非恒定流，按其压力状态分为有压非恒定流和无压非恒定流。当降雨强度较小时，排水管网中的水不能被全部充满，此时水流按照重力作用，由地势比较高的地方向地势比较低的地方流动，此时为无压非恒定流，即重力流。而当遇到短历时大暴雨时，管道内流量迅速增大并充满整个管道，可能出现非恒定压力流。当管道管径较小，排水能力不足时，检查井会开始蓄水，当检查井积水深度大于井深时，开始出现地面积水漫流。此外，城市雨水管道系统在向下游传输径流的同时，

也在不断地汇集各支管的水流,因此流量沿程不断增加,但当没有支管汇入时,沿管线和节点传输过程中峰值又会出现变动。由此可见,城市雨水管网中的水流状况非常复杂,与天然河网的汇流既有相似也有差异(柳园园等,2016)。

降雨经地表产汇流进入排水管网系统后,需经管网汇流最后排入河道、湖泊等受纳水体。管网汇流的模拟方法有多种,如水库调蓄演算法、时间漂移法, Muskingum-Cunge 法、扩散波法、非线性运动波法和动力波法。目前对于管网汇流采用的数学计算模型以水动力学方法为主,其核心是求解圣维南方程组(谢莹莹,2007)。

目前,SWMM 被广泛应用于城市管网的水动力学模拟(Martínez-Solano *et al.*, 2016; Bisht *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2017)。SWMM 模型提供恒定流法、运动波法和动力波法 3 种方法用于管道的汇流计算。其中,恒定流法假定在每一个计算时段流动都是恒定和均匀的,是最简单的汇流计算方法。运动波法可考虑管渠中水流随空间和时间发生的变化,但是在求解回水、逆流和有压流动、入口及出口损失方面仍有一定的局限性。动力波法通过求解完整的圣维南方程组来进行汇流计算,是最准确也是最复杂的方法。模型建立时,将连续性和动量平衡方程用于管道,而将水量平衡方程用于节点。

1.2.3.4 研究存在的问题

作为科学、合理地制定城市排水工程规划和设计的基础,暴雨强度公式为市政水务与规划等部门提供了科学的理论依据和准确的设计参数。目前,对我国大多数城市而言,城市排水与排涝分别属于水利和市政两个领域,在学术研究上,两者也分别属于水利学科和城市给排水学科。而一个城市的防汛工作则由两个行业来共同合作完成。为了保证城市防洪排涝的安全,两个部门各有自己的设计标准。水利部门有两种设计标准,分别是排涝标准和防洪标准。它们的重现期一般较高,防洪的标准可从一遇到最高万年一遇。而市政部门采用的是较低的重现期标准,一般只有一遇,有的甚至一年几遇。如何将两个标准统一起来仍是目前急需解决的问题。

1.2.4 DCIA 的研究进展

目前,关于 DCIA 的研究方面,在其产流的重要性方面已经取得了共识(Ladson *et al.*, 2006; Han and Burian, 2009; Hamel *et al.*, 2013; Carmen, 2014; Shields and Tague, 2015; Ebrahimian *et al.*, 2016; Hwang *et al.*, 2017)。British Lloyd-Davies Rational Method 假设直接与城市管网相连的不透水性区域的面积(DCIA)贡献了城市区域 100%的地表产流量(Heaney *et al.*, 1977)。DCIA 目前的研究主要集中在对 DCIA 的设定方面。

城市不透水性区域面积是一个和区域具体特征相关的指标,但是其测量是比较复杂的。一般而言,人们认为城市不透水性面积比例与城市人口密度具有密切的关。Novotny 和 Olem (1994)在其研究中表明,居民区的总不透水性面积比例和单位面积的管道长度具有显著的线性相关关系。Debo 和 Reese (1995)研究了一种通过 DCIA 的数值来判断区域 CN 值得方法。Schueler (1994)总结了不透水性面积比例对于城市水环境要素