

长江三角洲地区 城市化对流域水系与水文过程的影响

许有鹏 等著



科学出版社

长江三角洲地区 城市化对流域水系与水文过程的影响

许有鹏 等 著

科学出版社

北 京

P344.25
XP14

内 容 简 介

本书针对长江三角洲地区城市化快速发展所引起的流域下垫面、河流水系以及水文过程的变化,系统开展了城市化发展下的水文效应研究。书中首先基于不同时期遥感影像解译,对比分析了城市化对流域下垫面的影响;通过不同时期地形图叠加,探讨了城市化对河流水系的影响。其次借助长系列降雨径流资料,揭示了城市化对降雨径流的影响;通过对平原水网地区水位过程的变化分析,探讨了城市化对水位过程的影响。在此基础上,基于城市化小流域实验观测以及水文模型的计算分析,模拟预测了城市化对降雨径流与暴雨洪水的影响;并通过景观格局、水生态环境变化研究,分析了城市化对生态环境的影响。

本书可为我国城市化发展对流域水文、水资源与水环境影响的研究提供参考,也可供地理、水利、生态、环境科学、资源与可持续发展等相关领域的科学研究人员、工程技术人员、管理决策人员及大专院校、科研院所师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

长江三角洲地区城市化对流域水系与水文过程的影响/许有鹏等著.
—北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-033258-5

I. ①长… II. ①许… III. ①长江三角洲-城市化-影响-区域水文学
IV. ①P344.25

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第280199号

责任编辑:杨 锐 张 鑫 罗 吉/责任校对:李 影

责任印制:赵德静/封面设计:许 瑞

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>

北京天时彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012年5月第一次印刷 印张:15

字数:344 000

定价:69.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

流域水文过程是气候因素和下垫面条件共同作用的结果,城市化的快速发展导致了流域下垫面土地利用类型与河流水系的变化,使得流域内的降雨径流规律发生改变,从而引起流域内水文过程的变化及一系列水问题。

长江三角洲地区目前是我国城市化发展最为迅速的地区之一,城市化有力促进了当地经济的发展。但近年来随着城市化的快速推进,大量天然河流水系遭到破坏,导致河网水系数量锐减,由此引发了河流水质恶化、河道生境破坏、生物多样性降低、洪旱灾害频繁发生等一系列水文、水资源与水环境问题,并已严重威胁到人类的生存环境,影响了区域经济的可持续发展。

为此,本书以长江三角洲地区为例,重点围绕城市化发展对流域下垫面、河流水系、水文特征及暴雨洪水规律的影响,开展我国东部城市化发展下水文效应研究,初步获得了城市化对流域下垫面、河流水系以及水文过程影响的特征规律,从而为东部地区防洪减灾、水环境保护和经济持续发展提供支持。本书主要包括以下内容:

本书选用 20 世纪 90 年代以来三个不同时期的卫星遥感影像,对长江三角洲地区内各典型区域的土地利用/覆盖变化进行解译分析,从而定量评估不同城市化发展时期下垫面变化特征;并通过 20 世纪 60 年代以来不同时期地形图资料叠加对比分析,获得各典型区域河流水系功能衰减程度,初步揭示该地区河网密度、水系结构和功能衰减与城市化之间的关系;基于 20 世纪 60 年代以来各流域城市与郊区不同时段降雨资料的对比分析,揭示城市化发展对流域水循环中降雨过程的影响,定量评价各区域的城市“雨岛效应”;利用 20 世纪 50 年代以来长系列水位资料,采用多种分析方法,分析典型区域城市化背景下极值水位、年均水位增加趋势,揭示城市化发展对水位过程的影响;选择城市化区以及相邻不同覆盖实验小流域,开展暴雨洪水的同期对比观测,并选用多种水文模型,定量模拟预测城市化发展对径流与洪水过程的影响,揭示城市化过程中土地利用/覆盖变化的水文效应特征,并预测分析未来城市化对水文过程的影响;最后以太湖流域杭嘉湖地区为例,从景观格局变化、城市水环境变化、湿地生态安全、生态系统健康状态变化等方面,初步评价城市化发展对流域生态环境的影响。

全书共分为九章:第一章主要分析开展该研究的迫切性,并介绍当前城市化水文效应的研究进展;第二章借助卫星遥感影像的解译,分析长江三角洲地区城市化发展对流域下垫面的影响;第三章主要基于不同时期地形图资料叠加对比分析,探讨城市化发展对河流水系的影响;第四章则利用长系列降雨径流资料,探讨城市化对降雨径流的影响;第五章则通过太湖平原等水网地区水位过程的分析对比,探讨城市化对极值水位等水位过程和水系调蓄能力的影响;第六章主要通过城市化小流域实验观测与模拟分析,探讨城市化过程中的水文变化规律;第七章则通过水文模型的模拟预测,定量评估城市

化对水文过程的影响；第八章主要通过城市化地区景观格局、河流水环境以及湿地生态评价分析，评价长江三角洲地区城市化对生态环境的影响；本书最后对城市化水文效应研究进行了展望分析。

本书拟通过推动我国东部地区城市化发展对流域下垫面、河流水系以及水文过程的影响研究，促进城市水文学的发展。通过野外实验观测与实验模拟累积的一批城市水文研究基础数据，不仅为我国东部城市化地区河流保护、洪涝灾害防御、水环境保护以及水资源可持续利用提供决策依据，也可对其他城市化高度发展地区提供借鉴和参考。

本书系国家自然科学基金重点项目（40730635）“长江三角洲城市化对河流水系与水文过程影响”、水利部水利公益专项（200701024、201201074）“长江三角洲城市化对洪水孕灾环境的影响”、“改善长江三角洲地区水系结构与河湖连通研究”，以及国家自然科学基金面上项目（40571025）和教育部中国高校博士点研究基金（20060284019）的综合研究成果。

本书由许有鹏总体负责，都金康、张立峰、王腊春、王慧敏、柯长青、高超、王栋等参与了本书的研究分析。各章主要编写人员如下：第一章与第九章由许有鹏编写；第二章由徐光来、周峰、徐宏亮、李国芳、柯长青编写；第三章由尹义星、徐光来、石怡、王柳艳、余铭婧编写；第四章由丁瑾佳、尹义星等编写；第五章由尹义星、徐光来、蔡娟编写；第六章由徐金涛、陈莹编写；第七章由陈莹、周峰、都金康编写；第八章由马爽爽、宋松、陈奕编写。最后由许有鹏审校定稿。同时徐光来、周峰、罗贤参加了全书的审校工作。此外，叶正伟、潘光波、吕慧华、邵玉龙、廖邦固、陈淑兴、陈云霞、于瑞宏、杨明楠、韩龙飞、周慧平等博士及硕士研究生也参加了本书的研究工作。本书还得到刘国纬教授、陈钦峦教授、崔广柏教授以及文康教授等专家的多方指导和帮助，长江三角洲地区有关流域单位和人员在资料收集、野外实验以及流域考察等方面也给予了大力支持和帮助，在此深表感激，一并致谢。

本书虽在长江三角洲地区城市化对流域下垫面与河流水系以及对水文过程影响的研究方面取得一些进展，但由于影响城市化地区水文过程的要素错综复杂，涉及自然、社会经济以及生态环境等多方面因素，而且不同地区城市化水文效应有不同特点和规律，城市水资源与水环境问题仍亟待深入研究。

由于作者水平与时间限制，本书目前只是初步成果，许多方面还有待进一步深入分析和完善，书中不妥之处敬请批评指正。

许有鹏

2011年12月

目 录

前言

第一章 概述	1
1.1 城市化与水文过程	1
1.2 国内外研究进展	2
1.3 主要研究内容与方法	5
1.3.1 研究内容	5
1.3.2 研究方法	6
1.4 主要成果简述	6
1.4.1 研究分析途径	6
1.4.2 研究成果分析	7
第二章 长江三角洲地区城市化与流域下垫面变化特征分析	13
2.1 区域概况	13
2.1.1 区域位置	13
2.1.2 自然地理特征	15
2.2 城市化进程分析	17
2.2.1 城市化指标	17
2.2.2 城市化进程	18
2.3 下垫面特征的遥感信息提取	20
2.3.1 数据源的选取	20
2.3.2 下垫面特征的提取	20
2.4 城市化进程中的下垫面变化	22
2.4.1 总体下垫面时空变化特征	22
2.4.2 各区域下垫面变化分析	27
2.5 小结	34
第三章 长江三角洲地区城市化进程中水系格局变化	36
3.1 武澄锡虞区与阳澄淀泖区城市化进程中水系格局变化	37
3.1.1 水系提取、分级与指标选取	37
3.1.2 水系变化特征分析	39
3.1.3 水系演变影响因素分析	41
3.2 杭嘉湖区城市化进程中水系格局变化	43
3.2.1 水系提取分析	44
3.2.2 水系特征变化	45

3.2.3	河网结构变化	47
3.2.4	水系演变影响因素分析	50
3.3	浦西区和浦东区城市化进程中河道水面变化	51
3.3.1	水系提取分析	52
3.3.2	河道变化分析	52
3.4	秦淮河区城市化进程中水系格局变化	54
3.4.1	水系提取分析	54
3.4.2	评价分析指标分析	55
3.4.3	水系变化与影响因素分析	55
3.5	鄞东南平原区城市化进程中水系格局变化	60
3.5.1	水系提取分析	61
3.5.2	水系变化特征	62
3.5.3	水系演变影响因素分析	66
3.6	城市化发展对水系衰减影响分析	67
3.6.1	影响因素分析	67
3.6.2	河流保护分析	68
3.7	长三角水系变化特征	70
第四章	长江三角洲地区城市化对降雨径流的影响	72
4.1	城市化对降雨的影响	72
4.1.1	资料与站点的选择	72
4.1.2	城市化对年雨量的影响	74
4.1.3	城市化对汛期雨量的影响	76
4.1.4	城市化对冬季雨量的影响	79
4.1.5	城市化对不同量级降雨的影响	80
4.1.6	城市化对降雨影响的趋势分析	83
4.1.7	不同时期降雨集中度和集中期比较	84
4.2	城市化对太湖平原产水量的影响	86
4.2.1	土地利用变化与流域产水量	86
4.2.2	月产水量计算模型	87
4.2.3	产水量变化与太湖水位	88
4.3	城市化对径流的长期影响	91
4.3.1	苕溪流域概况	92
4.3.2	数据基础	92
4.3.3	西苕溪模拟分析结果	93
4.3.4	东苕溪模拟分析结果	95
4.4	小结	98
第五章	长江三角洲地区城市化对河网水位及水系调蓄能力的影响	101
5.1	太湖腹部区城市化进程中水位过程变化	101

5.1.1 水文变异指标分析	102
5.1.2 河网极值水位时空变化	105
5.1.3 水位历时曲线分析	109
5.2 太湖腹部区水位变化与城镇化的关系	112
5.2.1 研究区水系与水位分形之间关系	112
5.2.2 水位变化对城镇化的响应	115
5.3 太湖腹部区水系调蓄能力变化	118
5.3.1 调蓄能力的地区差异	119
5.3.2 不同年代调蓄能力的变化	120
5.3.3 不同等级河道的调蓄能力差异	121
5.4 长江三角洲其他地区水位过程变化	122
5.4.1 秦淮河地区	122
5.4.2 奉化江流域	124
5.4.3 杭嘉湖地区	126
5.5 小结	128
第六章 城镇化小流域水文实验观测与计算分析	130
6.1 城镇化水文实验方法	130
6.2 城镇化水文实验区的选择与设计	131
6.2.1 城镇化小区的暴雨洪水实验	132
6.2.2 不同类型小流域对比实验观测	132
6.3 实验观测成果与分析	134
6.3.1 城镇化小区的实验观测与计算分析	134
6.3.2 城镇化实验小区暴雨洪水模拟	136
6.3.3 不同类型实验区观测结果分析	139
6.4 小结	144
第七章 城镇化水文效应的模拟与预测	145
7.1 流域城镇化长期水文效应的模拟与预测	145
7.1.1 模拟模型的建立	146
7.1.2 城镇化水文效应的模拟分析	154
7.1.3 城镇化水文效应的预测分析	159
7.2 流域城镇化对暴雨洪水的影响	165
7.2.1 暴雨洪水模型的建立	165
7.2.2 城镇化下暴雨洪水模拟	172
7.2.3 城镇化对暴雨洪水影响预测分析	175
7.3 小结	177
第八章 长江三角洲地区城市化对生态环境的影响	179
8.1 研究区概况及城市化特征	180
8.1.1 杭嘉湖地区概况	180

8.1.2 杭嘉湖地区城市化特征	180
8.2 城市景观格局变化	182
8.2.1 城市化综合水平	182
8.2.2 景观动态变化分析	183
8.2.3 城市化与景观动态变化的关系研究	188
8.3 城市水环境变化	191
8.3.1 城市周边区域水环境概况	191
8.3.2 控制站点的水质情况	191
8.3.3 城市环境熵值模型	192
8.4 城市化对生态系统健康的影响	195
8.4.1 主要指标的计算	196
8.4.2 生态系统的健康评价	198
8.5 城市化对湿地生态的影响	198
8.5.1 城市化对湿地景观格局的影响	198
8.5.2 城市化对湿地生态环境需水的影响	203
8.5.3 城市化对湿地综合生态安全的影响	212
8.5.4 杭嘉湖地区“城市-湿地”系统耦合协调分析	216
8.6 城市化过程中的生态环境效应	218
第九章 结论与展望	221
9.1 主要结论	221
9.2 展望分析	222
参考文献	224

第一章 概 述

1.1 城市化与水文过程

水文过程是气象因素与下垫面条件共同作用的结果。随着城市化的快速发展,流域下垫面土地利用方式与河流水系形态结构产生了较大变化,流域内的降雨径流形成规律发生改变,最终导致流域水文过程的变化。由此,引发了洪涝灾害现象频繁发生、河流水质恶化等一系列水文、水资源与水环境问题。当前城市化发展对流域下垫面、河流水系以及水文过程的影响已成为人们十分关注的问题。

长江三角洲是当前世界上最大的三角洲之一,也是世界上最大的都市圈(城市化群)之一。它以约占全国1%的土地和6%的人口,创造了全国17%的国内生产总值(GDP),是我国经济最发达的地区之一。然而,随着经济的迅猛发展,工业化及城镇规模的不断扩大,洪涝灾害以及水环境恶化问题也随之加剧。长江三角洲地区洪涝灾害频发及水环境恶化现象的出现,与该区气象因素、下垫面条件、自然地理状况以及人类活动密切相关。其中,地理特征和流域水系特点决定了其洪涝多发性,而区域内河网密度大幅度减小、河网结构趋于简单,导致了该区洪涝灾害频繁发生、水污染状况不断加剧。此外,气候变化和土地利用/覆盖变化使得该区水循环过程发生较大改变,而城市化所引起的河流水系变化则对洪水过程产生显著影响,同时河流水系功能衰减与河道淤积也使得河流自净能力下降。

在各种因素的综合作用下,长江三角洲地区洪涝灾害频繁发生,水环境问题日趋严重,在很大程度上制约了其现代化建设的进程与可持续发展。因此,探讨该地区城市化发展对流域下垫面地表覆盖与河流水系的影响,分析下垫面及河流水系变化对降雨径流、河道水位等水文循环要素的影响,既有利于城市化进程中流域防洪减灾的研究,也可对变化环境下水文特征与洪涝变化规律有更深入的了解。

基于城市化对洪涝孕灾环境影响等防洪减灾研究的迫切性和必要性,本书开展了城市化对河流水系与水文过程影响的研究,主要涉及以城市化为代表的人类活动对河流水系的影响、流域下垫面及河流水系变化对流域水循环和水文特征的影响、水循环和水文过程变化对洪水过程以及水环境的影响等方面的探讨分析。其研究内容不仅有利于对新形势下城市化地区水文特征变化规律的深入了解,还可为我国东部城市化地区防洪减灾及水资源持续利用提供决策依据;其研究成果必将为当前人水关系研究提供良好的素材及有力的技术支持,为我国东部其他城市化高度发展地区的河流保护、洪涝灾害防御、水环境保护以及水资源可持续利用的研究提供较好的借鉴和参考。

1.2 国内外研究进展

城市化（也称为城镇化^①）是人类社会发展的必然进程，其发展给流域下垫面的土地利用方式以及地表覆盖带来较大影响。城镇和工矿企业规模的不断扩大，使得流域下垫面由透水性较好的农业用地向透水性较差的城镇用地转变，原有的河道水系被人工排水渠道、管网所代替，下垫面的产、汇流条件发生了很大变化。因而，城市化的水文过程的独特性，促使了对城市水文的研究。近年来，随着我国城市化进程的加快，城市水资源短缺、洪涝灾害加剧以及水环境恶化等城市水问题日趋引起了人们关注，城市化水文效应以及城市化对洪涝风险与孕灾环境的影响已成为当前人们关注的热点领域。

城市化对河流水系、水循环以及水文过程的影响也是国际水文研究中备受关注的课题之一。国外从 20 世纪 60 年代起就开始关注城市化对水文过程的影响。70 年代欧美等发达国家相继开展一些城市水文的研究与实验观测工作。1975 年 UNESCO “水文十年”计划中就已开始城市化对水文影响的研究，同时许多学者相继开始进行有关土地利用/地表覆盖变化对河流变化与水文过程影响等方面的工作，且一些城市水文实验观测以及遥感和 GIS 技术逐渐应用到水文领域。此外，城市河流水生态与水环境问题也不断受到重视，尤其是日本学者在城市河流的自然治理方面进行了较深入的研究。80 年代以来，随着国内城市化进程的加快，我国也陆续开展了城市水文的研究工作。目前，国内外在城市化进程对河流水系、城市气候与水循环、城市暴雨洪水、城市水文模型、城市水生态环境以及城市水安全的影响等方面已取得一批有价值的研究成果，但这些研究工作尚未能综合开展，基本是以单个城市或城市内的汇水单元进行的。

1) 城市化等人类活动对流域下垫面与河流水系的影响

随着城市化的发展，土地利用方式发生变化，尤其是河道渠化以及城市给排水管网的建设使流域内原有水循环路线发生较大变化。为此国外研究主要集中在土地利用变化、河流泥沙以及河道渠化等方面（Hooke, 2005; James, 2006），2006 年召开的国际地貌学大会还以“人类在改变河流系统中的作用”为主题开展研讨。国内早期从河流地貌学以及河流水沙动力学角度来研究长江、黄河等大江大河的中下游河流水系变化。近年来随着城市化的快速发展，众多河流水系相继消失，河道人工渠化严重，且河网形态结构发生不同程度的改变，由此引发的洪涝干旱、水质恶化等问题日趋严重。与此同时，人们对河流变化规律研究的重视程度也日益增强，并开始从防洪、排涝以及水生态环境保护的角度对河流水系变化开展研究分析。目前，国内在城市化对河流水系影响方面已开展一些研究，杨凯、袁雯（2005）从水环境角度对上海市河网水系变化开展诸多研究；陈德超等对上海城市化进程中的河网水系演化进行研讨，不仅揭示出上海河网水系因城市化锐减，还提出河流自然排水功能下降、径流系数增加不利于排水的结论；而

^① 城市化与城镇化的概念在城市规划等学科中有一定差别。本书主要分析城市化和城镇化所引起的流域下垫面变化以及这种变化对水文、水资源与水环境的影响，故对这两个概念不加严格区别。

陈云霞等(2006)则从洪涝灾害角度对城市水系的变化开展研究。但国内外对水系结构的研究主要集中于自然状态或局部小流域,并且以自然树枝状水系形态较为多见,而对大规模高度城市化的平原河网地区水系结构的表征方法及其规律的研究相对较少,河网地区分类中难以直接采用 Horton 与 Strahler 河流分级体系,一定程度上影响了平原河网地区水系形态的研究。目前,城市化下河流水系变化对水文过程影响等方面的研究仍处于起步阶段,相关的研究工作亟需开展。

2) 城市化对降雨的影响

早在 20 世纪初,众多学者就开始关注城市降水方面的观测分析研究,并从理论上证实了城市“热岛”和“雨岛”效应。目前国外已有许多相关研究成果,国外学者通过比较圣路易斯、华盛顿、斯德哥尔摩等城市以及同期不发达的城市或郊区,得出城区降雨量呈显著增加趋势的结论。20 世纪 60 年代以来,国内在广州、上海、南京与杭州等一些大城市也曾开展类似研究(朱元铎等,1991)。其中,周建康(2003)对南京降雨量的统计分析表明,该区域发生大雨、暴雨的频率及年降雨量均呈现增加趋势;周桂明(1989)发现杭州的城市环境变化使降雨量增加了约 13%~15%;李天杰(1995)指出城市化对上海存在显著的增雨效应;李娜等(2006)就苏州城市化对降雨的影响进行分析,认为城市化对年雨量、汛期雨量和最大日雨量都有不同程度的增加作用,其中对最大日雨量的影响最为显著。同时,北京、天津等城市开展了城市化对气候和降雨的影响研究,利用一些城市小区实验观测资料,通过统计分析、频率计算和推理公式的方法,对城市降雨、设计暴雨和洪水进行计算(杨凯,1993;李蝶娟、刘俊,1999)。然而,城市化对降雨的影响仍存在一定的不确定性,更深层次的规律及机理还有待进一步研究探讨。

3) 城市化对径流与洪水影响

目前主要采用概念性水文模型来模拟分析城市化进程中降雨径流、暴雨洪水以及河流水环境变化状况。如国外学者采用美国水土保持局的 SCS 模型计算方法,分析相同雨量条件、不同下垫面状况下,城市化对径流的长期影响(Bhaduri et al., 2001; Hundecha, 2004)。目前这方面分析较多采用美国的 SWAT 模型和 HEC 模型,并已取得较好的模拟效果。在模拟分析时,首先通过研究流域的实测降雨径流资料确定模型参数,调试好所选水文模型,并进行验证分析;然后选择相同的典型降雨序列作为输入,根据未来城市化发展下各种土地利用与地表覆盖变化状况,借助 GIS 空间数据库,通过图形叠加分析计算,模拟预测未来城市化发展对径流、洪水以及水质过程的影响。而对城市化小区水文计算,目前广泛采用城市暴雨洪水模型。国外较著名的城市水文模型有 SWMM、STORM、ILLUDAS 等。这些模型大多将城市划分成不同大小的汇水小区,采用 Horton 或 Philip 下渗公式计算透水面积基础上的产流,应用简化非稳定流方程及动力波理论计算地面和管网汇流。近年来,我国在城市暴雨洪水综合模拟方面也取得一些可喜成果,如刘俊等(2006)对 SWMM 模型加以改进,提高了其在我国城市暴雨洪水中的实用价值;徐向阳(1998)针对平原城市的雨洪过程,提出了针对平原城市

特点的计算模型,包括产流子模型、坡面汇流子模型、管网汇流子模型和河网汇流子模型,经验证表明成果较为合理可靠。

4) 城市化水文效应实验研究

国外已开展了许多观测研究。美国学者 Witala 早在 1961 年,通过对密歇根州 RedRun 流域的观测分析,得出城市化发展使洪峰流量达到未开发时的 2~5 倍,迟滞时间是开发前的 $1/5 \sim 1/2$,以及城市化导致流域洪水更加频繁的结论。国内城市水文实验研究的起步相对较晚。1988 年,北京市水文总站设置了四个城市功能的典型实验区,开始观测不同城市化程度及不同土地利用状况下暴雨洪水过程的变化。吴学鹏等(1992)通过实际观测和概化模型实验提出当不透水面积比例超过 20% 时,城市化影响明显;徐向阳(1998)和刘俊等(2006)结合实验观测并应用 SWMM 模型,分别就上海市、北京市集水小区城市化发展对雨洪的影响进行分析,结果表明城市规模的扩大、不透水面积的增加导致降雨入渗量减少、径流系数加大、地表径流量和洪峰流量加大。虽然国内外众多研究已表明城市化对流域水文过程的影响,但不同地区城市化对水文过程影响程度不同(Chang, 2007),各地区城市化水文效应仍存在一定差异。

5) 城市化对洪涝灾害的影响

城市化进程的快速推进使得流域地表属性以及河湖水系特征均发生较大变化,并由此引发孕灾环境的变化。国外十分关注气候变化背景下城市化对洪涝的影响,特别是城市不透水面积增加、水系格局变化等土地利用变化所引起的灾害效应。如在欧洲多瑙河流域、美国洛杉矶市、韩国釜山等地的研究均表明,快速城市化发展导致地表径流量增加、洪峰强度增大、城市化负面水文效应增加,而水系格局的演化,如河道渠化、水面率与河网密度减小等,引起洪涝灾害加剧。目前我国一些地区如珠江流域、上海市区,已开展洪涝孕灾环境变化的相关研究,较好地探讨了城市化过程中下垫面变化对孕灾环境的影响。珠江流域的研究发现,高强度人类活动是珠江三角洲河网区水文与地貌特征变异的直接原因;上海市区的研究表明,城市化进程中河流水系变化对其调蓄能力的影响显著。

6) 城市河流生态环境研究

城市化与生态环境之间客观上存在着较为复杂的耦合关系,城市化发展的直接后果是导致城市的土地利用/覆盖发生剧烈变化,从而致使城市景观格局在不同水平下发生剧烈变化。随着城市化进程对生态环境影响的显著增加,城市化与生态环境之间关系的研究引起国内外学者的广泛关注。城市化与生态环境之间的响应机理,是人地关系地域系统研究的热点问题,也是面向可持续发展的人文过程与自然过程的综合研究方向之一。

国外对城市化与生态环境问题的研究开始较早,自 19 世纪末期,历经起源、展开和多元化阶段,主要涉及地理学、经济学、生态学、社会学等领域的研究。国内从 20 世纪 70 年代开始对城市化与生态环境的关系展开研究,进展较快,多集中于城市化引

起的城市生态环境效应、城市社会-经济-自然复合系统、生态城市、健康城市及可持续发展等方面的研究；同时通过研究城市化进程中景观格局变化来探讨城市发展所伴随的景观组成和斑块的变化，及由此产生的生态环境效应。随着新技术、新理论、新方法的应用，目前国内外学者将土地利用与景观格局变化分析作为研究生态环境效应的突破点。

而在城市水环境模拟研究方面，国外学者利用降雨径流模型模拟出城市化影响下非点源污染过程。在国内，杨凯、袁雯等（2004）针对上海市黄浦江流域平原水系大规模消失的状况，开展河流水系结构与生态环境关系的研究；陈云霞、许有鹏等（2006）围绕甬江流域开展流域下游河网水系消失现状分析及其对洪涝和水环境影响的研究。随着“工程水利”向“资源水利”的转变，人们对河流保护研究的重视日益增强，城市化地区水利部门正着手开展流域保护规划，把河流湿地保护与水生态修复的研究提上重要日程。

虽然城市化对水文过程的影响已有许多研究，但目前国内关于城市化背景下，流域下垫面及河流水系变化对水文过程影响的研究仍处于起步阶段。尤其是我国城市化水平较高的长江三角洲平原地区，河网水系纵横，河流水系形态结构受人类活动影响较大，在高强度人类活动干扰下，该地区河湖演变及河网水系变化对水循环与水文过程的影响等方面的研究亟待开展。

1.3 主要研究内容与方法

1.3.1 研究内容

本书针对长江三角洲地区（简称为长三角地区）下垫面以及河流水系的特点，探讨城市化发展等人类活动对下垫面与河流水系以及水循环与水文过程的影响，重点研究全球变化背景下以城市化高度发展为代表的流域下垫面条件改变对水文特征以及暴雨洪水的影响，分析长江三角洲地区城市化流域洪涝变化规律，以及河流水系变化对水环境的影响，主要包括以下三方面的内容。

1) 城市化发展对下垫面与河流水系的影响

应用长江三角洲地区各水系单元不同时期遥感影像、地形图以及土地利用图等图件资料，分析不同时期城市化发展对流域下垫面土地利用与地表覆盖的影响，重点分析区域内不透水面变化情况、河湖水面与水系格局变化过程，探讨其时空变化特征及规律，从而定量分析城市化发展对流域不透水面及河流水系等下垫面变化的影响。

2) 流域下垫面与河流水系变化对水循环及暴雨洪水的影响

选取研究区内典型流域，利用长系列降雨径流资料分析对比，结合典型流域实验观测分析，研究不同城市化水平下水循环过程中降雨径流及河流水位的变化，分析城市化发展下河流水系变化对流域年雨量、汛期雨量以及平原区河流水位的影响；探讨城市不透水面、河流水系的变化对城市暴雨洪水的影响，继而寻求城市化对暴雨洪水影响的规

律。由此,基于研究区内历史暴雨洪水资料,结合实验区径流实地观测数据,建立流域降雨径流模拟模型,开展不同城市化水平下洪水过程的模拟分析,模拟预测研究区城市化发展对降雨径流与暴雨洪水的影响。

3) 城市化发展对水生态环境的影响

根据城市化发展及下垫面变化对生态环境的影响特点,开展城市化发展对生态环境影响的研究。通过城市化与景观格局以及城市化进程与生态环境健康之间的关系,综合评价分析城市化对流域生态环境的影响。主要针对研究区快速城市化导致河网水系大规模消失、河道淤积等水系格局显著变化的背景情况,探讨研究区河流水系变化对生态环境的影响,探寻河道调蓄能力下降、河流水环境恶化与生物多样性减少以及湿地生态变化的内在原因,从而为水环境保护提供支持。

1.3.2 研究方法

借助遥感、遥测和地理信息系统(GIS)等技术的支持,采用多学科交叉的研究方法,将宏观和微观相结合、确定性分析与特征统计相结合、水文模拟与地理综合相结合,探讨长江三角洲地区城市化对下垫面与河流水系以及水循环与水文过程的影响,重点分析城市化对孕灾环境与洪涝灾害风险的影响。

在时间尺度上,通过不同时期遥感图像、河网水系图以及长系列历史水文资料,对比分析人类活动对流域下垫面、河湖水系及河网格局的影响,分析下垫面变化对水循环过程以及径流长期变化的影响,研究不透水面积增加、河网水系变化引起的水文过程与洪涝特性变化等水文问题;在流域空间尺度上,通过遥感图像的解译分析、典型流域水情监测分析,以及实验流域野外对比观测,分析不同区域城市化发展对下垫面、河湖水系、暴雨洪水过程以及水生态环境的影响。

在此基础上,利用遥感与GIS技术,建立城市化地区降雨径流模拟模型,定量分析城市化发展对水文过程的影响;并通过综合评价模型,定量分析城市化对洪涝灾害的影响,协调城市化发展与洪涝灾害的关系,为城市化地区可持续发展提供支持。

1.4 主要成果简述

1.4.1 研究分析途径

(1) 通过野外调研,收集研究区各主要水系自20世纪60年代以来不同时期的地形图、土地利用图等有关流域下垫面特征的图件以及自20世纪90年代以来三个典型时期的TM遥感影像,同时收集长三角地区各区域雨量、水位及部分径流资料,建立研究区遥感与GIS空间图形数据库与水文数据库,为研究区城市化发展对洪涝孕灾环境研究提供数据支撑。

(2) 通过20世纪90年代以来不同时期遥感影像解译和信息提取,编绘出研究区各典型水系单元不同时期土地利用/地表覆盖类型图,分析不同时期、不同城市化发展水平下城市土地利用变化过程,据此探讨长三角地区城市化发展对流域下垫面变化的影

响;通过与 20 世纪 60 年代以来不同时期地形图等叠加对比,重点分析太湖腹部苏锡常地区城市化对湖荡与河流水系的影响,同时分析其他不同类型水系单元区城市化背景下河湖水系的变化情况。

(3) 通过研究区长系列雨量、水位以及径流等水文资料分析计算,开展长江三角洲地区城市化发展对年雨量、汛期雨量等不同特征降雨影响的研究,并以太湖腹部的苏锡常地区为典型探讨下垫面与河流水系变化对平原水网水位变化的影响,选择太湖上游西苕溪等部分闭合流域开展城市化发展对径流影响的研究。同时以西苕溪安吉县城所在小流域为实验区,开展不同土地利用类型小流域野外径流的对比观测实验,收集多场暴雨洪水与河流水质实验观测数据,为城市化发展对水文过程的影响研究提供较完整的实验资料。

(4) 建立多个不同类型的水文模型,重点以太湖上游较为闭合的西苕溪流域为典型,综合模拟分析和预测城市化发展对降雨径流与暴雨洪水过程的影响规律,同时针对城市化发展对水环境的影响也开展部分探讨分析。

(5) 选择太湖流域杭嘉湖地区,开展城市化发展对生态环境影响的研究。从景观格局变化、城市水环境变化、生态系统健康状态变化等方面进行探讨,重点考察城市化综合水平与景观生态格局之间、城市化进程与水环境以及生态环境健康之间的关系,并且以区内西溪湿地为例,具体分析城市化发展对湿地生态系统的环境效应。

1.4.2 研究成果分析

本书通过对我国东部城市化对水文影响问题的探讨分析,初步获得城市化对流域下垫面、河流水系以及降雨径流等影响的特征规律,揭示出城市化背景下洪涝灾害的变化规律,获得了城市化下水生态与水环境的变化特征。其主要研究成果主要反映在以下几点。

1) 定量描述城市化发展不同时期的下垫面变化

根据长三角地区各时期城市化进程的特点,选取 1991 年、2001 年以及 2006 年三个典型时期卫星 TM/ETM+遥感影像,对长江三角洲范围内的苏锡常地区、杭嘉湖地区、秦淮河流域、黄浦江流域等各水系单元的土地利用/地表覆盖变化信息进行解译分析,借助 GIS 空间分析方法对各典型时期下垫面土地利用/地表覆盖时空变化进行定量分析,探讨城市化对下垫面、河湖水系以及不透水面积的影响,初步得出长三角地区在城市化发展影响下,各水系单元内的不透水面增加、湖荡河道等水体萎缩的变化特征。

长三角地区自 1991 年以来土地利用/覆盖类型发生明显的变化。主要表现为城镇面积大幅度增加,城镇面积比重由 1991 年的 5% 增加到 2001 年的 9% 和 2006 年的 18%,而耕地(水田、旱地)和水域面积则呈现减少的趋势。土地利用转化方向上主要呈现为耕地(水田、旱地)向建设用地转移,城市化发展主要向耕地索要土地。由于城市建设亦通过围湖造地、填河造地等方式侵占水域用地,水域面积亦有所减少。城市化发展速度在 20 世纪 90 年代相对缓慢,2000 年以后城市化进入高速发展时期,城镇面积所占比重显著增加,各区域土地利用/覆盖类型之间的变化也更加剧烈,城市化发展趋势与

社会经济指标变化趋势相一致。

太湖流域城镇用地面积由 1991 年的 2648 km² 增加到 2006 年的 10 015 km², 扩大了近 3 倍。尤其在 2001 年以后城市化速率明显加快, 其 5 年的增加量是 20 世纪 90 年代 10 年增加量的 1.5 倍。而水田、水域的面积却大幅减少, 水田从 1991 年的 63% 下降到 2006 年的 45%, 减少了近 1/3; 水域面积由 1991 年的 5420 km² 下降到 2006 年的 4203 km², 使得流域水面率下降了 3%。太湖流域土地利用变化特征说明, 在高度城市化地区, 城镇用地的增加主要来自水田、耕地与水域的转化。

长三角其他流域如秦淮河流域、里下河地区以及甬、曹、浦区等也获得了类似结论, 表明不同分区的土地利用/覆盖变化趋势较为一致: 城市化发展在 20 世纪 90 年代相对缓慢, 2000 年以后进入高速发展时期; 在变化趋势上均存在着城镇用地增加、耕地和水域减少的趋势。城镇用地的增加是以牺牲耕地和水域为代价的, 城市化发展迫切要求加强对耕地和水域的保护。上述分析成果为下垫面变化对水循环和水文过程影响研究创造了条件。

2) 获得不同时期各区域河流水系衰减程度

针对长三角地区各水系单元区域面积大小以及可获取的资料情况, 选取武澄锡虞区、阳澄淀泖区、杭嘉湖区、浦西区、浦东区、秦淮河区和奉化江鄞东南区共七个城市化进程中下垫面变化较显著的平原河网地区, 分别采用不同比例尺地形图数字化、高分辨率卫星遥感和航空遥感影像以及数字地图等多种途径, 对 20 世纪 80 年代以来不同时期的河流水系进行提取分析。针对长江三角洲地区平原水网区的特点, 按照河流地貌学分类方法进行分级, 建立不同时期河流水系结构图, 然后借助 GIS 分析技术, 将各时期同等比例尺水系图相叠加, 通过河网水系分级量算、形态特征统计以及图形叠加对比等方法, 探讨城市化发展等人类活动对河湖水系的影响。

通过分析可以看出长三角地区在城市化进程中, 各区域河网密度和水面率均呈减少的趋势。太湖流域武澄锡虞区和阳澄淀泖区 20 世纪 60 年代~21 世纪初分别减少 44.0% 和 26.9%, 杭嘉湖地区 1991~2006 年间分别减少 25.4% 和 31.8%, 浦西浦东区 2000~2007 年间分别减少 19.6% 和 11.6%, 鄞东南平原区 1978~2003 年间分别下降 7.5% 和 22.1%, 秦淮河中下游平原区 1980~2009 年间河网密度减少 41%, 水面率总体上略有增加 (20 世纪 80 年代为 6.38%, 2009 年为 7.52%), 主要集中在中、低度城市化地区, 与这一地区大量鱼塘的开挖有关。在时间变化上, 近年来河网密度和水面率衰减有加速趋势, 仅武澄锡虞区和阳澄淀泖区 20 世纪 60~80 年代河网密度与水面率分别减少 11.2% 和 7.63%, 而 20 世纪 80 年代~21 世纪初分别缩小达 36.9% 和 20.8%, 其他地区大部分也有类似情况。同时城市化较快区域的河流长度、河流面积、河网密度、河网水面率比城市化较慢区域下降更快。此外, 河流非主干河道长度衰减速度大于主干河道, 河网复杂度降低, 水系趋于主干化。

对比河网水系演变与研究区城镇扩展、人口分布格局变化, 发现人口增加较迅速的区域, 随着城市化等人类活动的加剧, 河网水系结构和功能不断衰减, 河流水系数量减少、结构趋于单一, 河流水系变化和城市化发展进程关系密切。