

城镇化背景下 平原水系变化及其 水文效应

徐光来 许有鹏 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

城镇化背景下 平原水系变化及其 水文效应

徐光来 许有鹏 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

城镇化背景下平原水系变化及其水文效应/徐光来,许有鹏著. —武汉:武汉大学出版社,2016. 12

ISBN 978-7-307-19073-3

I. 城… II. ①徐… ②许… III. 平原—水系—水文地质—研究—中国 IV. P641.62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 315545 号

责任编辑:鲍 玲 责任校对:李孟潇 版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:13.75 字数:199千字 插页:1

版次:2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷

ISBN 978-7-307-19073-3 定价:32.00元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

本书由国家自然科学基金青年项目“平原河网水系测度与演化机制研究——以杭嘉湖区为例”(41301029)、国家自然科学基金重点项目“长江三角洲城市化对河流水系与水文过程的影响研究”(40730635)、水利部公益性行业科研专项经费项目“改善长江三角洲地区水系结构与河湖连通研究”(201201072)、水利部公益性行业科研专项经费项目“长江三角洲地区城市化对洪涝孕灾环境的影响研究”(200701024)资助。

前 言

流域下垫面及河流水系变化对水文水资源的影响研究是当前水文领域研究的热点之一。太湖流域是我国城市化快速发展的典型区域,近 50 年来伴随着城市化为代表的剧烈人类活动,流域内土地利用方式、水系格局发生了显著的变化。这些变化使得太湖流域洪涝灾害等极端事件日益频发。研究太湖流域高强度人类活动干扰下的河流水系形态、结构变化规律及其对水文与水资源的影响,对流域防洪减灾、社会经济可持续发展都具有重要的理论意义和应用价值。

杭嘉湖平原区地处太湖流域南部,占整个流域面积 1/5,是太湖流域最大的平原。由于地形与水系条件的限制,该地区洪涝灾害频繁发生。而城市化下水系快速衰减以及水系连通受阻引起的洪、涝宣泄不畅等又加剧了这一现象的发生。因此,城市化下水系格局、连通变化及其水文效应是当前迫切需要研究的科学问题。

本书以杭嘉湖平原河网区为研究区域,综合应用 GIS 空间分析、水文时间序列分析、弹性贡献率分析、水文变异指标分析,以及多种水系特征参数比较分析等技术和方法,对研究区域不同阶段水系结构/格局特征、近代人类活动干扰下水系变化规律、水系变化对特征水位的影响、水系与水位变化对区域水量调蓄和连通的影响等方面进行了较系统深入的研究探讨,为区域水系管理、修复、规划和变化环境下的防洪排涝等区域可持续发展战略措施提供理论研究参考和数据支持。本书的主要研究包括:

①太湖流域水系结构特点以及历史演化背景;

从不同历史时期太湖流域水系形成、平原河网地区水系特点角度,分析了太湖水系的发育特点和水文特征,为近代以城市化发展

为标志的人类活动对水系的影响分析提供背景分析的基础资料。

②杭嘉湖地区近代水系结构变化;

以河网密度、水面率、河网发育系数、河流面积长度比、盒维数、河型曲度等为参数,对杭嘉湖地区近 50 年水系特征和格局变化进行了分析,并按照不同分区进行了对比研究。同时将研究区分成城市区、河网区和多湖区几类典型区进行具体分析,分别阐述其变化特点;对水系参数之间的关系进行了描述。结果显示:

近 50 年来,杭嘉湖地区河网密度、水面率、盒维数下降,水系呈主干化的趋势,且这种趋势在加剧。水系变化的地区差异明显,河网密集区水系衰减更为严重。典型城市区水面率较其他地区小,1980s 后出现较重要的城市防洪疏浚、新挖河道工程。典型河网区河网密集,下降明显,河网主干化,大型水利工程主引水系格局。典型湖区水面率较大,下降不明显。各水系特征参数之间有一定的相关性。

③杭嘉湖地区近代水系连通变化;

基于杭嘉湖河网地区水位相邻站点水文变化的响应关系,提出一种水文连通性评价方法,结果表明,杭嘉湖地区水文连通性变化受水系格局影响,与主干河道相连的站点水位连通性增大,无主干河道的站点水位连通性降低。

基于水力阻力和图论提出一种河网连通性评价方法,并评价了杭嘉湖南排工程实施后河网连通性变化,结果表明,河网连通性增加了 56%,本书提出的河网连通性方法有效可行。

④城市化下水系变化对水位的影响;

采用 Spearman 检验、克里金插值、变动范围法(RVA)等多种方法对城镇化背景下河网水位过程进行不同时间尺度分析,并对比了城市和郊区站点的水位变化。结果表明:

近 50 年来,杭嘉湖水位呈增加趋势,年最高水位、年平均水位和年最低水位增率分别为 $0.03\text{m}/10\text{a}$ 、 $0.05\text{m}/10\text{a}$ 和 $0.09\text{m}/10\text{a}$;月最低水位/最高水位序列分析结果,超过 90% 的序列城市化后的水位平均值高于城市化前。郊区地区,平均值增加、 C_v 增加,城市地区平均值增加、 C_v 减小;各站点日均水位城市化后中位数均

增加,水位异常值较城市化前增多;城市站点水文变异以中低变异度为主,水文变异指标(IHA)有集中于RVA目标的趋势,郊区站点以中高变异度为主,水文变异指标有离散于RVA目标的趋势。

⑤水系结构与连通变化对调蓄和洪涝的影响。

采用回归分析、弹性分析等方法对杭嘉湖地区水位变化原因进行了分析,在此基础上分析了杭嘉湖地区水系结构与连通变化对调蓄和洪涝的影响。结果表明:

人类活动是水位变化的重要原因。人类活动对最高水位、平均水位和最低水位变化的贡献值分别为39.0%、56.2%和82.9%。降水与城市化对水位影响的双变量弹性分析显示,降水是水位变化的主要原因,城市化对水位的影响逐渐增大。水位变化的贡献率中,最高水位:降水>人类活动>城市化;平均水位:人类活动>降水>城市化;最低水位:人类活动>降水>城市化。

河网水系调蓄变化分析结果表明:各区总体上槽蓄能力、可调蓄能力下降,二级支流和一级支流下降更为明显。研究区洪涝分析表明:致灾暴雨天数缩短,其中水系的蓄泄能力降低是重要原因。水面率越大的地区、河网越稠密的地区,河道水位上涨越慢。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及研究意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	4
1.2 国内外相关研究进展	5
1.2.1 河网水系演变理论研究	5
1.2.2 河网水系演变定量方法研究	6
1.2.3 人类活动对水系演变的作用研究	9
1.2.4 水系连通性研究	13
1.3 研究工作基础与研究内容	15
1.3.1 研究内容	15
1.3.2 研究方法	16
1.3.3 研究数据与资料来源	16
1.3.4 技术路线	17
第2章 研究区概况与水系特点	19
2.1 研究区选择与概况	19
2.1.1 研究区选择	19
2.1.2 研究区的地质、地貌	20
2.1.3 气候	21
2.1.4 水系	24
2.1.5 社会经济概况	27
2.2 研究区不同历史阶段水系格局	29

2.2.1 太湖形成的主要学说	29
2.2.2 太湖流域不同阶段水系格局分析	30
2.3 研究区水系演化规律与特点	38
2.3.1 太湖流域水系格局变化规律	38
2.3.2 太湖平原水系特点	39
第3章 杭嘉湖地区近代水系结构变化	41
3.1 水系数据与参数	41
3.1.1 水系数据获取	41
3.1.2 水系分级	43
3.1.3 水系特征和水系结构参数	48
3.2 近50年水系变化	54
3.2.1 全区水系变化	55
3.2.2 水系变化的空间分异	62
3.3 水系变化特征分析	79
3.3.1 城市地区	79
3.3.2 河网密集地区	81
3.3.3 湖泊面积较大地区	84
3.4 水系变化原因分析	86
3.5 本章小结	86
第4章 杭嘉湖地区近代水系连通变化	89
4.1 水文连通变化	89
4.1.1 水文连通性概念	89
4.1.2 水系变化对水文连通性的影响	91
4.2 基于水力阻力和图论的杭嘉湖南排工程后河网 连通性评价	97
4.2.1 河网加权连通性分析方法	98
4.2.2 杭嘉湖南排工程后的河网连通性变化	102
4.3 本章小结	107

第 5 章 杭嘉湖地区水系变化对水位的影响	108
5.1 数据与方法	108
5.1.1 数据	108
5.1.2 研究方法	109
5.2 近 50 年杭嘉湖地区水位变化时空分析	111
5.2.1 年代际水位变化	111
5.2.2 年尺度水位变化	112
5.2.3 月尺度水位变化	117
5.2.4 水位的日尺度变化	130
5.3 杭嘉湖地区水文(水位)变异分析	136
5.3.1 水文变异指标	136
5.3.2 RVA 水文变异分析结果	139
5.4 本章小结	150
第 6 章 杭嘉湖地区水系变化对调蓄与洪涝的影响	152
6.1 水位变化原因分析	152
6.2 降水与人类活动对水位影响的定量分析	159
6.3 基于弹性系数的降水与城市化对水位变化 影响贡献率	163
6.3.1 水位变化的降水、城市化弹性贡献率	165
6.3.2 水位-降水-城市化关系	168
6.3.3 不确定性分析	175
6.3.4 人类活动、降水、城市化对水位影响的 贡献率分析	175
6.4 水系变化对调蓄的影响	175
6.4.1 河网调蓄的参数指标	176
6.4.2 水系槽蓄能力	177
6.4.3 水系可调蓄能力	179
6.5 水系变化对洪涝的影响	182
6.5.1 杭嘉湖洪涝灾害	182

6.5.2 水系变化对洪涝的影响	186
6.6 本章小结	189
第7章 结论与展望	191
7.1 主要结论	191
7.2 创新点与特色	194
7.3 问题与展望	195
参考文献	196
后记	208

第1章 绪 论

1.1 研究背景及研究意义

1.1.1 研究背景

(1) 太湖流域洪涝灾害日益加剧

太湖流域位于长江三角洲核心区域,是我国城市化发展水平最高、经济发展最快的地区之一,在我国具有十分重要的地位。然而太湖流域洪涝问题一直是影响该区人类生产活动的重要因素,已严重制约区域社会经济的可持续发展。20世纪太湖流域发生较大洪水的年份有:1911年、1921年、1931年、1949年、1954年、1957年、1962年、1963年、1969年、1977年、1983年、1984年、1991年、1993年、1995年、1999年等(吴泰来,2000;林泽新,2002)。20世纪50年代以来,太湖流域频繁出现超警戒水位洪水,洪涝灾害呈加剧的趋势。20世纪90年代以来,区域成灾暴雨的雨日天数由20世纪50年代的60~90d,缩短到30~40d。其中1991年、1999年两次特大洪涝灾害,经济损失均超过100亿元。以1999年流域性大洪水为例,水位起涨开始到最高水位用了33d,与以往流域性大洪水比较,比1954年少51d,比1991年少9d(高俊峰,2002)。

杭嘉湖平原区地处太湖流域南部,区域面积约7607km²,约占整个流域面积1/5,人口1282万人,人均GDP约3.8万元。随着杭州、嘉兴、湖州等大中型城市及部分小城镇的迅速发展,

该区城镇化率已达40%(非农业人口比例计),经济发展正处在向中等发达水平过渡。杭嘉湖平原为长江下游洪泛平原,土地肥沃,是重要的商品粮基地。同时,其工业及其他产业在浙江省也占有至关重要的地位。由于其独特的自然地理条件,自古以来,杭嘉湖地区的水利水害状况是制约该区社会发展的重要因素,正如《浙江水利书》记载“夫浙西之于天下,重也;水利之于浙西,又重也……”^①。

杭嘉湖地区属北亚热带季风气候,夏季高温多雨,汛期降雨量为695mm,占全年总降雨量的57%,利于洪水的形成。再加上该区属平原水网区,水流相通,互相影响,河道比降小,流速慢,河口受潮汐影响,河道泄水不畅等特点共同使区域汛期高水位持续时间长,洪涝灾害频繁。区域80%的土地处于洪水威胁范围内(李永和,2000)。杭嘉湖城市化后洪涝灾害有加剧的趋势。隋唐时期320年间杭嘉湖平原仅发生较大水灾8次,平均40年1次^②;而1949—1999年期间较大洪水10次,平均5年一次。洪涝防治应根据形成洪涝灾害的主要矛盾加以解决,而杭嘉湖平原洪涝灾害的主要根源是洪涝水排泄不畅,连通受阻,故应以有利排泄洪涝水、改善水系连通为中心开展研究。

(2) 城市化对平原地区水系结构的影响亟待深入研究

河网水系是由自然因素与人类活动共同作用形成的。城市化作为典型的土地利用变化过程之一,对区域河网水系产生重要的影响。据相关研究表明,全球60%的河道因城市化发生了深刻的改变(Sear & Newson, 2003)。1956年在普林斯顿大学举办的国际研讨会以“人类活动在改变地表的作用”为主题,开展该方面的探讨。2006年国际地貌学会以“人类活动在改变河流系统的作用”为主题,开展了河流地貌专题研讨会,会议对50年来的研究进行了评述和展望,并围绕人类活动如何、为何、何时、何地改变河流系统以及

① (明)姚文灏:《浙西水利书》,汪家伦校注。古浙西指钱塘江以西。

② 李瀚:《苏州嘉兴屯田纪绩颂》,唐文粹卷二十一,四部丛刊本。

未来的哪些改变可预计等方面发表了一系列研究论文 (James, 2006)。区域河网水系的改变增加了洪涝等极端事件的强度和发生概率, 城市化为代表的人类活动对河流水系的研究已经在地貌学界、水文学界得到了越来越多的关注。

研究城市化对水系的影响首先要确立表征水系的方法。除了河流的长度和面积这些基本参数外, 水系结构是水系特征的重要参数。河网水系结构最基本的要素是河流的分支和汇合, 如一流域内不同等级河流之间的长度比、分支比、集水面积比等。分形维度也是表征河网水系结构常用指标, 如 Horton 分维基于河网长度比和分支比表征河网的复杂性。20 世纪 80 年代以来, 对水系结构分维、水系发育过程的研究逐渐开展, 并在各个区域进行实证研究 (Goodechild & Mark, 1987; Tarboton, 1996; Sagar, 1999; 朱晓华、蔡运龙, 2003)。同时, 在研究的数据和方法上逐渐由传统纸质地图向遥感 (RS)、地理信息系统 (GIS) 转变, 尤其是数字高程模型 (DEM) 的引入对水系的提取、水系结构分析带来了深刻影响 (Nikora, 1993; Tarboton, 1996)。但是也有学者对 Horton 定律产生质疑 (Kirchner, 1993; Kirchner, 1994)。Kirchner (1993) 认为 Horton 律长度比、分支比和面积比的狭窄范围, 对于随机河道而言具有统计必然性, 其值的大小对于水系格局的变化不敏感, 因而不宜作为水系结构变化的指标。

河流等级的划分直接影响到水系结构指标, 如 Horton 定律和分形维度的计算, 一般自然水系采用较多的是河流地貌学分级方法, 如利用流域 DEM 数据在 ArcGIS 中进行水系的自动提取和分级。然而因为平原河网地区地处流域下游, 河道纵横, 河网密布, 且因为平原区高程差很小, 难以用 DEM 提取水系。尤其是近代城市化以后, 河流形态特征已经与自然状态不同, 导致现有的河流级别划分方法都难以直接应用。对平原河网地区河流的级别划分也莫衷一是。因此, 对于平原河网地区, 如何选择合适的河流分级方法和水系结构指标评价城市化对水系结构的影响, 还需要进一步探

讨。太湖流域属于快速城市化的平原河网地区,由于其特殊的地理位置、气候和地形条件,洪涝灾害频繁发生。尤其是伴随着城市化进程中水系大幅衰减,太湖流域洪涝灾害等水害呈现加剧的趋势,造成的经济损失也急剧增加。太湖流域城市化对河流水系、水循环的影响迫切需要深入研究。

1.1.2 研究意义

随着我国城市化的快速推进,一系列水文、水资源与水环境问题已严重威胁到人类的生产和生活环境,并影响着经济、社会的持续发展。开展平原水网地区水系结构、水系连通以及城市化响应的研究,是调整平原水网区水系结构、修复和保护河网水系以及区域防洪减灾的重要基础工作。在我国城市化发达的太湖流域,研究高强度人类活动干扰下的河流水系形态、结构变化规律,认识其对流域水文与水环境带来的重要影响,对流域防洪减灾、水环境和社会经济可持续发展都具有重要的理论及现实意义。

一方面,从已检索的文献看,平原河网地区水系结构变化研究尚不充分。对平原河网地区水系结构变化定量研究、平原河网地区 Horton 定律研究以及河湖水系连通研究还有待深入完善。平原河网地区河流分级需要进一步探索,不同的分级方法可能会影响其他的水系结构指标分析;另一方面,可能是由于受到高密度河网庞大的水系数据源的制约,如何从数量、平面形态、组成结构、分布复杂性、弯曲性、网络连通性等方面界定河网水系变化,从而研究城市化进程中,平原河网地区水系变化对调蓄、洪涝的影响,也是当前平原河网地区水系研究的理论和实践课题。

太湖地区洪涝灾害频发及水环境恶化现象的出现,与城市化所带来的河流水系变迁存在显著关联。本书主要以太湖流域杭嘉湖水系为例,探讨城市化发展等人类活动对河流系统结构和水循环过程变化的影响,分析这种影响与洪涝之间的关系,为流域洪灾治理的对策措施提供支持。

1.2 国内外相关研究进展

1.2.1 河网水系演变理论研究

一个流域的河流系统是地质构造与水流侵蚀作用等共同的产品,联系流域与水系变化最直接的影响因素是输入和输出系统的物质——水和沙(沈玉昌、龚国元,1986;倪晋仁,1998)。Schumm (1973)认为水系的形成与气候、地质构造、冲淤平衡和土地利用方式改变有关。关于河网水系的形成有诸多不同的观点。Glock (1931)首先提出水系的形成是由大到小的理论,他认为水系的发育顺序是:首先出现干流,然后再出现支流,接着便出现更小的支流,最后形成致密的水系。他认为,水系的发育可以划分为两个阶段——扩充阶段和调整阶段。扩充阶段又可分为初成时期、延长时期和繁荣时期。水系进入繁荣时期后,河流便相互袭夺或相互吞并,小支流便逐渐减少。戴维斯认为,幼年期的地面,最初在凹陷处出现纵向河流,随着时间推移,原生洼地受顺向水系作用,逐渐出现支流。Horton 提出了从海中升起的地面上的水系发育过程:河流可以在径流长度大于冲刷的临界长度地区发展,相邻河流间存在竞争,发生较早或具有较长径流长度的河流在切割的过程中吞并自己的竞争者(沈玉昌、龚国元,1986)。

巴普罗夫对于水系形成的看法与上述有很大不同,他认为水系的发育过程由小到大,由支流到干流。他在分析平原地区水系发育过程时,根据“河流是地表径流和地下径流集中的结果”的原理,认为河流是由坡面的纹沟,到细沟,到冲沟逐渐发展起来的,当冲沟切入地下含水层时,沟床便经常保持有流动的水,形成了最初的支流,然后再由小支流汇合成大支流,大支流汇合成干流。维尔斯基认为分水岭的地形年代要比流域内其他地区年龄大很多,分水岭坡面上一些侵蚀沟可能要早于河流的年龄,因此水系发育的过程是由小到大。梅舍梁科夫证明,俄罗斯欧洲部分河流的年龄,上游比

下游大得多。从上述资料看,水系的形成是非常复杂的,不同的情况可能有不同的形成方式(沈玉昌、龚国元,1986)。

对于河网水系变迁的研究,也有从历史资料对比角度进行分析的。如国内研究者采用历史文献记载、历史地图,采用历史地理学溯源法、历史地图解读等方法对地质时期和历史时期的河网水系演变进行定性描述。魏嵩山(1979)分析太湖流域在整个历史时期内大致沿着三江(吴淞江、东江、娄江)→湖泊→水网化的方向发展。王昕(2008)等人认为吴淞江水系演变的自然规律是其淤塞的主要原因,未来太湖流域的水环境整治、水利工程等建设必须遵循海平面作用下的地貌演变规律。徐柔远(1994)认为长江的输沙作用及杭州—临安东向西向构造带造成的地形条件是形成杭州湾三角港的决定因素。钱塘江水系形成以后,干、支流在平原河口段的改道相当频繁,总体趋势是由向北转为向东,河流长度则随海水进退而消长。

1.2.2 河网水系演变定量方法研究

对流域与水系进行定量描述是十分困难的。不同河流的分级是流域地貌和水系结构定量评价的基础。地貌学界普遍采用序列命名的原则进行不同河流等级的划分。代表性河流分级方法的有:Grvaelius 分级、Horton 分级、Strahler 分级、Shreve 分级、Scheidagger 分级等。每一种河流分级方法都有其优点与缺点。最早的河流分级思想是 Grvaelius(1914)提出的,他认为:任意流域内主流为一级河道,汇入主流的大支流为二级河道,汇入大支流的小支流为三级河道,更小的支流为四级河道。

在河流分级的基础上,Horton(1945)提出了著名的河数定律以及河长定律(Horton 定律)。河数定律即每级河流数量构成一几何级数的数列;河长定律即各级河流的平均长度构成一几何级数的数列。Horton 水系组成定律为流域地貌演化过程、河流水系结构的定量化分析拓展了新的研究方向。

表 1-1 列出了已有的表征水系格局变化的参数。水系分支比是