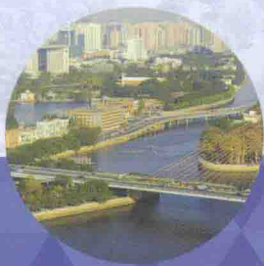




城市水利丛书

滨江城市排涝模型

高成 徐向阳 刘俊 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



城市水利丛书

滨江城市排涝模型

高成 徐向阳 刘俊 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书着眼于建立适合滨江城市的排涝计算模型,提出了衔接排水标准和排涝标准的方法;建立了产汇流计算模型和管网排水模型,提出了管道通畅度参数;建立了河网计算模型和排涝计算模型,提出了新的排涝计算方法,即蓄水曲线法、节点控制水位法、泵站边界试算法;分析了影响排涝模数的主要因子——排涝面积、可调蓄水面率和透水率,建立了排涝模数与这些因子之间的总体定量关系;利用该关系计算得到投资费用最低的最优水面率和透水率,为滨江城市规划和建设提供了依据;总结了保持最优水面率和透水率的相应措施。

本书可供从事城市水务、城市水文、城市防洪与排涝等相关专业的研究人员,水利、市政、规划等有关部门的管理人员,以及大专院校相关专业师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

滨江城市排涝模型 / 高成, 徐向阳, 刘俊著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 11
(城市水利丛书)
ISBN 978-7-5170-1477-5

I. ①滨… II. ①高… ②徐… ③刘… III. ①城市排水—计算模型 IV. ①TU992

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第288251号

书 名	城市水利丛书 滨江城市排涝模型
作 者	高成 徐向阳 刘俊 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.75印张 207千字
版 次	2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	30.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

Preface



水是城市的命脉，是城市文明的源泉。城市因水而兴、因水而富、因水而美、因水而灵。世界发达城市多位于大江大河沿岸，具有良好的地形、富饶的土地、丰富的水源、发达的水系，是人类最好的栖息地。同时，滨江城市也是外洪内涝灾害威胁比较严重的地区，频繁的洪涝灾害给人民的生命财产安全造成了重大损失，也对整个社会发展造成了不利影响，甚至影响社会的稳定。

在我国经济社会发展和城市建设的过程中，滨江城市大力建设防洪排涝工程，防洪能力明显提高，基本可以满足抵御“外洪”的要求，但与此同时，城市建设也为排涝带来了新的问题，如填埋河道降低了城市可调蓄水面率、地面硬化增大了涝水排除压力等。为解决城市内涝，2011年中央一号文件明确提出“加强城市防洪排涝工程建设，提高城市排涝标准”的新要求；同年7月8日和9日召开的中央水利工作会议，再次强调了这一要求。2013年4月国务院办公厅发布《关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知》，要求用10年时间建成较为完善的城市排水防涝工程体系。

然而长期以来，我国城市内涝的分析计算内容薄弱，对城市化进程对洪涝特性的影响研究不够，尚未形成比较完善的理论体系，不能有效解决城市化进程带来的内涝加剧问题。在很多城市防洪排涝规划中，由于没有认真分析城市内涝形成的主要影响因素，对内涝形成规律认识不足，造成治理不到位和城市涝灾风险的增长。此外，我国现行的一些计算方法和防治措施也不能适应现代化城市发展的需求。解决滨江城市内涝问题的前提是建立良好的管渠衔接标准和适合滨江城市的排涝计算模型，形成相对完善的滨江城市排涝计算理论体系。

本书是作者对近几年相关研究成果的总结。全书以滨江城市排涝模型为主要研究对象，对排涝计算的各环节，特别是终端环节——排涝流量或排涝模数的计算方法进行了研究，筛选出排涝计算的主要影响因子，探讨了排涝模数与各主要影响因子之间的相关关系。

全书共8章。第1章为绪论，分析了滨江城市涝灾的特点和成因，指出建

立合适的城市排涝模型是解决滨江城市内涝问题的前提。第2章为设计暴雨计算分析,讨论了次暴雨过程的划分方法,探讨了设计暴雨的空间分布问题。第3章为排涝标准与排水标准衔接,研究了不同选样方法所得设计值之间的关系,从而将水利与市政两个部门标准进行衔接。第4章为产汇流模型,总结了城市地区产汇流计算的特点,建立了城市地区的产汇流模型。第5章为管网汇流模型,提出了管道通畅度这一参数,以考虑由于淤积和堵塞等因素造成的管道阻水或堵水现象。第6章为河网汇流模型,以常用的 Preissmann 隐式差分格式解圣维南方程组,建立计算模型。第7章为泵站排涝流量模型,提出了适合滨江城市排涝模数的计算方法,建立排涝模型,并对各种计算方法进行了比较。第8章为排涝计算影响因子分析,得到了大型滨江城市排涝区排涝模数与排涝面积、水面率和透水率之间的相关关系;以费用为依据,确定了滨江城市地区最优的水面率和透水率组合;提出了水面率和透水率的补偿措施,即以建设城市市政沟补偿水面率、增加城市雨水滞蓄和利用补偿透水率等。

本书由高成、徐向阳和刘俊编撰,张晓波、王磊、尹志杰、崔韩等参加了部分章节编写。本书的出版得到中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-201210)和江苏省博士后科研资助计划(1201017B)的资助,在此表示衷心感谢。

城市排涝是目前研究的热点,也存在不少难点。因此,本书对有些问题的分析和研究可能还不够完善,恳请广大专家批评指正,以便在今后的研究中改进。希望本书的出版能引起更多专家学者的兴趣和关注,相信其在大家的共同努力下,城市排涝理论将更加完善,更能科学准确地指导实践应用,为建立完善的城市排涝体系发挥重要作用。

作者

2013年4月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 滨江城市涝灾	1
1.1.1 滨江城市区域界定	1
1.1.2 滨江城市涝灾主要特点	1
1.1.3 滨江城市涝灾成因	2
1.2 国内外研究进展	5
1.2.1 排涝标准和排水标准衔接	5
1.2.2 产汇流计算	6
1.2.3 河网非恒定流计算	9
1.2.4 排涝计算	10
1.3 研究内容与方法	11
1.3.1 研究目的	11
1.3.2 研究内容	12
1.3.3 研究方法	13
第 2 章 设计暴雨分析	14
2.1 设计暴雨历时	14
2.1.1 地面汇流时间	14
2.1.2 管道汇流时间	15
2.1.3 河道汇流时间	16
2.2 次暴雨过程划分	16
2.3 设计雨量计算	17
2.4 设计暴雨时间分布	18
2.4.1 采用芝加哥公式分配	18
2.4.2 采用典型暴雨过程分配	19
2.5 设计暴雨空间分布	19
2.6 本章小结	20
第 3 章 排涝标准与排水标准衔接	21
3.1 设计标准概论	21
3.2 选样方法及其设计值间的关系	21

3.2.1	通用选样方法	21
3.2.2	各种选样方法的特点	22
3.2.3	各种选样方法设计值之间的关系	23
3.3	超定量法与年最大值法重现期关系	24
3.4	调蓄能力差异下的重现期关系	26
3.5	本章小结	28
第4章	产汇流模型	29
4.1	产流理论分析	29
4.1.1	产流影响因素	29
4.1.2	下垫面特性	29
4.1.3	产流计算特点	30
4.1.4	产流模型设计	31
4.2	地面汇流理论分析	34
4.2.1	地面汇流影响因素	34
4.2.2	地面汇流模型设计	34
4.3	本章小结	37
第5章	管网汇流模型	38
5.1	管网排水特性分析	38
5.1.1	雨水管道水流状态	38
5.1.2	雨水管道水力计算公式	38
5.1.3	雨水管网水力初始和边界条件	39
5.2	管网排水方程推导	40
5.2.1	连续性方程	40
5.2.2	能量方程	40
5.3	管网汇流模型设计	42
5.3.1	雨水管道非线性运动波偏微分方程	42
5.3.2	雨水管道非线性运动波方程的有限差分格式	43
5.3.3	牛顿迭代逼近法求解有限差分方程	43
5.4	应用实例	44
5.4.1	徐汇区自然概况	44
5.4.2	徐汇区防汛工程概况	46
5.4.3	模型参数分析率定	48
5.4.4	模拟计算及结果分析	49
5.5	本章小结	51
第6章	河网汇流模型	52
6.1	圣维南方程组的数值求解	52
6.1.1	Preissmann 隐式差分格式	52

6.1.2	Preissmann 格式稳定条件和精度	54
6.1.3	边界条件	54
6.2	河网非恒定流水动力学数学模型	55
6.2.1	外河道计算	56
6.2.2	内河道计算	57
6.2.3	环状河网的求解步骤	58
6.2.4	节点水位方程	59
6.3	河网概化	62
6.3.1	基本河道的概化	62
6.3.2	湖泊的概化	63
6.3.3	流域面上调蓄作用的概化	64
6.4	边界条件	66
6.4.1	外边界条件	66
6.4.2	内边界条件	68
6.5	初始条件及露滩处理	71
6.5.1	初始条件确定	71
6.5.2	露滩处理方法	71
6.6	圩区处理	72
6.7	应用实例	72
6.7.1	产汇流模拟	72
6.7.2	河网概化	73
6.7.3	设计潮型	73
6.7.4	边界条件及防洪控制调度方式	75
6.7.5	计算方案	76
6.7.6	计算参数	77
6.7.7	排涝设计水位计算结果	77
6.8	本章小结	84
第 7 章	泵站排涝流量模型	85
7.1	当前简化方法	85
7.1.1	排涝模数公式推导	85
7.1.2	图解法与表解法计算	87
7.1.3	方法比较	89
7.1.4	简化方法的改进	90
7.2	新计算方法研究	90
7.2.1	蓄水曲线法	91
7.2.2	节点控制水位法	91
7.2.3	泵站边界试算法	93

7.3 应用实例	95
7.3.1 载体概况	95
7.3.2 水文计算	96
7.3.3 蓄水曲线法计算	99
7.3.4 节点控制水位法计算	101
7.3.5 泵站边界试算法计算	105
7.4 推荐方法	106
7.5 本章小结	106
第8章 排涝计算影响因子分析	108
8.1 影响因子筛选	108
8.2 排涝模数与各主要影响因子的关系分析	108
8.2.1 排涝面积变化	108
8.2.2 可调蓄水面率变化	111
8.2.3 透水率变化	114
8.3 排涝模数与各主要影响因子的定量关系估算	116
8.3.1 模型建立	116
8.3.2 参数估计	118
8.4 最优水面率与透水率研究	120
8.4.1 最优水面率与透水率计算	120
8.4.2 保持最优水面率与透水率的措施	121
8.5 本章小结	125
参考文献	126

第1章 绪 论

1.1 滨江城市涝灾

1.1.1 滨江城市区域界定

在我国，滨江地区主要指七大江河流域中下游的广阔平原地区，主要包括东北地区的三江平原、松嫩平原、辽河平原，黄河流域的河套平原、关中平原，海河流域中下游平原，淮河流域的淮北平原、滨湖洼地、里下河水网圩区，长江流域的江汉平原、鄱阳湖和洞庭湖滨湖地区、下游沿江平原洼地、长江三角洲，太湖流域的湖东湖荡圩区，珠江流域的珠江三角洲等，其多为洪水滩地或冲积平原，兼有少量丘陵，地势平坦，降雨充沛，水资源较为丰富。本书重点研究淮河流域以南客水资源丰富、经济较为发达、人类活动影响显著的滨江城市区域，并以长江下游城市地区为主。

1.1.2 滨江城市涝灾主要特点

随着我国滨江地区城市化进程的加快，排涝任务愈加艰巨，涝灾频繁发生，主要呈现出以下特点。

1. 易发性

由于滨江城市地处平原地区，常受江河高水位、下游天文潮以及风暴潮影响，河网水流顺逆不定，排水通道不畅，汛期暴雨极易造成洪涝灾害。洪涝涉及江河湖库洪水、平原河网和圩区涝水、河口和海洋风暴潮等多种洪涝灾害防范问题。由于海陆位置、经纬度、地形地貌、经济发展、土地利用等的差异，地区洪涝成因及灾情特点可能是不同的。一些地区可能出现多种洪涝因素的共同影响，如上游洪水与当地暴雨同步发生，台风暴雨与天文高潮遭遇等，会造成特大内涝灾害。

2. 严重性

由于密集的人口，较高的经济强度，滨江地区洪涝造成的损失往往处于各种自然灾害损失的前列。随着城市化进程的加剧，滨江城市地区发展迅速，基本连成一片，这造成同等级别降雨带来的内涝损失更加严重。特别是全流域特大洪水造成的损失是巨大的，这种损失不但有经济损失，还有更严重的社会影响。

3. 时变性

近年来，由于滨江城市地区经济社会的高速发展，土地利用性质、地形特征、水利工程、水系、水资源需求、水生态环境均发生不同程度的变化，使得当地水文情势发生变化，如地表径流系数增加、河道蓄水容量减少、地面下沉、上游下泄流量增加等，常常造

成洪涝特性随区域发展而产生不利的变化,且洪涝损失量值随地区经济发展不断增加。随着我国城乡结构的变化,涝灾在城乡间的分布也发生了变化。20世纪60—70年代,涝灾主要影响农业圩垸,造成的损失主要为农作物损失。之后,我国城市化发展速度加快,而城市防洪安全建设相对滞后,因此,城市洪灾损失越来越突出。

1.1.3 滨江城市涝灾成因

1.1.3.1 地理因素

我国的涝灾主要分布于各大流域中下游平原的滨江、滨湖及沿海平原地区。

(1) 松嫩平原。松嫩平原地势平缓,地形复杂,多为闭流的浅平洼地,无尾河道众多,形成诸多泡沼。由于河网稀疏,排水困难,雨后河水漫流扩散,造成积水受淹。松花江干流中部涝区及第二松花江涝区属于山前河谷冲积平原,地形高低起伏,变化复杂,形成众多洼地和小闭流区,雨后积水排不出,加上两侧台地的坡面径流入侵,形成长时间积水。

(2) 海河中下游平原。海河流域为黄河的冲积平原,地势平坦,地面坡度由1/1000降至不足1/10000,加上受海潮顶托,排水缓慢。黑龙港、运东及清南清北涝区,属洪水河道区间洼地,本身无排水出路,四周受排洪河道的堤防包围,历来涝情严重。海河中下游地区的潮土属重黏壤土与黏土,质地紧密,渗透性低,排水困难。

(3) 黄泛区。黄河改道形成坡、洼、湖沼与沙岗、丘垄相间的地形,雨后洼地积水,排水困难。徒骇、马颊河地区与卫河平原为历史上的黄泛区,西起开封东至海滨也皆为黄泛区,这些均为重点灾害区。淮北平原广泛覆盖着不同厚度的属第四纪上更新统河湖相沉积物,主要是砂礓黑土,质地密,孔隙率小,透水性能差,干时坚硬,湿时泥泞,排水不良,为淮北最易发生涝渍的一种土壤。

(4) 河口及滨湖平原。三角洲、沿江河及滨湖平原洼地和圩区,地势低洼,邻近外河(湖)高水位,常常受到侧渗补给,引起地下水位升高,因而地面水受河网水位顶托,排泄不畅,排降地下水困难。大部分地区的河道坡度较小,沿江和沿海地区河底高程往往等于和低于海平面,排水不畅,泥沙淤积较快,加上受潮汐顶托,失去自排能力,主要靠水闸控制在低潮排水,容易形成涝渍灾害。另外,这些地区土壤的渗水性能差是涝渍频发的又一诱因。珠江三角洲多为潮泥田、泥肉田、低土朗田,沙壤土上的积淀泥透水性能较差;太湖下游地区、杭嘉湖、洮涌湖边圩区,土壤主要属青紫泥、黄心青紫泥,颗粒细、土质黏重、通透性差;鄱阳湖滨湖地区多为红壤性水稻土,土层深厚,易板结,通透性差,排水困难,常形成土层上层滞水,加之雨期长、排水不畅,易发生涝渍。

1.1.3.2 气象因素

我国各大流域的中下游平原属东亚季风气候,是我国东部发生季风暴雨的地区。随着季节的转换,盛行风向发生显著变化,气候的干湿和寒暑状况交替,雨涝时间分布特点是南部早、北部晚。夏季风与冬季风交替的时间、强弱、停滞阶段和交绥地带各年不同,季风活动异常时有发生,造成长江流域初夏梅雨季节和盛夏集中降雨季节的长短及降雨量多寡差异甚大。

降雨过量是发生洪涝灾害的主要原因,灾害的严重程度与降雨强度(雨强)、持续时

间、一次降雨总量和分布范围有关。根据我国灾害性暴雨发生日期和雨量统计资料,暴雨发生的季节北方基本上在5月上旬至9月上旬,南方在4月中下旬至10月上旬。我国南方地区的年降雨量大于北方地区,汛期平均月雨量和最大月雨量很接近;北方年雨量少,最大月雨量相对较大。因此,北方形成的灾害性降雨频次并不低于南方。由于降雨量年际、年内分布不均匀,有些时期雨量大、强度高,造成洪涝灾害;有些时期阴雨连绵、低温高湿,造成土壤过湿和地下水位过高,引发渍害。

我国大部分地区降水主要集中在夏季数月,如果将每旬降水量占4—9月总降水量大于7%的等值线所包围的区域作为雨带,把降水百分率最大值的连线称为雨带轴线,据此研究雨带的季节变动,可得出雨带轴线的季节移动过程。

4月上旬至5月上旬雨带轴线在长江以南、南岭、武夷山一带摆动。4月中旬,雨带大致位于两湖盆地和南岭山脉之间。5月上旬,雨强加大,雨带笼罩了长江以南和南岭以北的广大地区,这就是“江南春雨”。从5月上旬起至6月上旬,雨带位置逐渐南退,雨带局限于南岭以南、华南沿海。6月中旬起,雨带开始向北推进,雨强进一步加大,雨带轴线大致位于武夷山西北坡、赣南、湘南一带。6月下旬,雨带跃到长江中下游,范围扩大,雨带轴线近乎东西向,这就是江淮流域的“梅雨”,其开始与结束的早晚、降水多少,直接影响当年洪水的大小,如1931年、1954年、1991年的长江流域中下游特大洪水,就是梅雨来临早、结束迟、雨期长、降水多造成的。7月上旬,雨带轴线仍在淮河流域,同时在太行山东侧和内蒙古东部地区出现了一条近乎于南北向的雨带轴线。7月中旬,雨带迅速北移,轴线越过黄河。8月上旬,雨带到达最北位置,此时正是华北雨季,华北平原雨量最为集中,且雨带轴线分为两支:一支呈东西向;一支近乎南北向。8月中旬以后,雨带开始南退,北方雨季也随之结束。

此外,每年6—10月,由我国东南低纬度海洋形成的热带气旋北移,携带大量水汽途经太湖地区,造成台风型暴雨。台风和热带风暴登陆具有明显的地域性特点。东南沿海(桂、粤、琼、闽、台、浙)一带登陆台风数量占全国登陆总数的95%,为登陆的集中区域。台风在广东、广西、福建、浙江、上海、江苏等南方沿海省市登陆后一般都要减弱,速度变慢,但大多数还能进入内陆并向北方推进,影响到江西、湖南、湖北、安徽、山东、河南、河北、天津等省市。例如,1992年16号强热带风暴在福建登陆,很快变成低压北进,途经浙江、上海、江苏、山东、河北、天津等省市,造成了严重的风暴潮和洪水灾害。

1.1.3.3 社会因素

洪涝灾害的形成,自然条件是一个很重要的因素,但严重灾害的形成则与人类社会经济活动密切相关。由于人口的急剧增长,水土资源的过度不合理开发,人类活动与洪水争夺空间的矛盾进一步突出,引起了许多新的问题,加剧了洪水灾害。

1. 水土流失加剧,江河湖库淤积严重

森林植被具备截留降水、减少地表径流、涵养水源、保持水土、调节气候的功能,由于盲目砍伐,森林植被面积剧减,一方面导致流域坡面的滞蓄能力降低,使洪水峰高量大,增加了水灾的频率;另一方面导致水土流失加剧,使水库、河道淤积,蓄水库容减少,降低了调洪和排洪的能力。据统计,1957年我国长江流域森林覆盖率为22%,水土

流失面积为 36.38 万 km^2 ，占流域面积的 20.2%，到 1986 年森林覆盖率减少了一半多，水土流失面积增加一倍。水土流失造成大量下泄泥沙淤塞江河湖泊、河床加高、湖泊容积缩小。根据洞庭湖的龟山、城陵矶两个水文站测得的数据，与 20 世纪 60 年代的情况相比，在相同的洪峰流量下，20 世纪 80 年代的水位要高出 2~3m，最高达 6m。

2. 围垦江湖滩地，湖泊天然蓄洪作用衰减

过度的围垦使湖泊面积和数量急剧减少，降低了湖泊的天然调蓄作用，大大增加了洪涝灾害。据粗略统计，近 40 年来，湖南、湖北、江西、安徽、江苏 5 省围垦湖泊的面积在 1.2 万 km^2 以上，相当于如今洞庭湖面积的 4 倍多，因围垦而消亡的大小湖泊达 1100 个左右，其中对调蓄长江洪水起关键作用的通江湖泊的围垦尤为严重。如洞庭湖作为长江中下游最重要的过水性调蓄湖泊，蓄水容积由 1949 年的 293 亿 m^3 下降到 1995 年的 167 亿 m^3 。据史料记载，285—1868 年洞庭湖水灾平均 41 年一次，而现在水灾已缩减到不足 5 年就有一次。

3. 人为设障阻碍河道行洪

河道是洪水宣泄的通道，河道内是不允许有阻碍行洪的障碍物存在的。但是，随着人口增长和城乡经济发展，沿河城市、集镇、工矿企业不断增加和扩大，滥占行洪滩地，在行洪河道中修建码头、桥梁等各种阻水建筑物，一些工矿企业任意在河道内排灰排渣，严重阻碍河道正常排洪。20 世纪 70 年代以来武汉市江滩被占用了 184 万 m^2 ，大量阻水建筑物抬高了长江水位，1980 年洪水最大流量比 1969 年小 2900 m^3/s ，而最高水位却高出 0.57m，严重威胁城市安全。

4. 超采地下水，造成地面沉降

在人口比较密集的地区和城市化地区，由于水源短缺或水质恶化，常常出现过度开采深层地下水的状况，造成地面沉降，引发洪涝灾害的加剧。例如，根据对江苏省苏南几个城市的调查，城市沉降中心的累计最大沉降量：苏州市 1.45m，无锡市 1.14m，常州市 1.10m；苏、锡、常 3 市累计地面沉降大于 0.6m 的面积分别达到 80.4 km^2 、60.0 km^2 、43.0 km^2 。在 1991 年洪涝灾害中，沉降洼地灾情特别严重的苏州城西地区、无锡东北广益地区、常州城南地区积水深度和淹没时间都超过相邻地区。

5. 新建或规划排水系统不合理

一些地区在规划或调整水系中未经科学论证，使得新的排水系统布局不合理，破坏了原有排水系统，不能满足地区的排水需求。如淮河下游苏北灌溉总渠北部地区，总面积 1967 km^2 ，耕地 11.3 万 hm^2 ，人口 92 万，该地区原有排水河道水流自北向南排入白马湖、马家荡、射阳湖。1952 年开挖总渠，截断排水河道，后开挖自西向东排水渠入海，路线长，标准低，多年来该区涝灾严重，一般年份受灾 2 万 hm^2 ，大水年受灾 6 万~7 万 hm^2 以上。

6. 城市化的影响加剧

近 20 年来，随着经济的发展，城区面积的扩展非常明显，造成区域不透水性强度显著加大。根据城市径流试验小区实测降雨径流资料分析，如果遭遇高强度长历时的暴雨过程，中心城区次雨量地面径流系数达 0.8，短历时地表径流系数可达 0.9 左右。同时，城市发展侵占河道的现象非常严重，使原有水面率大大减少，造成河道调蓄能力下降，洪峰

流量增加。例如,北京1959年8月6日和1983年8月4日发生的两场降雨的雨量及强度相似,总雨量分别为103.3mm和97.0mm,最大1h雨量分别为39.4mm和38.4mm,但二者的洪峰流量分别为 $202\text{m}^3/\text{s}$ 和 $398\text{m}^3/\text{s}$,后者较前者增大了近1倍。

在城市地表径流系数增加、水面率减少、河湖调蓄能力降低的同时,排水能力不断提高,造成排涝模数显著增加,这可能抬高局部地区接收水体的水位,造成新的洪涝问题。

很多城市还遭受潮汐的影响。由于外河水位在汛期和高潮期可能高于地面高程,城市排水系统常需采用泵站向外河排水,管道中水流可能呈现压力流状态,其运行状态和过流速度不同于常规重力流情况。在暴雨期,局部低洼区若低于管道水力线,在水流压力下管道内的雨污径流会返流地面,形成地面积水。

7. 排涝计算模型适应性较差,管渠标准不衔接

滨江城市地区排涝系统建设没有跟上经济社会发展的步伐,关于城市雨洪模型的研究虽然相对较多,也取得了一定的进展,而在城市泵站排涝流量这一核心上相对较为薄弱。现阶段,仍然没有适合滨江城市地区排涝流量计算的方法,基本移用农村地区的计算方法,但滨江城市地区的排涝特性与农村地区有着本质的区别,不能简单移用。因此,不当方法的移用,容易使得排涝流量计算误差较大,这是造成城市涝灾的重大原因。

此外,城市管道排水和河道排涝分属不同部门管理,按照相应的行业标准确定标准,但两者之间不衔接,造成管道排水和河道排涝不匹配,容易出现管道排水能力不足而河道排涝流量较大,或管道排水能力较大而河道排涝流量不足,涝水难以抽排进入外河,造成河道涝水倒灌等城市内涝。

综上所述,滨江城市地区的内涝问题已经严重影响了其经济社会的可持续发展和谐社会的建设,是我国城市水务一体化进程中必须妥善解决的问题。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 排涝标准和排水标准衔接

城市管渠排水标准和河道排涝标准衔接问题涉及城市排水与水利除涝的行政管理体系,目前相关研究相对较少,主要有:

邓培德(1985,1992和1996)指出,年最大值法可用耿贝尔分布表示,非年最大值法可用指数分布表示。概率计算表明,只有当 $T \geq 10$ 年时,两者强度才较接近。陈斌(1996)由二项式机理推出非年最大值法选样的次频率 P_E ,在每年中均不出现的几率为 $(1-P_E)^k$,那么在一年中出现的几率为 $1-(1-P_E)^k$,以此作为相应重现期下的年频率,进而建立了重现期的衔接关系。周桂明(1998)、杨晓华(1998)、任伯帜(2002)和张云(2003)等分别以计算机搜索法、加速遗传算法、Marquardt-Hartley法和最速下降法对暴雨强度公式进行优化。岑国平(1999)提出先转换经验重现期,后制定暴雨公式。刘水芹(2000)利用不同频率下1h的降雨强度和24h历时的累积降雨建立相关关系,再由频率与最大24h降雨量的相关关系,建立城市排水与区域除涝的对应关系。胡斌(2002)用数理统计方法证明:随着累计频率 P_E 的增大,这两个年频率之间的差别就越大,见式(1.1)。

$$\lim_{P_E \rightarrow 0} \frac{aP_E}{1 - (1 - P_E)^a} = 1, \lim_{P_E \rightarrow 1} \frac{aP_E}{1 - (1 - P_E)^a} = a \quad (1.1)$$

即重现期越大 (P_E 越小), 两个年频率越接近; 重现期越小 (P_E 越大), 两个年频率则接近于倍数 a 的关系。对于要求不高的工程, 重现期可由 $1 \sim a$ 倍来推算。

谢淑琴 (2003) 通过将次频率换算成年频率, 利用广州市降雨量资料得到年多次法和年最大值法计算的设计暴雨量之间的关系相近。关于设计流量计算方法, 她指出汇流时间相差很大, 导致计算的设计排涝流量相差极大。谢华 (2007) 指出年最大值法选择适用于重现期较高的河道排涝, 非年最大值法 (年多次法、超定量法) 能够反映 1 年多遇的情况, 更适合小重现期的排水工程。两种排水重现期和设计暴雨的转换关系只是一种概率关系而非函数关系, 只有在资料年份相当长时, 这种概率关系才比较可靠。丁光浩 (2007) 提出当年最大值法分析计算的河道设计排水流量 (或排涝模数) 与年多次法得到的雨水管渠排涝设计流量 (或排涝模数) 相等时, 可得采用设计暴雨年最大值法确定的排水标准与采用设计暴雨年多次选择排水标准的关系。

1.2.2 产汇流计算

最早的产流理论是霍顿 1933 年提出的下渗理论, 当雨强小于下渗能力时, 所有降雨都被土壤吸收, 而当它大于下渗能力时, 吸收率等于下渗能力, 其余部分就是产流量。20 世纪 60 年代初, 华东水利学院 (现河海大学, 下同) 提出了蓄满产流模型。70 年代后期, 华东水利学院对蓄满产流模型在结构上做了重要改进, 形成了目前的三水源模型。以后又提出了较完善的超渗产流模型。此外, 还推荐了新的产流计算方法, 主要是蓄满产流模型和超渗产流模型相结合的方法, 既考虑蓄满面积上的蓄满产流, 又考虑未蓄满面积上的超渗产流。

20 世纪 70 年代末到 80 年代初, 我国先后引进了国外一些确定性概念模型和系统工程理论分析方法模型。到目前为止, 已提出的包括产流计算在内的流域水文模型有 10 多个, 即新安江模型、水箱模型、萨克拉门托模型、HEC 模型、斯坦福流域水文模型等。针对城市郊区区域下垫面情况差异较大, 河海大学程文辉等 (1998) 研究了不同下垫面条件的产流计算方法, 认为水田主要种植水稻, 在生长期内, 产流模拟按水田计算, 在生长期外作为旱地来计算, 旱地在作物需水期需灌溉, 必须与非耕地区分开来, 总产流按各区的下垫面组成加权计算。

针对城市化进程对城市降雨径流产生的影响, 国内外有广泛的研究。这些研究主要集中在城市化对城市降雨特性 (均值、雨强等) 的影响及其产生原因、对径流特性的影响及其产生原因等方面。针对城区产汇流机制的研究, 美、英、法、德等发达国家从 20 世纪 60 年代起开始研制城市雨洪模型, 70 年代初提出了几种通用的雨洪模型, 并在其后的实际应用与深入研究中得到完善。这些模型包括雨洪管理模型 (SWMM), 美国辛辛那提大学 CURM 模型, 伊里诺排水模型 (ILLUDAS), 水文计算模型 (HSP), 蓄水、处理与溢流模型 (STORM), 沃林福特模型 (WALLINFORD) 等, 其基本组成见图 1.1。这些模型可以根据使用者的要求, 更为确切地模拟水文和水质变化的过程。下面介绍其中几个常用模型。

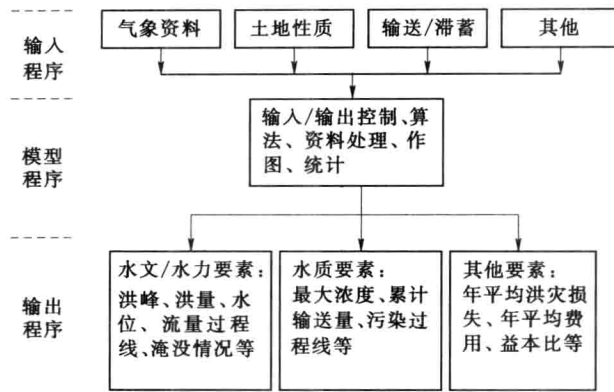


图 1.1 城市雨洪模型的基本组成

1. 雨洪管理模型 (SWMM)

此模型于 1971 年由美国环保局 (EPA) 提出, 是一个内容相当广泛的城市暴雨径流量和水质预报模拟模型。在后来的一个 SWMM 修改版中, 包括了水力学设计模块。SWMM 可以用于模拟城市雨水管网和合流制管网系统的水量与水质。其由五个子程序组成, 每一部分都有其专门的功能, 其计算结果都存入数据存储空间, 以便其他程序块需要时可以调入。模型的主程序称为执行程序块, 在开始运行和计算结束时要运行这一部分, 还可以完成全部的与其他程序块之间的连接工作。径流程序块用曼宁公式对均匀降水演算地表漫流过程, 还能给出与时间有关的污染过程线。传输程序块可以确定旱流水质和水量, 确定计算系统的入渗损失和水质, 计算两个对比方案的蓄水池占地、投资、运行和管理费用。蓄水程序块允许用户定义或选择一定截流倍数的污水处理设施, 还可以模拟污水通过被选择处理流程的水文过程线和污染过程线的变化。受纳水体程序块模拟排水系统排出的雨、污水对受纳水体水力学和水质的影响。

2. 芝加哥流量过程线法 (CHM)

芝加哥流量过程线法的计算过程如下:

当采用合成暴雨作为设计暴雨时, 对于任何暴雨频率, 根据暴雨强度公式都能生成合成暴雨。在此过程中使用了暴雨雨峰系数, 其定义为任何假设暴雨历时从降雨开始到雨峰的时间间隔与总降雨历时的比值, 根据芝加哥的暴雨分析, 雨峰系数 r 为 $3/8$ 。从降雨中减去土壤的渗水能力后得到渗水地表面积上的净雨, 渗水区域的渗水能力由霍顿公式中初始的和最终的渗水能力和衰减系数关系计算。地表漫流用正弦曲线关系近似, 地表漫流流量过程线由在坡地上演算地表漫流来计算。雨水流量过程线由从透水和不透水面积的地表漫流流量过程先通过道路边沟汇流来计算。所给定管段的设计流量过程线可由本段雨水口流量过程线和与该管段连接的所有上游管段的流量过程线相加来计算, 用设计流量过程线的峰值乘以该管段汇水面积的雨强衰减系数, 以获得设计流量, 然后根据设计流量和所选定的水力坡度进行水力计算, 以便确定排水管道的管径尺寸。下游端流量过程线由演算该管段上游端的设计流量过程线来计算。

3. 沃林福特模型 (WALLINGFORD)

该模型由英国水力学研究站、水文学会和气象局于 1974—1981 年推行, 其将每个子

流域分为确切表面、屋顶及透水区三部分。在计算各种表面产流时，必须先计算流域总的出流百分率，以确定各地表的出流率。它由四种方法组成：

(1) 沃林福特合理化方法：适用于草拟设计或用于 150hm^2 以下面积情况。它有手算和计算机计算两种形式，后一种形式包含有模拟雨水溢流设备。

(2) 沃林福特过程线方法：是以计算机为基础，分开模拟地面和地面以下阶段径流状态的方法。它可以用于设计和模拟两种类型情况，并且可以考虑到雨水溢流以及在管线上和不在管线上的滞洪水池及泵站作用。

(3) 沃林福特优化方法：以计算机为基础，采用离散型动态规划技术获得与最小工程造价有关的管径、埋深及坡度。

(4) 沃林福特模拟程序：以计算机为基础，可以用来检验超载条件下现有系统和计划设计系统的运行情况，亦可考虑到暴雨溢流口，以及排水系统在管线上与不在管线上滞洪水池和泵站的作用。

4. 城市雨水管道计算模型 (SSCM)

城市雨水管道计算模型是我国第一个完整的雨水管道径流计算和设计模型。该模型根据城市降雨径流的基本规律，模拟地面及雨水管渠中的水流运动过程，得到各点的流量过程线及洪峰流量、径流总量等，从而可以进行雨水管道系统的设计校核，也可作为城市雨洪模拟模型，用于城市雨洪的控制和雨水污染防治等。该模型分为三个部分，即暴雨计算、雨水径流模拟、雨水管道系统设计和校核。

暴雨计算采用变雨强过程。地面产流计算中，先划分各个节点所对应的汇水子区域面积，每个子区域分为透水区和不透水区两部分，不透水区产流采用变径流系数法，也可采用美国土壤保持局的方法；透水区产流采用霍顿下渗公式来计算。地面汇流计算中，采用面积—时间曲线法（等流时线法），考虑到坡面汇流的非线性特点，采用一种随雨强而变的变动面积—时间曲线法。管网汇流计算时，若回水影响不严重，精度要求不高，可采用简单的过程线漂移法（流量过程线滞后叠加法）；若精度要求较高，可采用明渠非恒定流计算方法（扩散波法）。模型中不考虑压力流，也不考虑环状管网。

5. 城市雨水径流模型 (CSYJM)

城市雨水径流模型根据城市雨水径流的特点，把径流过程分为地表径流和管内汇流两个阶段。降雨经过地面径流从雨水口进入雨水管网，模型可以计算出雨水口流量过程线，并作为管网的输入。在管网各雨水口输入已知的条件下，采用非线性运动波演算管网的汇流过程。该模型可以作为设计、模拟和排水管网工况分析的有用工具。该模型没有均匀降雨的假设，可以根据计算精度确定计算时段长度，采用实测降雨过程线和上面介绍的合成设计降雨过程线作为输入。该模型允许用户选择扣损方法，包括加权平均径流系数、变径流系数、初损后损方法和霍顿入渗方程法，并介绍了实测入渗率的方法。根据降雨过程线和所选定的扣损方法，模型可以计算出净雨过程线。当入渗率大于降雨强度时，模型假设净雨强度为零。

目前，世界上已有适宜不同用途的城市暴雨模型上百种，这些模型主要在暴雨设施规划、设计及改扩建领域广泛应用，因为运行管理需要考虑的因素比较复杂，并且难于收集实时资料和大量详细的基础资料，所以真正适用于运行管理的模型很少。当前的城市暴雨