

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0921

一种基于空间单元的多级共治雨洪管理方法 ——以宁波市海曙片为例

余振勋¹, 汪步云¹, 冯国光², 司艺方², 褚华强³

(1.宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211; 2.宁波市规划设计研究院, 浙江 宁波 315042;
3.同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对传统洪涝治理模式中市政排水和水利排涝分治的局限性, 基于平原河网城市的地形特点和当前防洪排涝排水模式, 提出了一种基于空间单元的多级雨洪管理方法. 该方法以防洪、排涝、排水的重要通道为边界, 划分不同等级的空间单元, 对不同等级单元采取不同的工程治理手段, 构建防洪-排涝-排水多级共治体系; 并将该空间单元管理框架应用于宁波市海曙片进行多级共治工程布局, 通过 InfoWorks ICM 模型验证工程效果. 结果表明, 基于空间单元的多级共治能理顺雨洪系统, 耦合防洪、排涝、排水系统工程, 为我国城市洪涝治理提供参考.

关键词: 多级共治; 空间单元; 雨洪管理; 内涝积水

中图分类号: TV212.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 05-0070-09

随着城市化的快速发展, 城市区域不透水面积大幅增加, 极端天气的频繁出现, 导致降雨-径流关系发生显著变化^[1-2]. 总径流量增加, 到达径流峰值的时间缩短, 峰值径流增多, 城市暴雨洪涝风险与日俱增, 从而造成交通堵塞、房屋农田受淹, 严重影响了民众的正常生产和生活^[3-5].

内涝积水产生的原因复杂, 看似相同的表象有不同的成因, 主要包括由于排水系统排水能力不足导致的积水和河道水位持续升高漫入地表导致的内涝. 不同成因的内涝积水需要采用不同的治理手段, 不同的工程措施属于不同的专业体系, 一般分为市政和水利两个体系. 市政排水和水利排涝系统均要求在各自设计降雨条件下排涝, 受制于不同的规范和专业体系, 两个系统在一定程度上保持独立^[6-8]. 然而, 市政排水和水利排涝相互依存, 具有整体性, 不可简单分之. 在传统模式下, 市政排水系统往往采用快排思路, 尽快将地表积水排至河道. 为了提高行洪能力, 水利部门又需要加高堤防, 这会导致河道水位上涨, 从而降低排

水系统的排水能力, 最终导致城市的防洪排涝能力难有实质性提高.

为了改善“多龙治水”的局面, 2021 年发布了《国务院办公厅关于加强城市内涝治理的实施意见》(国办发〔2021〕11 号), 明确提出要系统建设城市排水防涝工程体系; 随后住房和城乡建设部联合国家发展和改革委员会、水利部共同发布了《“十四五”城市排水防涝体系建设行动计划》(建城〔2022〕36 号), 进一步强调了构建城市防洪排涝统筹体系的重要性. 我国一些地区已开始试行洪涝共治模式, 将市政部门和水利部门统一由水利局或水务局进行管理. 然而, 这只是行政层面的统一, 在专业层面, 目前还无法做到真正的统一. 主要原因为: (1)专业体系不统一. 市政部门主要依据住房和城乡建设部编制的《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)^[9]进行管道排水、内涝规划; 而水利部门则主要依据水利部编制的《治涝标准》(SL 723—2016)^[10]、《防洪标准》(GB 50201—2014)^[11]进行排涝、防洪规划. 由于针对的对象不同, 且不

收稿日期: 2023-09-26.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal1g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(52270076); 浙江省自然科学基金(ZX2022001369).

第一作者: 余振勋, 博士/教授, 主要研究方向: 排水管网理论研究与技术. E-mail: yuzhenxun@nbu.edu.cn

同部门的计算方法和水文统计方法存在差异,市政排水和水利排涝难以直接衔接。(2)降雨衔接不明确。目前,市政部门主要应用 1~3 h 的短历时降雨,步长 5 min;而水利部门主要应用 24~72 h 的长历时降雨,步长 1 h。这是由不同部门所研究的不同排水服务范围的空间尺度决定的。现在市政部门和水利部门的设计雨型仍无统一的规范方法。

美国、英国等发达国家的城市排水规划一般包含小排水系统、大排水系统、防洪系统 3 个组成部分^[12-13]。小排水系统主要针对 2~5 年一遇的降雨设计,通过排水管网等基础设施排除径流雨水,防止积水。大排水系统关注超过管网设计标准,但是低于防洪系统设计标准的暴雨径流所带来的排涝问题,主要用于应对 50~100 年一遇的降雨设计。防洪、排涝和排水的标准是统一的^[14-16]。

为了统筹排水、排涝系统,国内不少学者对市政排水系统和水利排涝系统的衔接关系进行了研究。一是探讨两个系统在设计暴雨重现期上的对应关系,如刘曾美等^[17]利用 Copula 函数模型对市政排水和水利排涝标准所对应的暴雨过程的衔接风险进行了定量分析;杨星等^[18]构建了市政排水系统和水利排涝衔接的风险模型,根据组合风险率确定设计重现期;于凤存等^[19]探讨了暴雨历时、排涝时间以及设计暴雨重现期之间的定量关系;陈子桑等^[20]基于二次重现期推算不同历时暴雨组合的衔接关系。上述研究通过模型等计算方式分析并探讨了如何降低两个系统的衔接风险。二是探讨两个系统在设计流量上的对应关系,如范威等^[21]以东莞市新开河系统为例,计算得到市政 5 年一遇流量与水利 20 年一遇流量相当;薛振洲等^[22]通过计算,将不同重现期下市政排水与水利排涝系统的径流峰值流量进行比较,提出以峰值流量法解决衔接问题。上述研究对不同重现期下的峰值流量进行比较和研究,从流量的角度确定衔接方式。三是探讨两个系统在水位上的对应关系,如陈婕等^[23]采用破坏率分析法及相融性分析法,从河道顶托和平衡降雨强度角度对排水与排涝重现期的衔接问题进行了研究;黄国如等^[24]采用 InfoWorks ICM 模型,耦合分析了管网与水体之间的相互作用。上述研究在探讨两个系统衔接关系基础上,进一步考虑了河道水位对管道排水造成

的顶托影响。然而,现有研究大都采用不同的计算方法和模型探讨两个系统在对应的暴雨过程中的衔接风险,未明确指出市政排水和水利排涝系统产生不同风险的根本原因是空间尺度与降雨历时的不同。

本文首次提出了一种新的雨洪管理方法,即在遵循水量迁移转化的自然规律基础上,通过合理划分不同层级的空间管理单元,统筹防洪-排涝-排水系统,以应对不同重现期、不同降雨历时的降雨。不同层级的单元在空间管理上承担不同的功能,可以采用不同的工程手段,并以宁波市海曙片为研究对象,阐述该方法在工程实践中的应用,旨在为平原河网城市雨洪管理提供理论支撑。

1 研究方法 with 内容

1.1 空间管理单元划分方法

宁波地势西高东低、南高北低,平原地势平坦,河道纵横,河网密布,台风等强降雨给城区带来的洪涝风险极大^[25-27]。宁波市境内水系由甬江流域和象山港、三门湾地区独流入海水系组成,其中甬江流域的主要干流包括甬江、奉化江和姚江。平原河网既是城镇排涝的通道和调蓄空间,又是城镇排水的出路,密集的河网水系为管理单元划分提供了基本的自然条件。宁波市区水系如图 1 所示。

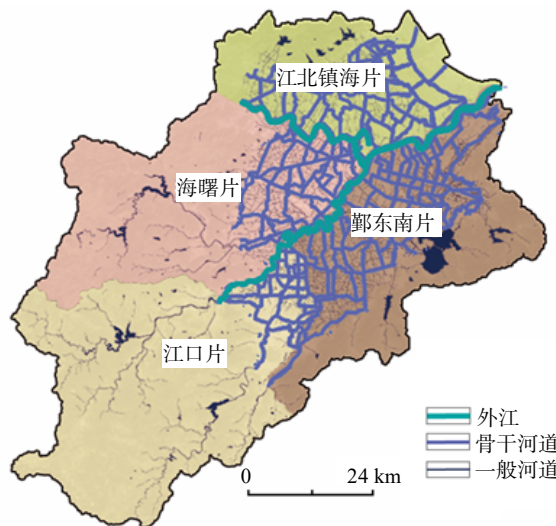


图1 宁波市水系及一级单元划分示意图

一级单元的划分主要基于水系、重要地理边界和行政边界。根据宁波市主城区现状,将主城区划分成海曙片、鄞东南片、江北镇海片以及江口片 4

表 1 多级共治体系建设框架

单元类别	风险类型	设计降雨	工程布局
一级单元	流域洪水风险	200 年一遇 72 h 降雨	水库蓄洪、沿山导流、防洪堤、沿江闸泵、河湖调蓄
二级单元	平原排涝风险	20 年一遇 24 h 降雨	水位管控、水体调蓄
三级单元	城镇内涝积水风险	50 年一遇 3 h 降雨	排水管网提标改造、市政强排、竖向优化、低影响开发

个一级单元,其排水服务空间范围为整个流域.在一级单元范围内,以骨干河道为界划分二级单元,其排水服务空间范围为平原区域,这是区域水位管控的首选边界.在城市建成区的二级单元范围内,以一般河道为界划分三级单元,其排水服务空间范围为城镇建成区区域.3 个级别单元中,上级单元为下级单元提供边界条件,实现不同层级间协调配合,其中三级单元是城市雨水管网管理的基本单元,贯穿降雨-管网-内河 3 要素.

1.2 多级共治体系的建立

通常城市内涝积水的治理手段有限,如何使用有限的工程措施缓解内涝积水情况,需要在现有的工程和管理体系下充分融合、统筹管理,发挥各专业的最大效益.因此,本文提出一种基于 3 个不同级别雨水管理单元的共治体系(称为多级共治体系).多级共治体系针对不同级别单元采取不同的治理措施,对一级单元进行防洪治理,低洼区域所在的二级单元进行排涝治理,三级单元进行城市排水治理,以耦合理念将工程措施形成合力,共同消纳单元内的暴雨产流.具体框架见表 1.

表 1 参照宁波市《甬江流域防洪治涝规划》,甬江流域防洪标准及防洪工程建设标准为 200 年一遇,城市及城镇排涝标准为 20 年一遇 24 h 暴雨 24 h 排出.参照《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)^[9],宁波市内涝防治重现期为 50 年.

基于宁波地势,在遭遇长历时降雨时会面临来自上游的山洪和下游水位顶托两方面风险,考虑到山区和水库的滞蓄作用,径流雨水从最远端流至外江的流行时间在 72 h 内,因此采用 200 年一遇 72 h 的设计降雨进行校核.在一级单元范围内,通过蓄、排、控相结合的综合治理措施,提高流域防洪减灾能力.

在一级单元防洪工程的总体布局下,城市洪灾可以得到有效控制.然而,地势较低的区域,在规划水位条件下仍存在内涝风险.二级单元为排

涝整治的首要考虑范围,在保证骨干河道畅通的前提下,空间内可以进行单元内部水系调控.对存在连片或面积较大低洼区域的二级单元,若外围水位较高,可通过闸门阻隔外围河网和低洼水系的联系,进而在该独立区域内进行内部管控.在平原范围内,雨水通常沿河道流动,穿过整个平原排至外江的时间在 24 h 内,因此采用 20 年一遇 24 h 的设计降雨进行校核.

当面临短历时强降雨时,若管网排水不及,会在地势较低处形成积水.此外,若河道水位较高,水极易漫入地块形成内涝.考虑到宁波城区拥有较高的水面率,雨水可以通过管网快速流入河道.在宁波城区,雨水管渠的降雨历时一般为 10~30 min(包括地面集水时间和管渠内雨水流行时间),因此选用 50 年一遇 3 h 降雨进行校核.在已控制好水位的前提下,应充分发挥以雨水管道为核心的排水设施功能,根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)^[9],宁波市雨水管渠设计重现期应提标至 3~5 年一遇.同时,合理控制各单元地面高程,保障地块安全.

2 工程措施布局方法

2.1 单元概况

海曙片位于宁波市西南部,东临奉化江,北接姚江,面积约 595.5 km²,共有 25 条骨干河道,总长达 171.3 km.海曙片西接四明山脉,东南向来自海上的暖湿气流到此被迫抬升,因此汛期易发生极端降水事件.此外,作为宁波市的老城区,海曙片建设年代较早,一些地方地势低洼,排水管网建设标准相对较低.

2.2 空间单元划分法的应用

根据海曙片骨干河道的分布,划分了 48 个二级单元.在有排水管网布设的城市建成区,根据一般河道的分布,划分 158 个三级单元.不同等级单元对应不同历时和重现期的设计降雨(图 2).

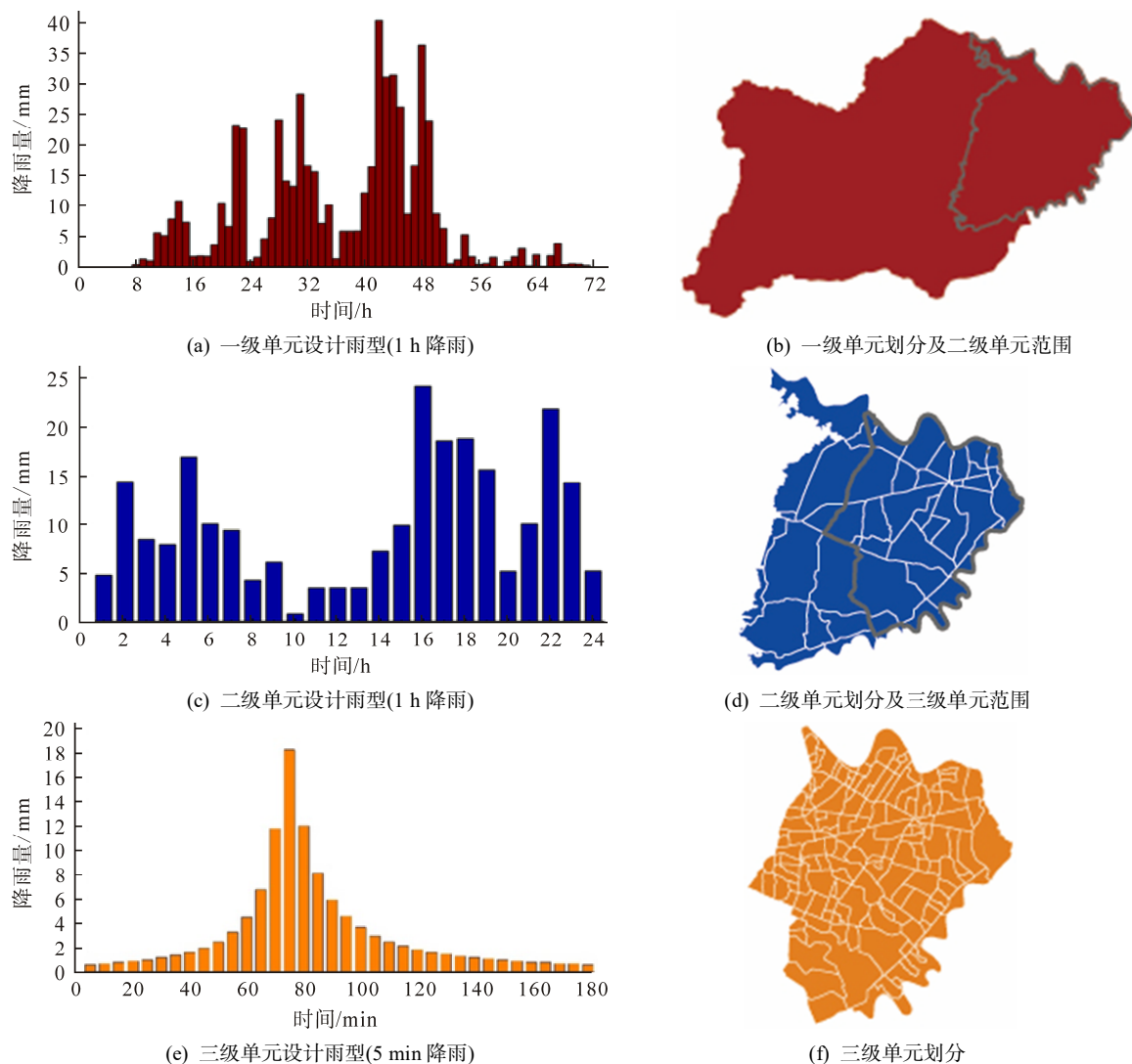


图2 海曙片不同等级单元设计雨型及单元划分示意图

按照选定典型暴雨的空间分配特性,根据计算得到设计雨量对暴雨进行缩放,得到一级、二级单元的设计暴雨雨型.参考《甬江流域防洪治涝规划》,奉化江流域海曙片典型暴雨采用宁波1963年12号台风暴雨,一级单元对应200年一遇72 h总降雨量562 mm,平均雨强约 $8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;二级单元对应20年一遇24 h总降雨量246 mm,平均雨强约 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;三级单元采用宁波市三江片暴雨强度公式转芝加哥降雨模型得到设计暴雨雨型,50年一遇3 h总降雨量114 mm,平均雨强 $38 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$.

2.3 多级共治工程布置方法

基于多级共治理念,从流域出发,统筹市政排水和水利排涝系统,在充分发挥河网滞蓄功能的同时,加强排水管网建设,制定海曙片洪涝治理工

程布置策略.

2.3.1 一级单元工程布局

根据1.2节所述,一级单元面临流域洪水风险,需要进行防洪工程建设.结合城市开发建设实际情况和用地规划,参照《甬江流域防洪治涝规划》内容,制定了南挡、西导、中疏、强排、内滞的治理方针(图3).

首先,通过沿外江修建防洪堤、布设闸闸,控制外江分洪入海曙片的洪水量,规划防洪堤总长62 km,沿江闸23座,总净宽880 m.同时,利用西侧湖泊河、梅梁桥河作为沿山导流河,将西侧部分山洪导入姚江,减少山区汇入平原的水量.其次,对有条件的海曙片骨干河道及部分重要支流进行拓宽和疏浚,以提高河网水面率,保证河道过流能

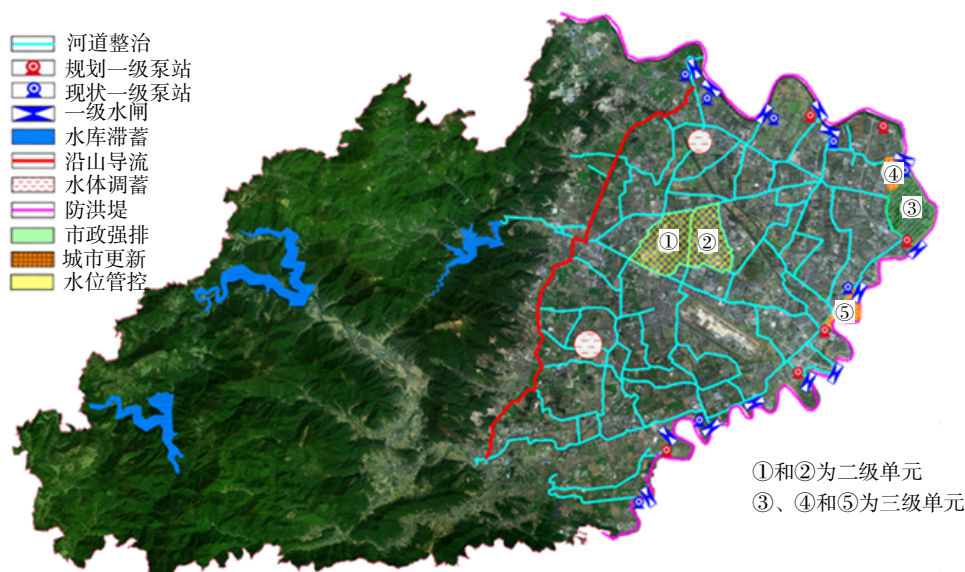


图3 一级空间单元划分及治理工程布置示意图

力与沿江闸泵排水能力相匹配, 给水以空间. 此外, 根据《甬江流域防洪治涝规划》内容, 设定闸泵参数, 平原地区的河网主要通过这些设施将水排入奉化江和姚江. 通过泵站强排保障平原洪涝安全, 规划沿江泵站共 14 座, 总流量 $346.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 最后, 通过四明山脉的周公宅水库、蛟口水库、溪下水库以及梅梁桥河、湖泊河右侧的 2 座调蓄湖, 滞蓄海曙片洪涝水量, 实现雨水的资源化利用. 另外, 防洪工程设计在提高洪涝承载能力的基础上, 应与滨江公园等市政工程紧密联系, 不应单纯考虑防洪需求而挡住城市景观, 应兼顾生态环境和社会经济效益的平衡.

2.3.2 二级单元工程布局

随着一级单元防洪工程建设的逐渐完善, 海曙片骨干河道的水位已得到有效控制, 但是部分连片或面积较大的低洼区域在规划水位条件下仍存在内涝风险. 因此, 需要对相关单元进行针对性的管控.

以图 3 海曙片集士港镇单元①和单元②为例, 单元①为西洋港河-前塘河-风棚碶河-中塘河的围合区域, 单元②为中塘河-风棚碶河-前塘河-布政河的围合区域, 其中部分尚未改造的老小区地面高程较低, 存在较高的内涝风险. 对单元①和单元②进行水位管控(图 4), 沿存在较高内涝风险单元的边界河道进行包围, 规划泵站 16 座、碶闸 16 座, 以阻断外围河网和单元内部低洼水系的联系, 加

快雨水的排出.



图4 二级空间单元划分及治理工程布置示意图

2.3.3 三级单元工程布局

在二级单元推进泵站部署, 控制好河道水位的基础上, 完善城镇排水管网. 以单元①中的三级单元 1-1 为例, 该单元为城市建成区, 以生活小区为主, 部分小区建设年代久远, 存在易积水点. 近期对易积水点附近雨水管网进行改造, 按照 3 年一遇标准重新布设雨水管网, 改建雨水管 1 770 m(图 5). 此外, 根据海绵城市建设方案, 新建、改建、扩建工程均应进行低影响开发建设, 相关工程与主体工程同步设计、施工、投入使用. 同时, 依托内河等海绵通道, 增设调蓄绿地, 消纳自身及周边区域的雨水径流, 并衔接单元内雨水管渠系统, 蓄排结合, 系统地构建海绵城市的空间格局.

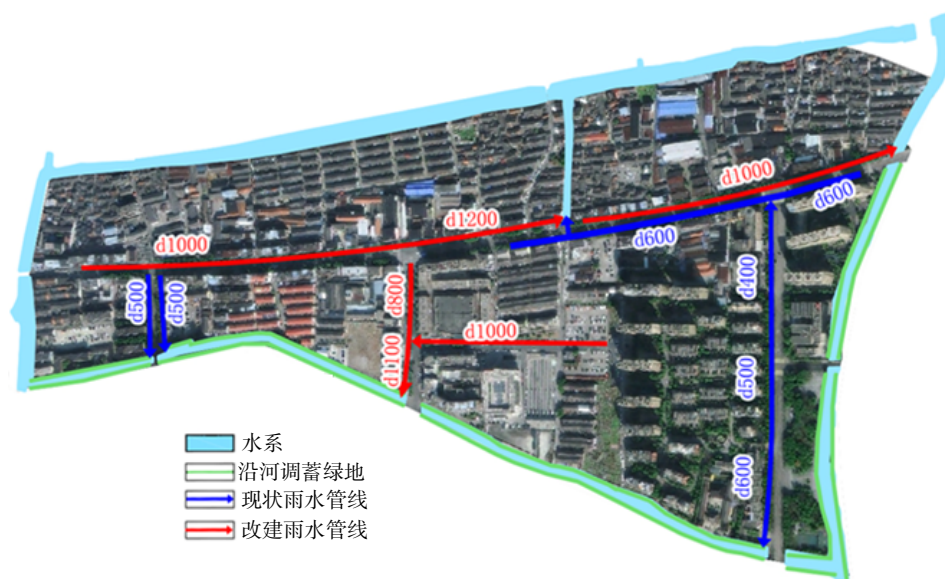


图5 三级空间单元划分及治理工程布置示意图

若地面高程低于 2.5 m 的涝水位,则存在河水倒灌漫入的风险,雨水管网排水受到水位顶托将会失效,因此结合城市发展规划(图 3),以单元④和单元⑤两个内涝高风险片区为例进行城市更新.将改建区域地面高程控制在 3 m 以上,即在涝水位 2.5 m 基础上加高 0.5 m,从而根本上解决内涝积水问题.对于无旧改规划,但是重要构筑物较多,且现状地坪较低的单元,可以采用市政强排的方式进行独立管控.以单元③为例,通过外围建设高竖向堤防,将低洼区域独立封闭于一个圩区内,并用强排泵站将圩区内积水排至外围.

2.4 基于空间单元的多级共治效果验证

采用 InfoWorks ICM 分别构建海曙片一级、二级、三级单元洪涝系统模型.考虑到可获得的数据有限,对所构建模型进行了一定的简化.在相同条件下,对比常规治理方法和基于空间单元管理的多级共治治理效果,以验证其合理性.

2.4.1 模型构建

通过 InfoWorks ICM 模型,将城市排水管网及河道的一维水力模型与二维洪涝淹没模型整合,从而完整地模拟城市雨水的循环过程^[28-29].

对海曙片主干河道建模,由于数据缺失,对河网进行了部分简化.大部分河道预设河底高程为 -1.87 m,河道形状为梯形,河岸线根据实际地形赋值.上游山区采用 SCS(Soil Conservation Service)产流模型,通过经验参数 CN(Curve Number)推求

潜在的人渗量, CN 取 70~82.平原建设区采用 Fixed 产流模型,汇流模型均采用 SWMM(Storm Water Management Model),综合径流系数取 0.85,地表平均糙率取 0.04.以鄞江、奉化江和姚江规划设防标准的防洪堤作为模型的边界条件,山区以实际高程划定汇水单元绘制集水区,平原区以主干河道为边界绘制集水区.

二级单元以单元①和单元②为例,对其范围内的主干河道和一般河道进行建模.采用 Fixed 产流模型,汇流模型采用 SWMM,综合径流系数取 0.85,地表平均糙率取 0.04.模型用闸门、泵站运行状态实现内、外水位的调整,并以此作为一般河道排水至主干河道的边界条件,以一般河道为边界绘制集水区.

三级单元以单元 1-1 为例,通过输入管网、检查井、城市下垫面等基础数据构建模型.屋面、路面等不透水面采用固定径流系数法,路面、屋面径流系数取 0.90.绿地等透水面产流过程相对复杂,采用霍顿产流模型,取初渗率 $64 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、稳渗率 $1.52 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、衰减率 $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 作为霍顿模型模拟参数.绿地糙率设置为 0.15,路面、屋面糙率设置为 0.013.通过泰森多边形法划定子集水区.

2.4.2 结果分析

图 6 为海曙片水位及三级单元的积水情况.在 200 年一遇 72 h 降雨条件下,海曙片主干河道的水位如图 6(a)所示.中心城区河道最高水位达到 2.7

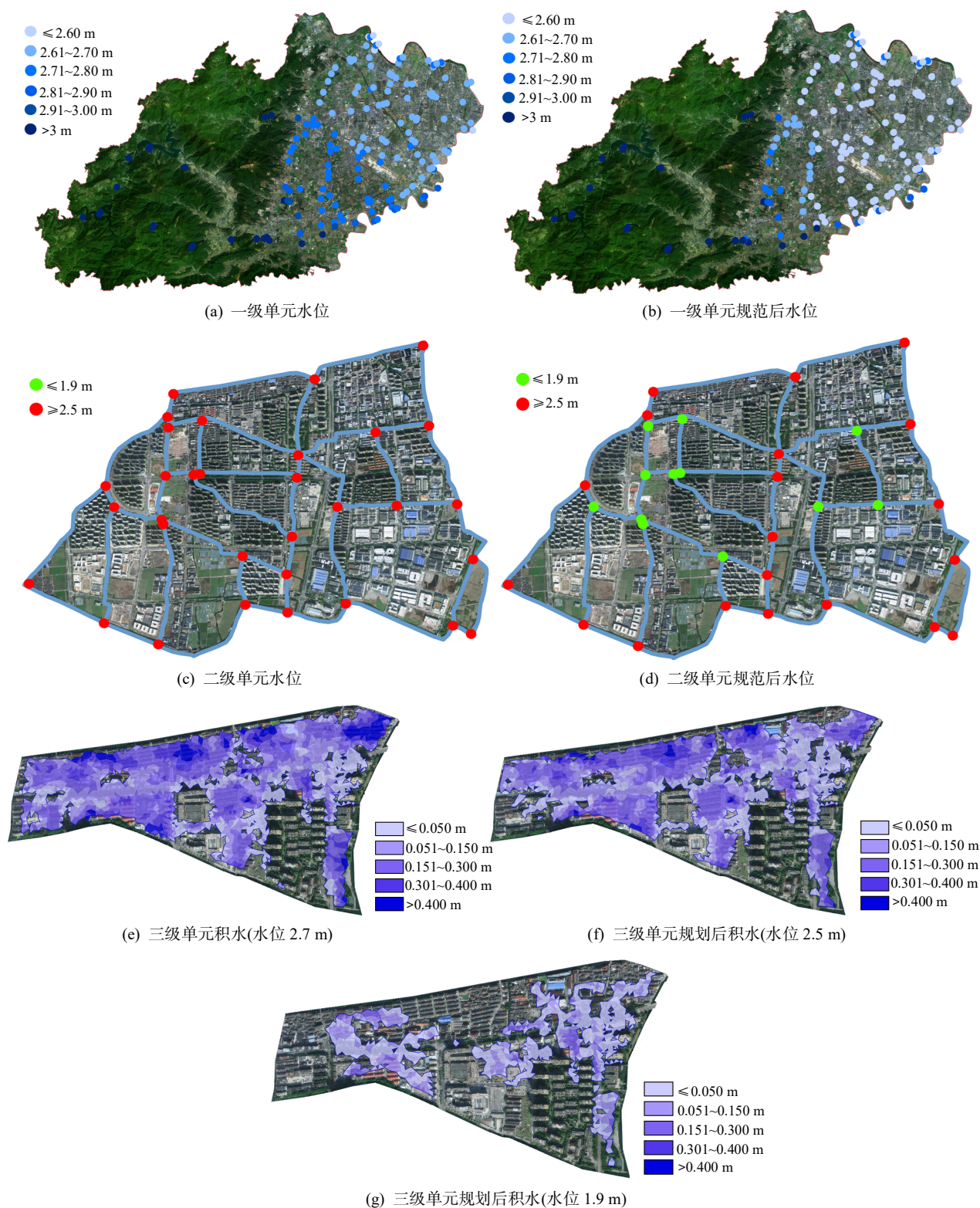


图6 海曙片水位及三级单元积水风险示意图

m. 由于强排规模有限, 导致外排不畅, 内部涝水无法及时排出. 在此水位条件下, 利用模型对单元 1-1 进行积水风险分析, 结果如图 6(e)所示. 由于管

网排水能力较差, 且受排水口河道高水位顶托, 该单元内部雨水无法及时排出, 积水总面积高达 39 hm^2 , 淹没水深大于 0.15 m 的易涝区面积约 22 hm^2 .

通过实施上述工程措施,在相同降雨条件下,经过模型校验,河道水位得到有效控制(图 6(b)).在此水位下,对单元 1-1 进行积水风险分析,结果如图 6(f)所示.对比发现,积水面积仍高达 24 hm^2 ,削减率仅为 38.5%.这是因为单元 1-1 为海曙片老城区,建设年代较早、地势较低,排水管即使按照 3 年一遇标准提标改造,部分区域地面高程仍低于降低后的河道水位(2.5 m),出水口河道水位顶托,管网无法正常排水.但是通过二级单元工程措施,在保证主干河道畅通的前提下可以进一步降低单元①和单元②的内部水位,工程实施前后河道水位对比结果如图 6(c)和图 6(d)所示,通过泵闸控制,内部河道水位一般可以保持在警戒水位(1.9 m)以下.在此水位条件下,再次对管网进行提标,改造后的单元 1-1 积水风险模拟结果如图 6(g)所示,积水面积大幅减少(削减率约为 60.5%).同时积水深度显著降低,淹没水深大于 0.15 m 的易涝区面积降至 1 hm^2 ,总体上可以应对 50 年一遇降雨.

综上所述,基于空间单元进行多级共治工程布局对于城市洪涝管理意义重大,可实现不同级别空间单元之间的协调排水,从而降低积水风险.因此,基于空间单元的多级共治管理是一种高效、实用的方法.

3 结论

(1)采用空间管理单元划分方法,以流域为基础划分不同层级的空间单元,遵循自然生态水文过程,考虑雨水跨排水分区的汇流情况.因此,这种划分方法能更精准有效地进行洪涝风险分析.

(2)在空间单元划分基础上,运用多级共治方法对单元进行工程布局,可以实现不同层级单元之间的充分联动.多级共治耦合市政、水利两大专业体系,不同层级的单元涵盖防洪、排涝和排水功能,可以用有限的工程手段最大程度地解决内涝积水问题,为城市洪涝防御提供弹性和韧性.同时,工程的实施还能较好地改善沿河生态景观,提高居民的生活质量.

后续研究如要进一步提高空间单元划分的精确度,可以结合地形数据,考虑地势较高的道路、城市山体等因素对雨水径流的影响.本文设计降雨历时选取的是相关规范和常规做法,因此对不

同等级空间单元的降雨历时研究还有待深入.

参考文献:

- [1] 张建云,宋晓猛,王国庆,等.变化环境下城市水文学的发展与挑战: I.城市水文效应[J].水科学进展,2014,25(4):594-605.
- [2] ZHANG Y Y, PANG X, XIA J, et al. Regional patterns of extreme precipitation and urban signatures in metropolitan areas[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(2):641-663.
- [3] 徐宗学,叶陈雷.城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望[J].水利学报,2021,52(4):381-392.
- [4] KUNDZEWICZ Z W, SU B D, WANG Y J, et al. Flood risk and its reduction in China[J]. Advances in Water Resources, 2019, 130:37-45.
- [5] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等.中国城市洪涝问题及成因分析[J].水科学进展,2016,27(4):485-491.
- [6] 陈文龙,徐宗学,宋利祥,等.基于流域系统整体观的城市洪涝治理研究[J].水利学报,2021,52(6):659-672.
- [7] 陈文龙,徐宗学,张印,等.高密度城市暴雨洪涝治理理论框架及其应用研究[J].水利学报,2022,53(7):769-778.
- [8] 张辰,章林伟,莫祖澜,等.新时代我国城镇排水防涝与流域防洪体系衔接研究[J].给水排水,2020,46(10):9-13,58.
- [9] GB 50014—2021.室外排水设计标准[S].
- [10] SL 723—2016.治涝标准[S].
- [11] GB 50201—2014.防洪标准[S].
- [12] DS EN 752:2008. Drain and sewer systems outside buildings[S].
- [13] American Society of Civil Engineering. Standard guidelines for the design of urban stormwater systems [EB/OL]. [2023-07-22]. <https://archive.org/details/standard-guidelin0000unse/page/n1/mode/2up>.
- [14] 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,2013,37(2):45-50.
- [15] Urban Drainage and Flood Control District. Urban storm drainage criteria manual[M]. Colorado, USA: Water Resources Publications, 2016.
- [16] PANOS C L, WOLFAND J M, HOGUE T S. Assessing resilience of a dual drainage urban system to redevelopment and climate change[J]. Journal of Hydrology, 2021, 596:126101.
- [17] 刘曾美,熊腮敏,雷勇,等.城镇内涝防治中市政排水与水利排涝的标准衔接研究[J].水资源保护,2022,38(1):125-132.
- [18] 杨星,李朝方,刘志龙.基于风险分析法的排水排涝暴

- 雨重现期转换关系[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(2):171-176.
- [19] 于凤存, 王友贞, 蒋尚明, 等. 基于设计暴雨强度城市河道排涝与管渠排水标准关系研究[J]. 灾害学, 2015, 30(1):21-24.
- [20] 陈子桑, 高时友, 李鸿皓. 基于二次重现期的城市两级排涝标准衔接的设计暴雨[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 382-389.
- [21] 范威, 黄程. 城建部门与水利部门排涝标准差别[J]. 水利规划与设计, 2013(5):20-22, 46.
- [22] 薛振洲, 李连文, 陈昀晖, 等. 基于设计流量的两级系统重现期衔接关系研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(8): 50-53, 30.
- [23] 陈捷, 叶兴成, 王飞, 等. 城市不同排水除涝标准衔接方法的探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4):40-44.
- [24] 黄国如, 王欣. 基于城市雨洪模型的市政排水与水利排涝标准衔接研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(2):1-5.
- [25] 叶晓东. 城市内涝成因分析及规划对策研究: 以宁波市中心城为例[J]. 现代城市研究, 2015, 30(10):19-24.
- [26] 张芳. 宁波市防洪排涝对策研究[J]. 浙江水利科技, 2018, 46(6):19-21.
- [27] ZHOU M L, FENG X L, LIU K K, et al. An alternative risk assessment model of urban waterlogging: a case study of Ningbo city[J]. Sustainability, 2021, 13(2):826.
- [28] SIDEK L M, JAAFAR A S, Majid W H, et al. High-resolution hydrological-hydraulic modeling of urban floods using InfoWorks ICM[J]. Sustainability, 2021, 13(18):10259.
- [29] FERGUSON C, FENNER R. The impact of natural flood management on the performance of surface drainage systems: a case study in the Calder Valley[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590:125354.

A multi-level co-governance of rainwater and flood based on spatial units: a case study of Haishu area in Ningbo City

YU Zhenxun¹, WANG Buyun¹, FENG Guoguang², SI Yifang², CHU Huaqiang³

(1.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Urban Planning & Design Institute, Ningbo 315042, China;

3.College of Environment Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To address the limitation of traditional flood control method of managing municipal drainage and water conservancy drainage separately, this study proposes a spatial unit-based approach to rain and flood management that is tailored to the topographic features of river network in plain cities and the current flood control and drainage practices. This approach demarcates critical channels for flood control, urban flooding control, and drainage as boundaries, dividing different levels of spatial units, and employing distinct engineering methods for managing different levels of units, thus creating a multi-level co-governance system of “flood control-urban flooding control-drainage”. The spatial unit management framework is applied to Ningbo City, with its Haishu area serving as an example for the implementation of the proposed method. The engineering effectiveness is verified through the Infoworks ICM model. The results indicate that the multi-level collaborative governance based on spatial units can streamline the rainwater flood system, couple flood control, urban flooding control, and drainage system engineering, and provide a reference for urban flood management in China.

Key words: multi-level co-governance; spatial unit; rainwater and flood management; water logging

(责任编辑 史小丽)