

城市雨水管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.03.016

广州市静态洪涝风险图编制案例探讨

李文涛, 王广华, 周建华, 王宏利, 李泽豪
(广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060)

摘要: 为提高广州市的洪涝防御能力,首次以流域和排涝片区为单元,构建排涝片区二维水动力模型,算清流域“水账”,分析洪涝成因,编制广州市9大流域105个排涝片区的静态洪涝风险图。洪涝风险图能直观反映曾经发生积水或洪涝淹没的位置及空间分布,提前掌握洪涝淹没范围、淹没水深、淹没时间等关键信息,对摸清广州市洪涝灾害风险隐患底数具有重要价值,可为制定科学有效的超标洪涝防御预案,提高避洪转移、防汛抢险物资分配及调度的科学性提供重要支撑。

关键词: 洪涝风险图; 流域; 排涝片区; 水账; 水力模型

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)03-0104-05

Discussion on the Compilation of Static Flood Risk Map in Guangzhou

LI Wen-tao, WANG Guang-hua, ZHOU Jian-hua, WANG Hong-li, LI Ze-hao
(Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510060, China)

Abstract: In order to improve the flood prevention ability of Guangzhou, for the first time, a two-dimensional hydrodynamic model was built with the basin and drainage area as the unit. The “water account” of the basin was calculated, the causes of flood were simulated and analyzed, and a static flood risk map of 105 drainage areas of 9 major basins in Guangzhou was prepared. The flood risk map can directly reflect the location and spatial distribution of water-logging or flood inundation in history, and control the scope and depth of flood inundation in advance. The key information, such as submergence time, is of great value in understanding the base number of potential flood hazards in Guangzhou. It can provide important support for the urban flood prevention work by formulating scientific and effective plans for preventing excessive floods, improving the scientificity of flood avoidance transfer, distribution and dispatching of flood prevention and emergency materials.

Key words: flood risk map; basin; drainage area; water account; hydraulic model

伴随着广州城市化的快速发展和全球性气候变化,短历时强降雨和灾害性气候频发,加之潮位上升,给城市排水防涝带来巨大压力,每逢汛期时有内涝发生,给生活生产秩序造成较大影响。为提高广州市的洪涝防御能力,以流域为单元,构建流域水动力模型,清算流域“水账”,分析洪涝成因,编制广州市9大流域105个排涝片区静态洪涝风险图,辅助城

市洪涝应急决策支持。随着基础数据的不断完善,逐步建立分区动态洪涝风险图^[1]。

1 基于洪涝系统观的排涝片区划分

城市洪涝的形成机理是片区内的降雨经过下渗、蒸发和填洼后,形成的径流经过调蓄、转输(地下管渠和地表汇流)进入下游河湖,超出片区蓄、排能力的径流积存在低洼区域形成洪涝。洪涝形成过程

是随时空变化的,因此为了准确分析洪涝成因,需建立排涝片区的系统观,根据水系特点划分较为独立的排涝片区,进行定量计算分析。根据广州市的地形地貌、河道水系情况等因素,将全市范围内流溪河等9大流域共划分为105个排涝片区(见图1)。从流域和排涝片区角度具有相对封闭的汇流空间,保证了水量计算的精度,可作为“水账”计算和风险图编制的基础。



图1 广州市105个排涝片区划分图

Fig.1 Division of 105 water-logging drainage areas in Guangzhou

2 编制技术路线

以排涝片区为基础,构建洪涝模型,清算流域水账,绘制洪涝风险图,编制技术路线详见图2,主要包括五步工作。①基础数据分析:收集各排涝片区的地形、相关水系、排水工程及调度、历史洪涝灾害等情况。②分区洪涝模型建立:每个排涝片区单独建模,耦合源头海绵设施、排水管渠、河道湖泊和地表网格,满足洪涝计算要求。③水账计算:考虑50年、100年一遇和区域历史最大暴雨洪水共三个区域暴雨为主的水文组合,按排涝片区面积与净雨量的乘积计算各组合径流总量。按排涝片区内水

库、湖泊、河道(跨排涝片区的河道按照面积比例划分)等水体滞蓄容积累加得到排涝片区总调蓄容积。根据洪涝风险图计算成果,按所有网格最大淹没水深与网格面积的乘积之和计算地表滞蓄量。④洪涝风险分析计算:基于历史水淹资料,采用概化的一维、二维水动力数学模型进行淹没范围及水深分析^[2]。计算结果按所有网格最大淹没水深与网格面积的乘积之和计算地表滞蓄量。⑤图集绘制成册:底图采用高清遥感图、高精度DEM(2020年,10 m精度),增设等高线。标绘要素主要包括流域边界线、历史水浸点、等高线、地市级驻地、县区驻地、乡镇街道驻地、雨量站、水位站、泵站、水闸、医院、学校、高速公路、城市主干道及一般道路、铁路,河流湖库水系,淹没水深分布图,典型潮位和雨量过程,以及水账计算结果简表、风险统计信息、指北针和比例尺等。

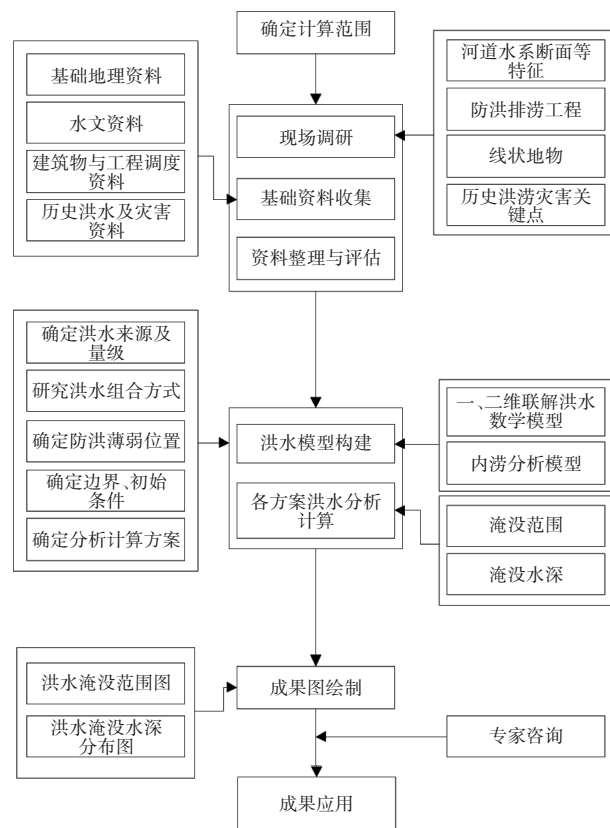


图2 洪涝风险图编制技术路线

Fig.2 Technical roadmap for flood risk map compilation

3 模型建立与计算

3.1 模型建立

城市洪涝模型由产汇流模型、河道洪水演进模

型、管网模型、地表洪水演进模型等耦合而成^[3]。

① 产流模型

降水经过地表的截留、下渗、蒸发等过程之后,剩余的部分则作为地表径流停留在汇水区表面。其计算见式(1):

$$W_{\text{产流}} = Q_{\text{总}} - Q_{\text{下渗}} - Q_{\text{蒸发}} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{总}}$ 为降雨总量; $Q_{\text{下渗}}$ 与 $Q_{\text{蒸发}}$ 分别为雨水下渗量和降雨蒸发量,其中降雨蒸发量视具体情况而定。

$Q_{\text{总}}$ 是降雨时段内的累计降雨容积(m^3),由各子汇水区降雨深度乘以汇水区面积得到; $Q_{\text{下渗}}$ 以降雨渗透到地表土壤下的水量计算;产汇流模型中的下渗量利用 Horton 模型计算。Horton 模型表征了下渗能力与时间关系的函数,见式(2):

$$f_p = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty})e^{\alpha t} \quad (2)$$

式中: f_p 为 t 时刻的下渗率, mm/s ; f_{∞} 为稳定下渗率, mm/s ; f_0 为初始下渗率, mm/s ; t 为降雨总时长, s ; α 为衰减系数,反映土壤下渗率递减关系(降雨量少且地下水位较低的绿地、铺装等下垫面具有较高的初始下渗率和稳定下渗率,在建模时会考虑不同下垫面的相关参数), s^{-1} 。

② 汇流模型

汇流过程是指将各分区净雨汇集到出口控制断面或直接排入河道的过程。地表径流模拟采用非线性水库模型,由连续方程和曼宁方程联立求解。模型需要输入每个排水小区的面积、宽度、坡度、透水地表和不透水地表的曼宁糙率,不透水地表的百分比,无注蓄能力的不透水地表所占百分比,以及透水地表和不透水地表的注蓄量。地表径流由非线性水库模型模拟,对于某一个汇水区,非线性水库模型的连续性方程为:库容变化量=入流量-出流量,即:

$$\frac{dv}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A \cdot i^* - q \quad (3)$$

式中: v 为汇水区库容水量, m^3 ; d 为水深, m ; A 为汇水区面积, m^2 ; i^* 为降雨强度, mm/s ; q 为出流量, m^3/s 。

出流量 q 可以采用曼宁公式计算,见式(4):

$$q = W \cdot \frac{1.49}{n} (d - d_p)^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (4)$$

式中: W 为汇水区宽度, m ; n 为曼宁粗糙系数; d 为水深, m ; d_p 为滞蓄水深, m ; S 为汇水区坡度。

③ 管网水动力模型

管网明满流方程见式(5)、(6):

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gAS_f + gAh_L = 0 \quad (6)$$

式中: Z 为水位(明渠流)或水头(压力流); B 为过水断面水面宽(明渠流)或值为0(压力流)。Preissmann 狭缝法假定管道顶部存在一个无限长、宽度为 B 的狭缝。

$$B = \frac{gA}{a^2} \quad (7)$$

式中: A 为断面的过水面积; a 为波速(根据明渠表面波传播速度公式进行计算)。

④ 地表洪水演进模型

采用守恒形式的二维浅水方程,见式(8):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E^{\text{adv}}}{\partial x} + \frac{\partial G^{\text{adv}}}{\partial y} = S \quad (8)$$

式中: U 为守恒向量; E^{adv} 、 G^{adv} 分别为 x 、 y 方向的对流通量向量; S 为源项向量。

3.2 水位边界条件

① 洪(潮)水位边界

北部山区的排涝片区与外江水位按降频考虑,计算工况为:以片区暴雨为主时,采用100年一遇设计降雨,遭遇外江20年一遇设计水位过程;以外江洪水为主时,采用100年一遇设计水位过程,遭遇内河20年一遇设计降雨。

中心城区、南部网河区排涝计算工况为:以雨为主时,采用100年一遇设计降雨,遭遇外江5年一遇设计潮位过程;以潮为主时,采用100年一遇设计潮位过程,遭遇5年一遇设计降雨。

② 水闸泵站运行调度

在降雨前的最后一个潮周期内,通过水闸自排和泵站强排将片区水位预降至片区或闸内的最低控制水位。降雨期间,外江水位低于内河涌时使用水闸自排,超过内河涌之后则使用泵站强排。

4 水账计算

4.1 计算降雨

设计雨型过程主要是描述一场降雨事件的重现期、降雨历时、降雨深度、峰值及其位置等5个指标,目前采用的方法一般可分为典型历史降雨缩放

法、IDF 曲线法、无因次标准曲线法、历史降雨随机模拟法等 4 种类型^[4]。设计雨型必须同时满足市政排水和水利的防洪排涝设施规划、设计的需要,在同频率下采用同一设计降雨,不仅能为工程设计带来极大的便利,更可从根本上解决市政和水利设计标准意义不匹配的问题。城市内涝防治工程应采用 24 h 设计暴雨过程线已经基本达成共识。需要同频率降雨事件合成暴雨过程,其计算方法包括同倍比放大法或同频率分析法^[5]。

根据《广州市暴雨强度公式编制与设计暴雨雨型研究技术报告》(2021 年 12 月),采用芝加哥雨型作为短历时降雨过程的设计雨型,以同频率分析法推算 24 h 设计暴雨雨型,同频率分析法计算的广州市各区 24 h 逐 5 min 设计雨型降雨过程线分配如图 3 所示。

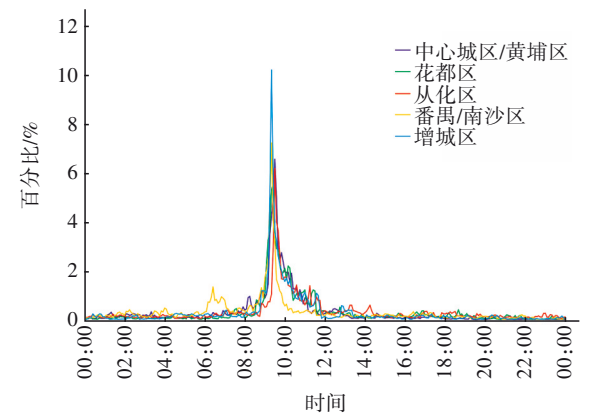


图 3 广州各区 24 h 逐 5 min 设计雨型降雨过程线分配
Fig.3 Distribution diagram of rainfall pattern and rainfall hydrograph designed for 24 h and 5 min in each district of Guangzhou

4.2 分区水账计算

对广州市九大流域的 105 个排涝片区、1 368 条河涌、307 座水库、8 大湖泊及众多山塘、坑塘等现状防洪排涝设施能力进行评估。经核算,全市最小可调蓄总容积为 $2.46 \times 10^8 \text{ m}^3$,红色预警 3 h 降雨 100 mm 对应的径流量为 $45\,863 \times 10^4 \text{ m}^3$,100 年一遇 24 h 降雨对应的径流量为 $160\,949 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

“水账”是指针对全市 105 个排涝片区,摸清现有山塘、水库、河湖的可调蓄能力以及河口水闸泵站的排涝能力,在发生强降雨时,算清各排涝片区能应对一定重现期的降雨量级。经核算,全市 105 个排涝片区的总调蓄容积为 $2.46 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中水库、湖泊调蓄容积为 $1.36 \times 10^8 \text{ m}^3$,河涌可调蓄容积

为 $0.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,山塘、坑塘可调蓄容积为 $0.31 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。各流域可调蓄容积计算结果见表 1。

表 1 广州市九大流域雨洪调蓄容积/径流量统计
Tab.1 Statistics of rainwater and flood regulation and storage volume/runoff of nine watersheds in Guangzhou

流域	面积/ km ²	调蓄容 积/10 ⁴ m ³	径流量/ 10 ⁴ m ³		调蓄容积:径 流量/%	
			100 mm	100 年	100 mm	100 年
白坭河	819	2 947	5 702	17 717	51.7	16.6
流溪河	2 673	8 885	16 317	55 332	54.5	16.1
增江	1 768	5 654	11 490	44 736	49.2	12.6
石井河	101	184	674	2 021	27.3	9.1
珠江西航道	81	374	563	1 828	66.4	20.5
珠江前航道	417	999	3 086	10 017	32.4	10.0
珠江后航道	79	457	584	1 862	78.3	24.5
大石-三支 香-沥滘	187	380	1 347	4 292	28.2	8.9
屏山河-沙 湾水道	846	3 752	6 100	22 606	61.5	16.6

根据水账计算结果可知:①北部山林生态区(白坭河、流溪河、增江三大流域)地处山区,全市大部分水库集中于此。可调蓄容积主要由水库提供,说明北部山区对区间汇水调蓄能力较弱,应以外排作为主要除涝手段。②中部中心城区(石井河、珠江前航道两大流域)总体上北高南低、半山半城,城市下游洼地同时受山洪与潮汐顶托影响,因城市开发密度高,可调蓄容积占 100 年一遇径流总量的 9.1%、10%,控制能力相对较弱,应采取蓄泄兼施的治理策略。③南部滨海湾区(大石-三支香-沥滘、屏山河-沙湾水道两大流域)各联围内河网密布,水面率较高,河涌、坑塘可调蓄容积分别占 100 年一遇径流总量的 8.9%、16.6%,天然具有分散调蓄的特征。同时联围内地势低洼,受潮汐顶托影响明显,应充分挖掘其围内调蓄潜力。

5 风险图编制

洪涝风险图编制参照《洪水风险图编制导则》(SL 483—2017)要求,底图采用高清遥感图、高精度 DEM(2020 年,10 m 精度),增设等高线,根据水动力学数学模型计算结果,绘制全市 105 个排涝片区的历史洪涝风险图、50 年一遇降雨遭遇多年平均高潮位风险图、100 年一遇降雨遭遇多年平均高潮位风险

图。该套洪涝风险图已交由各区水务部门在2022年防汛工作中使用,大幅提高了防汛工作的科学性和精准性。

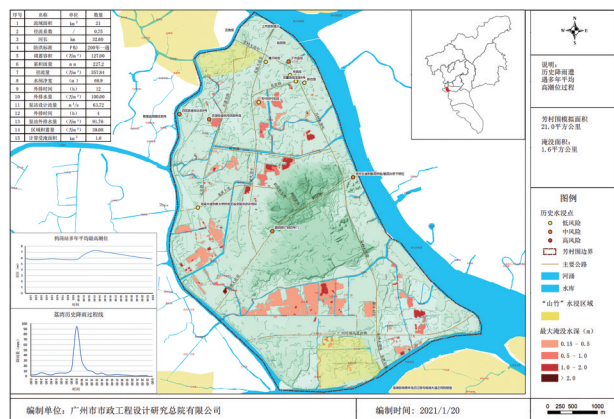


图4 广州市芳村围排涝片洪涝风险图

Fig.4 Flood risk map of Fangcun drainage area in Guangzhou

6 结论与建议

① 在资料收集、现状调研、分析计算的基础上,形成历史洪涝风险图及超标准洪涝风险图,编制了广州市105个小流域洪涝风险图,包括历史、50年一遇、100年一遇洪涝淹没水深图。

② 洪涝风险图能直观反映历史上曾经发生积水或洪涝淹没的位置及空间分布,对可能淹没范围、淹没水深、积水历时做到心中有数,对摸清广州市洪涝灾害风险隐患底数具有重要价值,可为制定科学有效的超标洪涝防御预案,提高避洪转移、防汛抢险物资分配及调度的科学性提供重要支撑。

③ 建议在静态洪涝风险图的基础上,随着数据不断完善和气象、交通等数据共享,逐步编制动态洪涝风险图,构建排水防涝“一张图作战”指挥体系,为排水防涝提供智慧化解决方案,实现“事前预警预报、提前布防,事中辅助决策、统一指挥,事后灾后评估、优化系统”的全过程管控目标。

参考文献:

[1] 杨爱玲,朱岩隆,周泉,等.洪水风险图编制技术研究

[J]. 测绘与空间地理信息,2019,42(4):197-199.

YANG Ailing, ZHU Yanlong, ZHOU Quan, *et al.* Research on flood risk map compilation technology [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(4): 197-199(in Chinese).

[2] 王川涛,黄丽娇,王俊佳.基于MIKE FLOOD模型的老城区内涝防治研究[J].中国给水排水,2022,38(15):128-132.

WANG Chuantao, HUANG Lijiao, WANG Junjia. Prevention and control of waterlogging in old urban district based on MIKE FLOOD model [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(15):128-132(in Chinese).

[3] 黄国如,陈文杰,俞海军.城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J].水科学进展,2021,32(3):334-344.

HUANG Guoru, CHEN Wenjie, YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 334-344(in Chinese).

[4] 唐明,许文斌,尧俊辉,等.基于城市内涝数值模拟的设计暴雨雨型研究[J].中国给水排水,2021,37(5):97-105.

TANG Ming, XU Wenbin, YAO Junhui, *et al.* Design rainstorm patterns based on numerical simulation of urban flooding [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(5):97-105(in Chinese).

[5] 许超峰,荆燕燕,陈文娇.城市设计暴雨雨型的推求及应用[J].河南科技,2018(5):159-160.

XU Chaofeng, JING Yanyan, CHEN Wenjiao. Calculation and application of urban design rainstorm pattern [J]. Henan Science and Technology, 2018(5): 159-160(in Chinese).

作者简介:李文涛(1984-),男,安徽明光人,工学硕士,高级工程师,设计三院副院长,研究方向包括水污染防治、海绵城市、排水防涝、深层排水隧道、水务信息化等。

E-mail:823924548@qq.com

收稿日期:2022-03-21

修回日期:2022-10-18

(编辑:李德强)