

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.22.005

基于专业协同珠三角平原河网区内涝防治方法探讨

郭树河^{1,2,3}, 史慧婷^{1,2,3}, 赵政阳^{1,2,3}, 拓佳娱^{1,2,3}

(1. 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510060; 2. 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室, 广东 广州 510060; 3. 广州市资源规划和海洋科技协同创新中心, 广东 广州 510060)

摘 要: 基于珠三角平原河网区内涝防治的关键问题识别,探索竖向高程-雨水管网-管控水位-水面率专业协同、要素平衡的治涝对策,提出基于竖向约束确定内河涌管控水位及适宜水面率(蓄水空间)保障的技术方法,并将该方法应用到南沙区东涌东排涝分区的内涝防治项目,可为平原河网区内涝防治提供有益尝试及补充。

关键词: 珠三角平原河网区; 内涝防治; 管控水位; 水面率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)22-0027-06

Discussion on Waterlogging Prevention and Control Methods in the Pearl River Delta Plain River Network Area Based on Professional Collaboration

GUO Shu-he^{1,2,3}, SHI Hui-ting^{1,2,3}, ZHAO Zheng-yang^{1,2,3}, TUO Jia-yu^{1,2,3}

(1. Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510060, China; 2. Guangdong Enterprise Key Laboratory for Urban Sensing, Monitoring and Early Warning, Guangzhou 510060, China; 3. Collaborative Innovation Center for Natural Resources Planning and Marine Technology of Guangzhou, Guangzhou 510060, China)

Abstract: Based on the identification of key issues in waterlogging remediation within the plain river network areas of the Pearl River Delta, this study explores the flood control countermeasures of vertical elevation-stormwater pipe network-water level control-water surface ratio with multi-disciplinary collaboration and multi-factor balance. It proposes a technical method for determining the water level control and appropriate water surface ratio (water storage capacity) based on vertical constraints. This method has been applied to the waterlogging prevention and control in the Dongchong East drainage sub-district of Nansha, so as to provide a beneficial solution for the waterlogging prevention and control in plain river network areas.

Key words: plain river network area of the Pearl River Delta; waterlogging prevention and control; water level control; water surface ratio

在全球气候变暖与快速城镇化的背景下,我国极端暴雨发生的频次明显提高,“城市看海”现象屡见不鲜。近10年内,针对日益突出的城市内涝问题,水利、市政、规划、生态及景观等专业领域均开展了相关的研究工作,内涝防治的新理念、新技术、

新方法不断涌现^[1-3],但城市内涝防治是一项系统工程,且具有明显的地域化特征,任何一种方法或措施都会涉及边界约束条件和效率空间,不可能无限制放大其水安全功能。

广州市南沙区属于典型的珠江三角洲平原河

网区,地势平坦且低洼,水网纵横交错、互联互通,尽管河涌水位壅高造成的管网排水顶托是城市内涝的最直接表现^[4],但是河涌水位是市政排水与水利排涝的“纽带”型关键参数,受多种因素的制约。因此,在平原河网区,基于本地化的水安全关键要素识别,通过专业协同、要素平衡的策略提升城市水安全水平值得深入探讨。

1 南沙区现状水安全格局

南沙区位于广州市最南端,地处珠江出海口及粤港澳大湾区几何中心。南沙原是古海湾,后经海平面退化,泥沙淤积,渐成洲坦;历史上经过多次围垦,形成了水网沙田的农业自然本底。

南沙区面临上游流域洪水、外海高潮位、区内暴雨以及台风引发的洪涝威胁,目前,形成了13个以外江水道为界的独立联围,以联围堤防及防洪(潮)水闸形成的闭合防洪圈抵御洪(潮)水。联围内雨水经管道收集后排入内河涌,经河涌调蓄在外江低潮位情况下开闸自排至外江;在外江高潮位情况下则经涌口泵站抽排至外江。近几年,随着城市的快速发展,南沙区外江堤防达标改造稳步推进,内涝防治成为水安全面临的重点问题。

南沙区因农田灌溉,农用地的地面高程略低于外江平均潮位,介于4.5~5.0 m(广州城建高程,下同),傍水而居的村镇高程一般高于农用地0.5~1.0 m,在此条件下,只要解决好农田除涝问题,村镇就不会发生内涝。在城市化过程中,初始阶段因开发建设密度低、径流产流量小,河网调蓄可以实现雨水产蓄平衡,新建区的竖向高程仅考虑与现状道路的衔接即可。因此,2015年以前的建成区高程为6.0~7.0 m,由此形成了南沙区的基准竖向高程。2017年“天鸽”、2018年“山竹”超强台风引起的风暴潮水位超过历史极值,水文样本更新使得外江相应设计频率潮位较过去均有一定提高,各水文站仅5年一遇潮位就超过7 m。由于竖向高程的约束,南沙区的内涝防治极度依赖河涌蓄水。

在河涌水系方面,尽管南沙区总水面率高达32.75%,远高于全市平均值(10.15%),但是联围内平均水面率仅3.82%,且存在分布不均衡的问题,开发强度越高的片区水面率越低,产-蓄-排不平衡的问题愈发突出。在局部高密度建成区,由竖向高程低及蓄水空间不足导致的内涝问题一直无法得

到有效根治。

南沙区内涝防治的重点是以竖向高程为约束条件,保障适宜的蓄水空间,促使竖向高程与管控水位的高差满足市政排水的需要。

2 内涝防治关键策略

2.1 基于竖向约束合理确定内河涌管控水位

内河涌管控水位是平原河网区内涝防治的关键参数。管控水位低,利于市政排水,但降低了河涌的蓄水能力;管控水位高,提高了河涌的蓄水能力,但会加剧排水顶托影响。合理确定内河涌管控水位本质上是市政排水与水利排涝进行衔接及再平衡的过程。

南沙区虽然整体的开发强度较低,但在城镇开发边界内,基本会涉及现状建成区,由于河网的互联互通,现状建成区的竖向高程成为制定内河涌管控水位的重要约束条件。为保证市政排水所需的高差,需要基于现状建成区的竖向高程反推管控水位。

南沙区市政雨水排放均为淹没出流,在内涝防治重现期标准下,将雨水管道水位等于地面高程作为内涝临界点,结合伯努利能量方程分析,竖向高程与管控水位之间的高差可视为雨水管道的水头损失,计算公式如下:

$$Z_1 - Z_0 = LI \quad (1)$$

式中: Z_1 为路面高程,m; Z_0 为内河涌管控水位,m; L 为雨水管道长度,m; I 为雨水管道水力坡降。

南沙区河网密度高,雨水就近排放、汇水面积小,多采用圆管排水,雨水管道平均水力坡降可采用如下公式^[5]计算:

$$I = 10.3 \frac{n^2}{D^{5.33}} Q^2 \quad (2)$$

式中: n 为管道粗糙系数; D 为雨水管管径,mm; Q 为雨水管道设计流量,m³/s。

由式(1)及式(2)可知,对于特定片区,竖向高程、雨水管道设计流量及长度均为定值,通过优化管道管径的方式可以计算出相应的管控水位,其中计算雨水管管径约束条件是在设计降雨重现期条件下,管道流速不低于《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)规定的0.75 m/s。

对于河涌排涝,在符合市政排水前提下,管控水位应尽可能取高值,一方面提高河涌的蓄水能力,另一方面提高低潮位条件下河涌自排的

几率。

2.2 适宜水面率计算

在相应的内涝防治标准条件下,平原河网区需要河涌调蓄及泵站强排的共同作用才能将内河涌水位降至管控水位以下。尽管“蓄”与“排”属于此消彼长的关系,但是平原河网区河底基本是平坡,水动力差,泵站降低水位具有滞后性,特别是遭遇短历时强降雨时尤为显著,因此,南沙区内涝防治的总体策略是蓄水为主、抽排为辅,重点保障适宜的水面率,降低对排涝泵站的依赖度。

为契合南沙区的内涝防治策略,提出以泵站理论最小流量为约束条件,兼顾长短历时降雨的适宜水面率计算方法。具体方法如下:

① 计算排涝分区所需泵站的理论最小流量

按照蓄排平衡原理,若泵站规模较小,则相应所需的水面率较大,但泵站最小规模必须满足在设计降雨历时内将净雨量全部排出外江,释放涌容,以便于应对下一场次降雨。参考水利行业《治涝标准》(SL 723—2016)的平均排除法计算泵站的理论最小流量,具体算式如下:

$$Q_{\min} = \frac{0.278 \Psi S H_T}{T} \quad (3)$$

式中: $Q_{\min}$ 为排涝设计降雨历时 T 所需泵站理论最小流量, m^3/s ; Ψ 为综合径流系数; S 为排涝分区面积, km^2 ; H_T 为排涝设计降雨历时 T 对应的降雨量, mm ; T 为排涝设计降雨历时,南沙区取24 h。

需要说明的是,泵站理论最小流量主要是作为计算适宜水面率的边界约束条件。在具体项目中,确定水面率后,需通过水动力模型计算最终的泵站规模。

② 计算不同水面率和降雨历时的调蓄水深

利用式(3)计算的泵站最小流量 $Q_{\min}$ 可确保设计长历时 T 降雨结束后河涌水位恢复到降雨前,在遭遇同频率短历时降雨情况下,河涌水位会壅高,水位壅高的幅度与水面率相关,采用水量平衡法计算降雨历时分别为0.5、1、2、3、6、12 h的河涌调蓄水深 h_i ,计算公式如下:

$$h_i = \frac{1000 \Psi S H_i - 3600 Q_{\min} i}{10000 S \alpha} \quad (4)$$

式中: α 为排涝分区内河涌水面率,%; i 为降雨历时,分别取0.5、1、2、3、6、12 h; h_i 为水面率 α 、降雨历时 i 的调蓄水深, m ; H_i 为降雨历时 i 的降雨量, mm 。

③ 计算不同水面率的水位涨幅

从水量平衡原理可知,当短历时降雨水位高于管控水位时,说明水面率不足;当短历时降雨水位低于管控水位时,说明河涌的调蓄能力尚未完全发挥作用,匹配管控水位所需的水面率有盈余;当不同短历时降雨水位越接近管控水位,说明该水面率条件与管控水位发挥的调蓄功能越充分。因此,提出将水位涨幅作为衡量适宜水面率的指标,计算不同水面率条件下调蓄水位相较于管控水位的涨幅,取水位涨幅最小值对应的水面率作为适宜水面率。计算公式如下:

$$\Delta h_{\alpha} = \sqrt{\sum_{i=0.5}^{12} \left(\frac{h_i - \Delta f}{\Delta f} \right)^2} \quad (5)$$

$$\Delta f = Z_0 - Z_c \quad (6)$$

式中: Δh_{α} 为水面率 α 的水位涨幅, m ; Δf 为管控水位 Z_0 的目标调蓄水深, m ; Z_c 为暴雨前预降水位, m 。

3 南沙区东涌东排涝分区应用案例

3.1 项目概况

根据城市组团功能,通过设置河涌节制闸将南沙区各联围划分为若干个独立排涝分区。其中,东涌东排涝分区位于蕉东联围,面积26.59 km^2 ,其土地利用规划如图1所示。



图1 东涌东排涝分区土地利用规划

Fig.1 Land use planning of Dongchong East drainage sub-district

该排涝分区河网密布,现状水面率3.63%。内河涌排至外江的涌口均已建防洪(潮)水闸,现状建有2座排涝泵站,总规模为20.8 m^3/s 。该排涝分区内涝防治标准为有效应对100年一遇暴雨,雨水管道设计重现期 P 为5~10年。

在土地利用规划及城市开发建设方面,该排涝分区包含3方面用地:①庆盛枢纽片区,面积9.05 km²,该片区属于《南沙方案》确立的3个先行启动区之一,目前正在开发建设;②东涌镇区及周边用地,面积10.30 km²,现状基本是建成区,竖向高程约6.0 m;③农用地,面积7.24 km²,竖向高程4.5~5.0 m。

庆盛枢纽片区属于新建区域,开发前是农用地,排涝分区内建设用地主要是东涌镇区及周边,尽管地势低,但地面硬化率仅为38.74%,纵横交错的河网及建设用地与农用地的相对高差使得排涝分区一直维持较高的水安全水平。随着庆盛枢纽片区的开发建设,地面硬化率提升至72.77%,而且竖向高程由4.5~5.0 m抬高至7.0~9.0 m,使得排涝

分区原来的产-蓄-排平衡被打破,内涝风险急剧上升。由于地势高差,庆盛枢纽片区开发引发的内涝风险会外溢至东涌镇区。

3.2 确定内河涌管控水位上限值

以东涌镇区竖向高程为约束条件,按照式(1)、(2)计算方法反推内河涌管控水位,计算结果见表1。从表1可知,当雨水管道设计重现期为5年时,管控水位介于5.00~5.50 m;当重现期为10年时,管控水位介于5.80~6.00 m。排涝分区毗邻的沙湾水道(外江)平均潮位为5.0 m,管控水位5.0~5.3 m将使得河涌失去调蓄能力。因此,排涝分区管控水位应与设计重现期为10年的雨水管道相匹配,基于竖向约束的管控水位上限值为5.8 m。

表1 管控水位计算结果

Tab.1 Calculation results of control water level

不利点竖向高程 Z_1/m	管道长度 L/m	汇水面积 S/hm^2	设计重现期 P/a	设计流量 $Q_1/(L \cdot s^{-1})$	管径 D/mm	100年一遇内涝防治重现期校核		管控水位 Z_0/m
						流量 $Q_2/(L \cdot s^{-1})$	水力坡降 $I/\%$	
6.2	495	4.8	5	1 033	1 350	2 189	0.198 0	5.22
			10	1 622	1 650		0.005 8	5.91
6.0	421	8.6	5	1 945	1 800	5 430	0.179 0	5.25
			10	3 109	2 000		0.004 2	5.82
6.2	483	3.6	5	632	1 350	2 273	0.203 0	5.22
			10	1 097	1 500		0.067 0	5.88
6.1	344	5.5	5	1 246	1 500	3 473	0.024 2	5.27
			10	1 954	2 000		0.005 2	5.92
6.2	451	7.9	5	1 578	1 650	4 988	0.200 0	5.30
			10	2 665	2 000		0.068 0	5.89
6.0	423	9.1	5	2 103	2 000	5 746	0.021 4	5.09
			10	3 126	2 500		0.043 0	5.82
6.2	345	2.4	5	512	1 000	1 515	0.215 0	5.46
			10	858	1 350		0.058 0	6.00
6.3	482	1.6	5	305	800	1 010	0.235 0	5.17
			10	576	1 000		0.078 0	5.92
6.3	388	4.3	5	867	1 350	2 715	0.259 0	5.29
			10	1 452	1 650		0.089 0	5.95
6.0	365	2.3	5	403	1 000	1 452	0.197 0	5.28
			10	785	1 200		0.039 0	5.86
6.2	332	7.0	5	1 358	1 650	4 420	0.265 0	5.32
			10	2 467	2 000		0.085 0	5.92

注: 雨水管道设计重现期 P 对应的设计流量根据暴雨强度公式计算而得。

3.3 蓄涝空间保障方案

① 适宜水面率

南沙区100年一遇各历时降雨量见表2,设计排涝历时24 h,排涝分区综合径流系数为0.64,按照式(3)计算方法,排涝分区所需排涝泵站理论最小

流量为69.04 m³/s。

按照式(4)计算方法,不同水面率、不同降雨历时相应的调蓄水深见表3。由表3可以看出,当水面率<3%时,水面率对调蓄水深的影

深,但变化幅度较小。

表2 100年一遇条件下不同历时降雨量

Tab.2 Rainfall for different durations under 100-year return period

降雨历时/h	0.5	1	2	3	6	12	24
降雨量/mm	84.85	125.50	176.10	210.53	240.58	292.19	350.22

目前,南沙区排涝调度方式是暴雨前预降水位

至4.5 m,基于竖向约束的管控水位上限值为5.8 m,排涝分区最大调蓄水深为1.3 m,按照式(5)计算方法,当水面率为5%时,水位涨幅最小,即当调蓄水深为1.3 m、管控水位为5.8 m时,适宜水面率为5%。当水面率充足时,优先将管控水位控制在5.8 m以下。不同管控水位对应的适宜水面率计算结果见表4。

表3 100年一遇条件下不同水面率、不同降雨历时的调蓄水深

Tab.3 Depth of water storage for different water surface ratios and rainfall durations under 100-year return period

降雨历时/h	调蓄水深/m											
	水面率1%	水面率2%	水面率3%	水面率4%	水面率5%	水面率6%	水面率7%	水面率8%	水面率9%	水面率10%	水面率11%	水面率12%
0.5	4.96	2.48	1.65	1.24	0.99	0.83	0.71	0.62	0.55	0.50	0.45	0.41
1	7.10	3.55	2.37	1.77	1.42	1.18	1.01	0.89	0.79	0.71	0.65	0.59
2	9.40	4.70	3.13	2.35	1.88	1.57	1.34	1.18	1.04	0.94	0.85	0.78
3	10.67	5.33	3.56	2.67	2.13	1.78	1.52	1.33	1.19	1.07	0.97	0.89
6	9.79	4.89	3.26	2.45	1.96	1.63	1.40	1.22	1.09	0.98	0.89	0.82
12	7.48	3.74	2.49	1.87	1.50	1.25	1.07	0.94	0.83	0.75	0.68	0.62
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表4 不同管控水位对应的适宜水面率

Tab.4 Appropriate water surface ratio corresponding to different control water levels

管控水位/m	调蓄水深/m	适宜水面率/%
5.8	1.3	5.0
5.7	1.2	5.3
5.6	1.1	6.0
5.5	1.0	7.0
5.3	0.8	9.0

② 提升蓄水空间规模

该排涝分区现状水面率为3.63%,需要提高蓄水空间规模。除庆盛枢纽片区外,其他片区因涉及基本农田或拆迁而不具备增加调蓄水面的条件,结合庆盛枢纽片区用地方案,通过拓宽现状河涌可将排涝分区水面率提高至4.43%,但仍与适宜水面率最低目标值(5%)有差距。

对于庆盛枢纽片区,如果在现状水系基础上再新建河涌,虽然可以提高蓄水能力,但会加剧河涌水域与建设用地的冲突,并提高城市基础设施的建设成本,经分析确定采用蓝绿融合方式提高蓄涝能力。即,结合城市设计,打造中央低密度空间,规划南北向的中央绿轴。中央绿轴与河涌连通,绿地最低标高与内河涌常水位持平,采用微地形设计实现绿地蓄水,同时结合滨水空间城市设计,将四龙涌、

石牌新涌及上中围涌的滨水绿地设计为可淹没绿地,可增加调蓄容积 $27.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,将排涝分区的等效水面率提高到5.3%,管控水位5.7 m,调蓄水深1.2 m。

3.4 模型验证

利用MIKE11水动力模型,模拟评估在100年一遇24 h降雨遭遇外江5年一遇潮位工况下初步确定的水面率及管控水位的合理性。设计雨型必须同时满足市政排水和水利排涝的需要,采用《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》推荐的芝加哥雨型作为短历时降雨过程的设计雨型,采用同频率分析法推算24 h的设计暴雨雨型。模型评估的水位边界条件是常水位5.0 m(与外江平均潮位一致),雨前预降水位0.5 m,故启排水位为4.5 m,当内河涌水位高于外江潮位时停泵并开闸自排。

初始泵站规模为分区所需的最小值,即 $69.04 \text{ m}^3/\text{s}$,模拟结果显示,有6条河涌最高水位超过5.7 m,但不足5.8 m,且时间超过30 min。模拟水位超过目标管控水位的主要原因是采用“平均法”计算的泵站理论最小流量,导致规模偏低。当泵站规模调整至 $78 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,仅一条河涌最高水位超过5.7 m,达到5.74 m,时间10 min。

综上,最终确定的内涝防治策略是蓝绿融合使得等效水面率达5.3%,管控水位为5.7 m,排涝泵站规模为78 m³/s。

4 结语

平原河网区竖向高程存在先天性不足,在城市化进程中,蓄水空间缩减,产蓄不平衡导致内河涌水位壅高是致涝的主要原因。南沙区作为典型的珠三角平原河网区,其内涝防治的关键是保障适宜的水面率(蓄水空间),蓄排结合、以蓄为主,降低内河涌水位,使得竖向高程与管控水位的高差满足淹没出流状态下市政排水的需要。在建成区,受空间限制,通过新(扩)建河湖的方式难以达到适宜水面率的要求,因此蓝、绿、灰协同提升蓄涝能力是有效途径。将基于竖向约束确定内河涌管控水位及适宜水面率保障的方法应用到南沙区东涌东排涝分区的内涝防治项目实践中,在不改变用地性质的前提下,通过蓝绿融合的方式保障适宜蓄涝空间,对于平原河网区的内涝防治具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 章卫军. 城市排涝规划之我见[J]. 中国给水排水, 2014, 30(19): 107-109.
ZHANG Weijun. Opinion on urban stormwater management planning[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(19): 107-109(in Chinese).
- [2] 俞孔坚, 许涛, 李迪华, 等. 城市水系统弹性研究进展[J]. 城市规划学刊, 2015(1): 75-83.
YU Kongjian, XU Tao, LI Dihua, et al. A review: urban water resilience [J]. Urban Planning Forum, 2015(1):

75-83(in Chinese).

- [3] 徐千惠, 熊林, 朱天琳, 等. 适应我国不同自然条件类型城市的内涝治理模式研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(1): 11-27.
XU Qianhui, XIONG Lin, ZHU Tianlin, et al. Study on urban waterlogging control modes adapted to cities of different nature condition types in China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(1): 11-27(in Chinese).
- [4] 汉京超, 俞士静, 陈秀成. 沿海平原河网城市排水防涝典型问题及对策分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(4): 30-34.
HAN Jingchao, YU Shijing, CHEN Xiucheng. Analysis of typical problems and countermeasures of drainage and waterlogging prevention in coastal plain river network city [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(4): 30-34(in Chinese).
- [5] 张兆祥, 杨帆, 王大春. 淹没出流雨水管道应对内涝设计探讨[J]. 中国给水排水, 2016, 32(1): 83-85, 89.
ZHANG Zhaoxiang, YANG Fan, WANG Dachun. Discussion on design of rainwater pipe responding to local flooding at submerged discharge [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(1): 83-85, 89(in Chinese).

作者简介: 郭树河(1985-), 男, 河北张家口人, 硕士, 高级工程师, 注册公用设备工程师(给水排水), 主要从事市政规划研究及给排水设计工作。

E-mail: 421085392@qq.com

收稿日期: 2025-08-19

修回日期: 2025-09-09

(编辑: 丁彩娟)