

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230104

鄱阳湖对滨湖城市内河阻排效应及其影响因素分析

石 莎^{1,2}, 乌景秀³, 陈小娜³, 张 霖¹

(1. 南昌工程学院, 江西 南昌 330099; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 225129;
3. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 江苏 南京 225129)

摘要: 为探究鄱阳湖阻排效应造成的滨湖城市内涝风险, 采用“调蓄模型”阐明鄱阳湖对昌南城区内河外排的阻排效应, 定义量化阻排效应的阻排系数, 探明了影响阻排系数的主控要素并量化阻排系数与主控要素之间的响应关系。结果表明, 影响阻排系数的主控因素包括降雨强度、外江水位、排涝能力和调蓄空间等。降雨强度与阻排系数之间存在明显二次曲线关系, 雨强 11.67 mm/h 为曲线拐点; 阻排系数与外江水位呈四象限风险图关系; 排涝能力提升比例增加, 阻排系数降低频率增大, 雨强超过 11.67 mm/h 后, 昌南城区通过提升排涝能力降低阻排系数的效果明显降低; 调蓄空间增加, 相同雨强的阻排系数逐渐减小, 雨强超过 15.83 mm/h 后, 青山湖排涝片通过提升调蓄空间降低阻排系数效果明显降低。通过适当提升排涝能力、降低不透水地面比例、增加可调蓄空间可有效降低鄱阳湖阻排效应造成的滨湖城市内涝风险, 但应对极端暴雨事件的能力仍然有限。

关键词: 滨湖城市; 内涝风险; 阻排效应; 阻排系数

中图分类号: TV125 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)11-0018-04

1 概况

高速城镇化和极端天气频发使城市内涝风险加剧^[1]。滨湖城市内河网出流受湖泊高水位顶托, 其内涝的频率和程度更甚^[2]。定义湖泊高水位对滨湖城市内河网出流顶托作用为阻排效应。阐明阻排效应引发内涝的机理, 明确其影响因素及量化关系对缓解滨湖城市内涝风险具有重要意义。鄱阳湖位于长江中下游, 纳五河、通长江; 南昌市位于鄱阳湖滨, 内河水系丰富。昌南城区位于赣江下游右岸, 地势平坦、低洼, 地面高程 16~24 m, 地面平均纵坡 1‰~3‰, 面积约 177 km²。南昌市内河网主要通过赣江和抚河与鄱阳湖连通, 其雨季与长江流域中下游及鄱阳湖流域的洪水期重合^[3], 受鄱阳湖高水位顶托, 内涝风险居高不下, 是我国 31 座重点防洪城市之一。目前, 关于鄱阳湖与长江水量交换效应及其量化研究居

多^[4-5]; 鄱阳湖水位对赣江南昌段水位影响明显^[6], 鄱阳湖高水位显著影响南昌市排涝效果^[7]。而关于鄱阳湖对南昌市内河网出流的阻排效应机理及其影响因素和量化的研究尚不多见。为此, 本文以南昌市昌南城区为例, 采用“调蓄模型”阐明鄱阳湖对昌南城区内河外排的阻排效应机理; 定义阻排系数量化阻排效应, 探明阻排系数影响因素; 采用实测数据和序列数据分析各影响因素与阻排系数的量化关系, 发现适当提升排涝能力、降低不透水地面比例、增加可调蓄空间可降低滨湖城市内涝风险, 但应对暴雨洪水能力有限。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源

外洲站位于昌南城区内河网外排赣江偏上游, 其水位变化与鄱阳湖水位变化趋势相同^[6]。因此, 选择外洲站水位代表赣江水位, 研究鄱阳湖

收稿日期: 2023-01-30, **修回日期:** 2023-02-28

基金项目: 江西省教育厅自然科学基金青年项目(GJJ180953); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金面上项目(2018492011); 江西省科技厅自然科学基金重点面上项目(20192ACBL20041)

作者简介: 石莎(1984-), 女, 博士、讲师, 研究方向为城市水力学及城市水安全评价与保护, E-mail: shisha2016@nit.edu.cn

对昌南城区排涝的阻排效应。昌南城区实测降雨数据见表 1,电排站排涝能力见表 2。数据来源于水文站、《南昌市水资源公报》等。

表 1 昌南排涝区降雨实测数据

Tab. 1 Measured data of rainfall in Changnan District

日期	降雨量 <i>P/mm</i>	降雨 历时/h	降雨强度 <i>R</i> /(mm · h ⁻¹)	降水强 度等级
2003-06-24	309.0	24	12.90	特大暴雨
2003-06-25	278.7	24	11.60	大暴雨
2005-11-08	224.7	24	9.40	大暴雨
2009-04-21	101.0	4	25.25	特大暴雨
2010-04-19	171.0	24	7.13	大暴雨
2010-05-13	58.1	3	17.60	特大暴雨
2011-06-06	140.4	6	23.80	特大暴雨
2011-06-15	100.0	3	33.33	特大暴雨
2012-04-24	110.3	4	26.90	特大暴雨
2012-05-12	180.0	12	15.00	特大暴雨
2012-08-22	165.0	8	20.63	特大暴雨
2013-05-14	50.0	6	8.33	大暴雨
2014-05-09	50.0	12	4.17	暴雨
2014-07-24	50.0	6	8.33	大暴雨
2015-04-07	50.0	12	4.17	暴雨
2015-06-22	47.1	7	6.73	大暴雨

表 2 昌南排涝区电排站规模

Tab. 2 Scale of drainage station of Changnan District

电排站	排水流量 <i>Q_{zi}</i> /(m ³ · s ⁻¹)	电排站	排水流量 <i>Q_{zi}</i> /(m ³ · s ⁻¹)
八月湖	16.54	青山湖	77.60
西河滩	1.70	吴公庙	30.20
朝阳 1 号	15.40	鱼尾	40.90
朝阳 2 号	7.50	南塘湖	22.60
新洲	42.90		

2.2 滨湖城市河网调蓄模型

设控制闸的调度最高水位为 ∇_z ,外江水位为 Z_w 。当 $Z_w \leq \nabla_z$ 时,闸门开放,河道外排为自排。当 $Z_w > \nabla_z$ 时,闸门关闭,则改为泵排。总排水能力为:

$$Q_{cz} = \sum_i^n Q_{zi} \quad (1)$$

$$Q_{cb} = \sum_j^m Q_{bj} \quad (2)$$

式中, Q_{cz} 、 Q_{cb} 分别为水闸、水泵的总排水能力; i 、 j 分别为闸、泵编号; n 、 m 分别为环防洪保护区闸、泵总数; Q_{zi} 、 Q_{bj} 分别为第 i 、 j 个水闸、水泵的排水能力, m^3/s 。

如图 1 所示,将滨湖城市防洪保护区视为“调蓄模型”,研究区总入流 Q_r 为模型的输入条件,内河出流 Q_c 为模型的输出条件。其中,内河出流 Q_c 反映环滨湖城市保护区闸泵调控能力。则存在一个函数关系 $f(x)$,使得 $f(Q_r) = \Delta V$, ΔV 为无法外排而在滨湖城市防洪保护区内蓄积的水量。整理滨湖城市防洪保护区某一场暴雨的入流 Q_r 、出流 Q_c 数据,根据内河网水量平衡原理,构

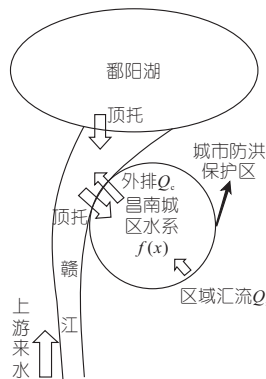


图 1 昌南城区水系与鄱阳湖关系示意图

Fig. 1 Diagram of relationship of river network in Changnan District with Poyang Lake

建研究区域“调蓄模型”的函数关系:

$$\begin{cases} f(Q_r) = \Delta V \\ \Delta V = 3\,600(Q_r - Q_c)T \end{cases} \quad (3)$$

式中, T 为一场降雨历时, h 。

当 $\Delta V \geq 0$ 时,防洪保护区内水量开始增加。

采用降雨—径流系数进行径流量换算,忽略防洪保护区 T 时段的水面蒸发量,则有滨湖城市防洪保护区 T 时段内产生的流量 Q_r 为:

$$Q_r = \alpha_j FR / (3.6 \times 10^6) \quad (4)$$

式中, α_j 为径流系数; F 为降雨汇流面积; R 为 T 时段内降雨强度。

根据亚热带湿润季风气候区,降雨径流的主要方式为蓄满产流,陈兴^[8]将江西省分为赣江水系、抚河水系、信江水系、饶河水系、修水水系和鄱阳湖湖滨地区等六个区域,各区域径流系数为特定取值范围,昌南城区河网既属于赣江水系(0.72~0.92),由南向北,由东向西逐渐增加,又具有鄱阳湖湖区(0.89~0.97)特征,综合二者取值确定为 0.92。

2.3 阻排系数及计算方法

阻排系数 β_z 为 T 时段内滨湖城市防洪保护区内总汇流无法调控量的占比。即:

$$\beta_z = \frac{Q_r - Q_c - V_T / (3\,600T)}{Q_r} \quad (5)$$

式中, V_T 为防洪保护区河网 T 时段内可调蓄空间;当 $\Delta V \geq V_T$ 时,将发生内涝;当 $Q_r \leq Q_c$ 、 $\beta_z \leq 0$ 时,无阻排效应;当 $Q_r > Q_c$ 、 $\beta_z > 0$ 时,阻排效应开始显现。

阻排系数 β_z 是一个关于多个影响因素的复杂函数。

将式(4)代入式(5),整理可得滨湖城市防洪保护区降雨历时 T 内的阻排系数为:

$$\beta_z = \frac{\alpha_j FR - 3.6 \times 10^6 Q_c - 1.0 \times 10^3 V_T / T}{\alpha_j FR} \quad (6)$$

3 结果与分析

3.1 降雨强度对阻排系数影响

计算表 1 中各场降雨的汇流量 Q_r 和表 2 中的综合泵排能力 Q_c ，采用“调蓄模型”计算 ΔV ， V_T 取 0。图 2 为昌南城区降雨强度与阻排系数关系。由图 2 可看出，雨强 R 与阻排系数 β_z 呈二次曲线关系，且阻排系数随雨强增加而增加。

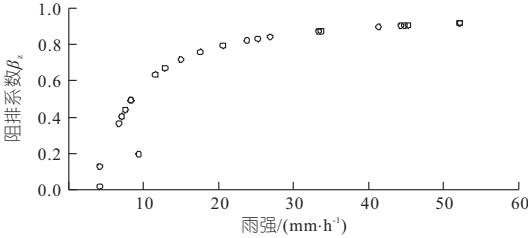


图 2 昌南城区降雨强度与阻排系数关系

Fig. 2 Relationship between rainfall intensity and the IBD in Changnan District

计算 1、6、12、24、36、48、56、72 h 情况下雨强 R (水利部门规定) 对应的昌南城区汇流量 Q_r 及最大泵排能力为出流量 Q_c ， V_T 取 0，对应阻排系数 β_z 见图 3。由图 3 可看出，当雨强 $R \geq 4$ mm/h 时，阻排效应呈现；随雨强 R 的增加，阻排系数 β_z 持续增大。当雨强 R 达到特大暴雨下限值，阻排系数 $\beta_z \geq 0.68$ ，为该区风险阻排系数；当降雨强度 R 达到大暴雨下限值，阻排系数 $\beta_z \geq 0.35$ 。结合图 2 可知，阻排系数随降雨强度增加而增大的趋势在降雨强度 11.67 mm/h 附近出现转折，总体先快后慢。

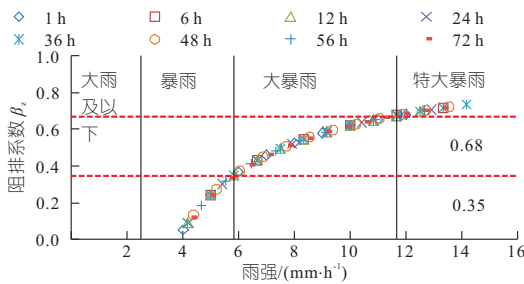


图 3 降雨强度与阻排系数关系

Fig. 3 Relationship between rainfall intensity and the IBD

3.2 外江水位对阻排系数影响

采用昌南城区内河网控制水位 18.7 m 和研究区域风险阻排系数 0.68 将外河水位—阻排系数关系图分为四个区间，成为四象限风险图，见图 4。由图 4 可看出，象限 1 表示低水位低阻排效应，自排、雨强小、低风险；象限 2 表示高水位低阻排效应，泵排、雨强小、中低风险；象限 3 表示高水位高阻排效应，泵排、雨强大、高风险；象限 4 表示低水位高阻排效应，自排、雨强大、中高风险。外洲站 2004、2010 年日均水位高于 18.7 m，比例为

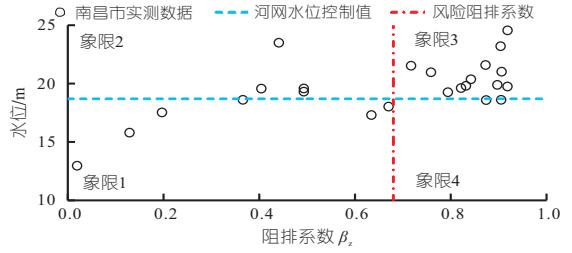


图 4 昌南城区阻排系数与水位关系

Fig. 4 Relationship between the IBD and water level in Changnan District

35%，4~9 月占比为全年的 87.56%；南昌市雨季一般 4 月初开始到 7 月结束^[9]，与赣江高水位大比例重合，居于象限 3 的降雨几率最高，对应的洪涝风险最大。

3.3 排涝能力对阻排系数影响

假设昌南城区出流量 Q_c 每 10 个百分点逐步提升至 50%， V_T 取 0；采用 12 h 雨强 R (水利部门规定) 计算昌南城区汇流量 Q_r ；对应阻排系数 β_z 见图 5。由图 5 可看出，相同雨强阻排系数 β_z 随排涝能力提升逐渐下降；大暴雨的雨强临界值处阻排系数 β_z 下降趋势明显；雨强超过 11.7 mm/h 后下降速度减缓；排涝能力提升 50%，雨强 $R \geq 6$ mm/h 时阻排效应才显现，较当前排涝能力阻排效应显现对应雨强增加 50%；排涝能力提升 50%，遭遇大暴雨阻排系数仅 0.03，遭遇特大暴雨阻排系数由原来的 0.68 降低为 0.51，外江水位不变情况下洪涝风险从高风险降为中低风险。

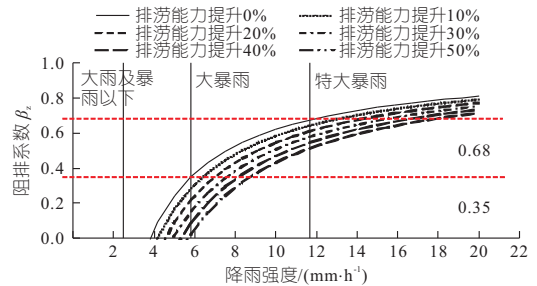


图 5 排涝能力与阻排系数关系

Fig. 5 Relationship between drainage capacity and the IBD

3.4 排涝区调蓄空间对阻排系数影响

以青山湖排涝片为例^[10]，采用 12 h 雨强 R (水利部门规定) 计算汇流量 Q_r ；根据青山湖容积 ($280 \times 10^4 \text{ m}^3$) 设置调蓄空间 $0、50 \times 10^4、100 \times 10^4、200 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，计算对应阻排系数 β_z 。计算雨强为 10、11.67、15、20 mm/h 和调蓄空间为 $0、1 \times 10^4、5 \times 10^4、10 \times 10^4、50 \times 10^4、100 \times 10^4、150 \times 10^4、200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的阻排系数 β_z ，见图 6。由图 6 可看出，该区特大暴雨对应的无调蓄空间阻排系数 $\beta_z = 0.50$ ，小于昌南城区平均值 0.68，说明该区遭遇特大暴雨洪涝风险低于昌南城区平

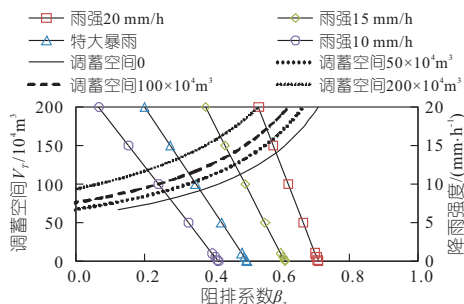


图 6 调蓄空间与阻排系数关系

Fig. 6 Relationship between storage space and the IBD

均水平。随着调蓄空间的增加,相同雨强的阻排系数逐渐减小,如调蓄空间每增加 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$,特大暴雨对应的阻排系数相应降低 0.07;随着雨强的增加,调蓄空间对阻排系数影响率降低,如调蓄空间每增加 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$,雨强 10、11.67、15、20 mm/h 阻排系数分别降低 0.09、0.07、0.06、0.04,雨强高于 15.83 mm/h 后,每增加 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 阻排系数降低值低于 0.05。

4 结论

a. 定义阻排系数量化阻排效应,构建阻排系数与影响因素间的函数关系。

b. 提出象限分区法分析排涝风险程度,采用内河网控制水位和研究区风险阻排系数分别为纵、横分区坐标,绘制四象限风险图表征不同风险程度。当前排涝能力条件下,外洲站水位高于 18.7 m 且阻排系数大于 0.68 时,昌南城区河网处于洪涝高风险。

c. 昌南城区排涝能力提升 50%,遭遇大暴雨和特大暴雨阻排系数分别由 0.35、0.68 降低为 0.03、0.51,雨强超过 11.67 mm/h 后,排涝能力提升时降低阻排系数和洪涝风险的效率大大降低。

d. 青山湖排涝片增加 50×10^4 、 100×10^4 、 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 调蓄空间,雨强 11.7 mm/h 对应的阻排系数分别为 0.50、0.42、0.35、0.20,调蓄空间增加对降低阻排系数和洪涝风险效果明显,但当雨强超过 15.83 mm/h 时,调蓄空间降低阻排系数和洪涝风险的效率明显降低。

e. 提升泵排能力、绿化面积和内网调蓄空间能有效降低滨湖城市洪涝风险,但对极端暴雨事件引发的洪涝风险作用效果仍然有限。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 石莎,陶雪婷,喻凯. 滨湖城市水安全风险评估——以南昌市为例[J]. 南昌工程学院学报, 2021, 40(4): 8-15.
- [3] 陆瑜超. 南昌市城市排水防涝综合规划的若干问题研究[D]. 南昌:南昌大学, 2017
- [4] 邴建平,邓鹏鑫,吕孙云,等. 鄱阳湖与长江干流水量交换效应及驱动因素分析[J]. 中国科学:技术科学, 2017, 47(8): 856-870.
- [5] 邴建平. 长江—鄱阳湖江湖关系演变趋势与调控效应研究[D]. 武汉:武汉大学, 2018
- [6] 唐立模,叶志恒,杨家启,等. 赣江南昌河段水位降低现状及影响因素[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(6): 13-18, 85.
- [7] 邓金运,刘聪聪,高浩然,等. 排水体系建设对城市洪涝灾害的影响[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(3): 51-56, 69.
- [8] 陈兴. 浅析江西省天然流域设计暴雨量与径流系数的关系[J]. 江西水利科技, 2019, 45(1): 12-17.
- [9] 傅春,陈先明. 城市化对南昌市降雨变化的影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(4): 705-710.
- [10] 唐明,廖颖娟,占安安. “幸福河湖”背景下城市内涝防治系统的运行调度优化——以江西南昌市青山湖排涝片为例[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(3): 20-25.

Analysis of Blocking Drainage Effect on Poyang Lake to Internal River of Lakeshore Urban and Its Influencing Factors

SHI Sha^{1,2}, WU Jing-xiu³, CHEN Xiao-na³, ZHANG Lin¹

(1. Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 225129, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 225129, China)

Abstract: In order to study the water logging risk in lakeshore urban caused by the blocking drainage effect (BDE) of Poyang Lake, the "regulation and storage model" was used to elucidate the BDE of Poyang Lake on inner river drainage in Changnan District and to explore the impact of Poyang Lake on waterlogging risk of lakeshore urban. By defining the Index of Blocking Drainage (IBD) which quantifies the BDE, the main controlling factors that affect the IBD was explored and the response relationship between them was quantified. The results show that the main controlling factors affecting the IBD include rainfall intensity, water level of outer river, drainage capacity and storage space. There is an obvious quadric curve relationship between rainfall intensity and the IBD, and 11.67 mm/h is the inflection point of the curve. There is a four-quadrant risk diagram relationship between the IBD and the water level of outer river. The decrease frequency of the IBD increases with the increase of drainage capacity. The effect of reducing the IBD by improving the drainage capacity of Changnan District is obviously reduced when the rainfall intensity exceeds 11.67 mm/h. The IBD of the same rain intensity decreases gradually with the increase of storage space. The effect of reducing the IBD of Qingshanhu District by increasing the storage space is obviously reduced when the rainfall intensity exceeds 15.83 mm/h. The water logging risk in lakeshore urban caused by the DBE of Poyang Lake can be effectively reduced by appropriately improving the drainage capacity, reducing the proportion of impervious ground and increasing the adjustable storage space, but the ability to deal with extreme rainstorm events remains limited.

Key words: lakeshore urban; water logging risk; block drainage effect; the index of block drainage