DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2025.05.07

城市化地区蓄涝水面率的快速量化方法与参数敏感性分析——以广州市中心城区为例

麦叶鹏[1], 程 菲[1], 解河海[2,3], 黄国如[4,5,6], 马学良[1], 赵晓莺[7,8]

(1. 海南大学 热带农林学院, 海南 儋州 571737; 2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 3. 水利部粤港澳大湾区水安全保障重点实验室, 广东 广州 510611; 4. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641; 5. 华南理工大学 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室, 广东 广州 510640; 6. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心, 广东 广州 510641; 7. 清华大学 建筑学院, 北京 100084; 8. 西南交通大学 建筑学院, 四川 成都 611756)

摘 要: 随着城市内涝问题日益突出,快速量化蓄涝水面率已成为提升城市雨洪管理效率的关键环节之一。基于水量平衡方程与暴雨积水量计算理论,建立蓄涝水面率与暴雨强度、陆域综合径流系数、流域集流时长及调蓄水深等关键参数的函数关系,从而通过解析公式替代传统迭代算法来快速量化蓄涝水面率。以广州市中心城区为例,分析不同研究区域面积、降雨重现期、调蓄水深及降雨历时对蓄涝水面率的影响。结果表明:蓄涝水面率与暴雨强度、陆域综合径流系数、流域集流时长呈正相关,与调蓄水深呈负相关,蓄涝水面率随降雨重现期与降雨历时增加而增大,随研究区域面积扩大而减小;在调蓄水深小于 0.7 m 时,蓄涝水面率会随着调蓄水深的增大而显著下降;Sobol 全局敏感性分析显示,调蓄水深为最关键参数,降雨重现期次之,研究区域面积与降雨历时的敏感性较低。该方法为城市内涝防治及海绵城市规划提供了蓄涝水面率的快速核算方案。

关键词: 雨洪控制;蓄涝水面率;快速量化;敏感性分析;城市化地区

中图分类号:TU992 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2025)05-0057-08

Rapid quantification method and parameter sensitivity analysis of waterlogging water surface ratio in urbanized areas: A case study of Guangzhou downtown area

MAI Yepeng[1], **CHENG Fei**[1], **XIE Hehai**[2,3], **HUANG Guoru**[4,5,6], **MA Xueliang**[1], **ZHAO Xiaoying**[7,8]

(1. *School of Tropical Agriculture and Forestry*, *Hainan University*, *Danzhou* 571737, *China*; 2. *Pearl River Water Resources Research Institute*, *Guangzhou* 510611, *China*; 3. *Key Laboratory of Water Security Guarantee in Guangdong - Hong Kong - Macao Greater Bay Area of Ministry of Water Resources*, *Guangzhou* 510611, *China*; 4. *School of Civil Engineering and Transportation*, *South China University of Technology*, *Guangzhou* 510641, *China*; 5. *State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science*, *South China University of Technology*, *Guangzhou* 510640, *China*; 6. *Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and Greenization for Water Conservancy Project*, *Guangzhou* 510641, *China*; 7. *School of Architecture*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*; 8. *School of Architecture*, *Southwest Jiaotong University*, *Chengdu* 611756, *China*)

Abstract: As the urban waterlogging issue grows increasingly prominent, rapid quantification of the water surface ratio of waterlogging has become an integral part of improving the efficiency of urban stormwater management. Based on the water balance equation and the theory of stormwater volume calculation, this study derives an analytical formula that links the water surface ratio of waterlogging to the key parameters of rainfall intensity, land area composite runoff coefficient, catchment concentration time, and storage depth. By substituting the proposed closed-form solution for the conventional iterative algorithm, the water surface ratio of waterlogging can be quantified rapidly and explicitly. Taking the central urban area of

收稿日期:2025-05-27; **修回日期**:2025-08-15

基金项目:广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515010754);海南大学科研启动经费项目(KYQD(ZR)23131);国家自然科学基金青年基金项目(52408076)

作者简介:麦叶鹏(1993—),男,海南乐东人,博士,讲师,主要研究方向为海绵城市建设、景观水文与水环境、城乡雨洪管理与利用。

通讯作者:赵晓莺(1994—),女,山东烟台人,博士,助理研究员,主要研究方向为城市雨洪管理与蓝绿基础设施。

Guangzhou as a case study, this paper systematically evaluates how the water surface ratio of waterlogging responds to variations in the study area, storage depths, rainfall durations, and rainfall return periods. The results show that the water surface ratio of waterlogging is positively correlated with the rainstorm intensity, land area composite runoff coefficient, and catchment concentration time; but negatively correlated with the storage water depth. The water surface ratio of waterlogging increases with the increase of the rainfall return period and rainfall duration, while decreases with the increase of the study area. When the storage depth is less than 0.7 m, the water surface ratio of waterlogging decreases significantly with the increase of storage depth. Sobol global sensitivity analysis further indicates that the storage depth is the dominant parameter, followed by the rainfall return period; whereas the study area and rainfall duration exhibit only minor influences. This method provides an expeditious accounting program to quantify water surface ratio of waterlogging for urban flood control and sponge city planning.

Key words: stormwater flood control; water surface ratio of waterlogging; rapid quantification; sensitivity analysis; urbanized area

1 研究背景

随着全球城市化进程的加速和气候变化影响的加剧,城市内涝灾害已逐渐成为制约城市可持续发展的一个重大挑战[1]。在此背景下,蓄涝水面率(即涝区内滞蓄涝水区域的水面面积占涝区总面积的百分比)作为衔接微观设施效能与宏观排涝系统的关键指标,其科学量化对城市内涝防治具有决定性意义[2]。

近年来,相关研究在城市排涝与雨水调蓄领域已形成较成熟体系,如:Wang 等[3]对机场生态草坪调蓄系统的雨水调控能力进行了研究;Fu 等[4]验证了雨水储存设施对小地块径流控制的有效性;Khan 等[5]评估了多类蓄水设施的雨水收集潜力;Li 等[6]结合进化算法与雨洪模型对排水管网设计进行了优化;Diniz 等[7]通过一维和二维建模评估了高密度城区低影响开发(low impact development, LID)措施的效能,证实组合方案对径流控制具有增效作用;Wang 等[8]基于熵值法构建评价体系并结合 MIKE 模型模拟,验证了“蓄排结合”模式在不同降雨重现期下对内涝的有效缓解作用。值得注意的是,水面率作为雨水的关键调控参数,其概念最早由武汉大学郭元裕等[9]提出,但围绕该参数的系统研究在国际学界仍显不足。

国外研究多聚焦于工程性措施,而国内研究则呈现多学科融合趋势,早期研究聚焦南方圩区、灌区小尺度防洪除涝问题[10],近年来则拓展至水利、生态、城市规划及地理信息系统(GIS)领域。典型进展包括:姜欣彤等[11]基于 RS 和 GIS 技术解析了粤港澳大湾区水面率演变规律;刘璐铭等[12]利用城市水体指数(urban water index, *UWI*)与遥感数据实现了水面率动态提取;夏成亮等[13]基于水域动态监测解析了水面率变化影响因素及其与城市内涝的定量关联;柯文杰[14]通过多目标优化构建了城市水面率模型。

尽管国内外研究成果显著,但现有方法普遍依赖于复杂的参数和计算过程,导致效率与精度难以兼顾,未能有效解决蓄涝水面率量化本身面临的核心难题。针对上述问题,本研究旨在提出一种高效、精准的蓄涝水面率量化新方法,即基于水量平衡原理和暴雨积水量计算理论,直接推导并构建一个包含 4 个核心物理参数(研究区域面积 F、降雨重现期 P、调蓄水深 h 和降雨历时 t)的函数关系式,并结合 Sobol 全局敏感性分析方法,系统地量化公式中每个参数及其相互作用对蓄涝水面率计算结果不确定性的贡献度[15]。通过上述函数关系式的构建与参数敏感性分析的组合应用,以期能有效克服传统水面率量化方法参数多、计算复杂、效率与精度难兼顾的局限,实现水面率的快速、精准计算。研究结果可为城市化地区防洪排涝规划提供高效、可靠且理论基础坚实的蓄涝水面率量化技术支撑。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

广州市中心城区范围来源于《广州市国土空间总体规划(2021—2035 年)》,其包括越秀区、海珠区、荔湾区和天河区全域,以及白云区北二环高速公路以南地区和黄埔区除九佛街道、龙湖街道、新龙镇以外地区,面积约为 933 km^2,如图 1 所示。研究区内地形北高南低,河网密布,主要河流包括珠江及其支流(如流溪河)。该区域属于南亚热带季风气候,年均降水量约为 1 800 mm,雨季集中于 4—9 月。

城市化进程的加速导致研究区不透水地表面积增加,叠加极端降雨频发,内涝风险加剧。现行的合流制排水系统受限于管网覆盖率不足及设计标准滞后,难以应对高重现期降雨[16]。

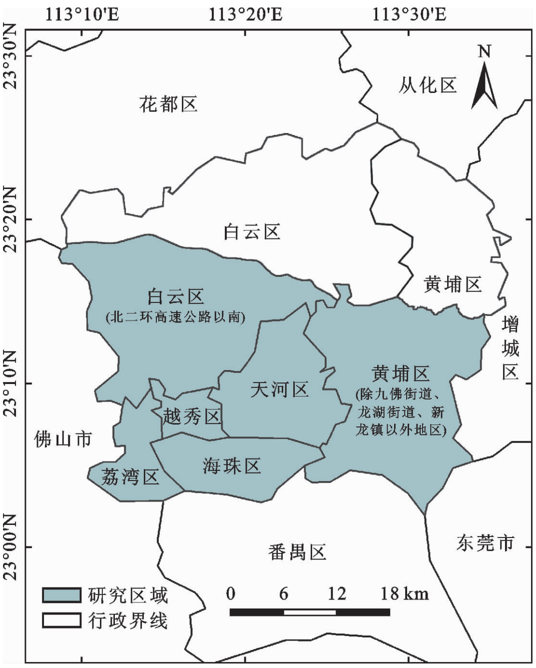

图 1　研究区范围及地理位置

2.2　数据来源

本研究的关键支撑数据包括气象水文数据、地理空间数据、设计规范与参数以及研究参数范围。气象水文数据方面,广州市中心城区短历时暴雨强度公式引自《广州市中心城区暴雨公式及计算图表》(2011 年)[17],长历时累积降雨量公式则引自《广州市长历时暴雨公式及计算图表》(征求意见稿,2022 年)[18],后者基于广州国家气象观测站连续 20 a(2001—2020 年)自记雨量记录,采用年最大值法进行编制。地理空间数据主要来源于广州市国土空间总体规划(2021—2035 年)与基础地理数据,据此确定了研究区域范围及地形水系信息。设计规范与参数遵循《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),设定了地面集水时长(t_1 = 5 min)、陆域综合径流系数(ψ = 0.7)等关键参数。在敏感性分析中,降雨重现期(P = 10 ~ 100 a)、调蓄水深(h = 0.4 ~ 1.2 m)、降雨历时(t = 3 ~ 24 h)、研究区域面积(F = 10 000 ~ 100 000 m^2)等参数的范围是依据工程实践、文献调研及区域特征设定的。

2.3　研究方法

2.3.1　基本原理与水量平衡方程　本研究基于水量平衡方程,结合城市暴雨积水量计算理论,推导蓄涝水面率与相关参数之间的关系。忽略蒸散发和渗漏量,可得到关系式(1) ~ (3)。

$$V_{蓄} = V_{产} - V_{排} \tag{1}$$

$$V_{产} = V_{产,陆} + V_{产,水} = \psi H_t F(1 - \beta) + H_t F\beta \tag{2}$$

$$V_{蓄} = F\beta h \tag{3}$$

式中:$V_{蓄}$ 为研究区域的蓄涝量,m^3;$V_{产}$ 为在设计暴雨条件下产生的总产流量,包括陆域产流量 $V_{产,陆}$ 和水域产流量 $V_{产,水}$,m^3;$V_{排}$ 为研究区域的排涝量,m^3;H_t 为设计标准和降雨历时下的设计暴雨量,m;F 为研究区域面积,m^2;ψ 为研究区域陆域综合径流系数,水域的径流系数为 1;β 为蓄涝水面率,$\beta \in (0, 1)$;h 为蓄涝水体调蓄水深,m。

本研究关注的是在设计暴雨条件下(特定降雨重现期、特定降雨历时),为满足区域水量平衡所需的设计蓄涝水面率。公式(1) ~ (3) 描述的是该设计暴雨达到其设计状态时的水量平衡关系。本研究的目标是求解在此设计状态下,满足公式(1) 所需的、固定的设计蓄涝水面率,这是一个静态的设计参数,用于指导区域规划和设施规模设定,而非模拟其在整个降雨过程中的动态变化。

联立公式(1) ~ (3),可得关系式为

$$F\beta h = \psi H_t F(1 - \beta) + H_t F\beta - V_{排} \tag{4}$$

进而求得蓄涝水面率与设计暴雨量、研究区域面积、研究区域陆域综合径流系数、蓄涝水体可调水深等因素之间的关系为

$$\beta = \frac{H_t F\psi - V_{排}}{Fh - H_t F(1 - \psi)} \tag{5}$$

因此,当整个研究区域无向区域外进行排涝即 $V_{排}$ = 0 时,公式(5) 可进一步简化为:

$$\beta = \frac{H_t \psi}{h - H_t(1 - \psi)} \tag{6}$$

2.3.2　暴雨积水量与排涝能力计算　根据邓培德[19]关于城市不同概率暴雨积水量的计算理论,研究区域陆域的积水量 V 可按公式(7)、(8) 计算。

$$V = \alpha Q_{\max}\tau \tag{7}$$

$$\alpha = -\left(\frac{0.65}{n^{1.2}} + \frac{b}{\tau} \times \frac{0.5}{n + 0.2} + 1.10\right) \times \lg(a + 0.30) + \frac{0.215}{n^{0.15}} \tag{8}$$

式中:$Q_{\max}$ 为不同重现期的设计降雨对应的流域最大流量,m^3/min;τ 为流域集流时长,min;α 为计算系数;n 和 b 均为暴雨强度公式的参数;a 为脱过系数,$a = q_{\max}/Q_{\max}$,$q_{\max}$ 为雨水管渠设计重现期下最

大设计流量,m^3/min; Q_{max} 和 q_{max} 均可由水文推理公式计算,如公式(9)所示。

$$Q = \frac{0.06\psi qF}{10\ 000} \tag{9}$$

式中:q 为雨水管渠设计重现期下的暴雨强度,$L/(s \cdot hm^2)$。

排涝量可表达为陆域产流量扣除积水量,联合公式(2)和公式(7)可得:

$$V_{排} = V_{产,陆} - V = \psi H_t F(1-\beta) - \alpha Q_{max}\tau \tag{10}$$

2.3.3 蓄涝水面率的计算公式 联立公式(5)和(10)可求得蓄涝水面率β。

$$\beta = \frac{\alpha Q_{max}\tau}{Fh - FH_t} \tag{11}$$

联立公式(9)和(11)可将蓄涝水面率的计算进一步简化为公式(12)。

$$\beta = \frac{0.06\alpha\psi q\tau}{10\ 000(h - H_t)} \tag{12}$$

由公式(12)可知,蓄涝水面率与计算系数、研究区域陆域综合径流系数、设计暴雨强度、流域集流时长等参数成正比,与蓄涝水体调蓄水深成反比。

2.3.4 广州市中心城区蓄涝水面率计算公式 以广州市中心城区为典型研究区域,基于蓄涝水面率快速量化方法,推导区域蓄涝水面率计算公式,重点分析降雨重现期、调蓄水深、降雨历时和研究区域面积等关键参数对蓄涝水面率的影响,为城市化地区防洪排涝规划提供技术参考[20]。

根据《广州市中心城区暴雨公式及计算图表》(2011年),广州市中心城区短历时(历时小于3 h)设计暴雨强度按公式(13)、(14)计算。

$$q = \frac{3\ 618.427(1 + 0.438\ \lg P)}{(T + 11.259)^{0.750}} \tag{13}$$

$$T = t_1 + t_2 \tag{14}$$

式中:P为设计降雨重现期,a; T为雨水管渠降雨历时,min; t_1 为地面集水时长,min,对于地形较陡、建筑密度较大、雨水口分布较密地区,按经验t_1 取值一般为5 ~ 8 min; t_2 为管渠内雨水流行时长,min,本方法以研究区域面积开方估算管道长度,以《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中要求的雨水管道在满流时的最小流速0.75 m/s 作为雨水在管道中的流行速度,故t_2 按公式(15)估算。

$$t_2 = \frac{l}{v} = \frac{\sqrt{F}}{60\ v} = 0.022\sqrt{F} \tag{15}$$

联立公式(8)、(13) ~ (15),可得广州市中心城区的蓄涝水面率计算系数为:

$$\alpha = -\left(\frac{0.65}{0.75^{1.2}} + \frac{11.259}{t_1 + 0.022\sqrt{F}} \times \frac{0.5}{0.95} + 1.10\right) \times \lg(a + 0.30) + \frac{0.215}{0.75^{0.15}} \tag{16}$$

根据文献[18]广州市中心城区10 ~ 100 a一遇降雨重现期不同降雨历时t(长历时)降雨时的累积降雨量计算方法如公式(17)所示。

$$H_t = \frac{167 \times [65.063 + 17.725\ \ln(P - 5.080)]}{[t \times 60 + 33.717 + 3.976\ \ln(P - 7.842)]^{0.880 - 0.003\ \ln(P - 0.100)}} \times \frac{3\ 600t}{10^7} \tag{17}$$

式中:t 为降雨历时,h。

根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),城市建筑密集情况与区域综合径流系数的关系如表1所示。

表1 综合径流系数与城市建筑密集情况的关系

区域建筑密集情况	综合径流系数
城镇建筑密集区	0.60 ~ 0.70
城镇建筑较密集区	0.45 ~ 0.60
城镇建筑稀疏区	0.20 ~ 0.45

广州市中心城区为高密度城市化区域,因此,取地面集水时长t_1 为5 min,陆域综合径流系数ψ 为0.70。此外,在流域面积较小时,流域集流时长可假设等于雨水管渠降雨历时,即$\tau = T = t_1 + t_2$。

结合公式(12) ~ (17),可得蓄涝水面率与研究区域面积、设计降雨重现期、调蓄水深、降雨历时之间的关系式为:

$$\beta = \frac{0.042\alpha \times \frac{3\ 618.427(1 + 0.438\ \lg P)}{(5 + 0.22\sqrt{F} + 11.259)^{0.750}} \times (5 + 0.022\sqrt{F})}{10^4 h - \frac{167 \times [65.063 + 17.725\ \ln(P - 5.080)]}{[t \times 60 + 33.717 + 3.976\ \ln(P - 7.842)]^{0.880 - 0.003\ \ln(P - 0.100)}} \times 3.6t} \tag{18}$$

2.3.5 Sobol 全局敏感性分析 Sobol 法(Sobol global sensitivity analysis)是一种基于方差分解的全局敏感性分析方法,可同时量化参数的独立影响及交互效应。本研究选取研究区域面积 F、降雨重现

期 P、调蓄水深 h 和降雨历时 t 作为输入变量,以蓄涝水面率 β 为输出参数,采用一阶敏感性指数 S 衡量单一参数的直接影响,以总敏感性指数 S_T 表征参数的总效应(含交互作用)[21]。其数学表达式为公式(19)、(20)。

$$S = \frac{V_i}{V(Y)} \tag{19}$$

$$S_T = 1 - \frac{V(\sim Y)}{V(Y)} \tag{20}$$

式中:V_i 为第 i 个参数的独立作用方差;V 为代理模型输出的响应值;$V(Y)$ 为输出 Y 的总方差;$V(\sim Y)$ 为不考虑第 i 个参数对输出的影响时,输出的剩余方差。

采用蒙特卡洛(Monte Carlo)采样方法,分别采集了 100~100 000 个样本进行 Sobol 全局敏感性分析。

3　结果与分析

3.1　蓄涝水面率与各因素的关系

3.1.1　蓄涝水面率与研究区域面积的关系　图 2 给出了在 100 a 一遇降雨重现期、24 h 降雨历时和 5 a 一遇雨水管渠设计重现期时,不同调蓄水深(h)下蓄涝水面率与研究区域面积之间的关系。通过对比分析发现,研究区域面积与蓄涝水面率之间的负相关关系在不同尺度下均成立,这是因为随着研究区域面积的增加,按照假定公式计算出的流域集流时长也随之增加,而流域最大流量增加速率随着面积增大而减小。当研究区域面积为 1 km² 时,蓄涝水面率随研究区域面积增大而下降的趋势最为显著。因此,选取该面积作为基准情景进行规律展示,旨在更清晰地揭示各参数间的相对影响关系。

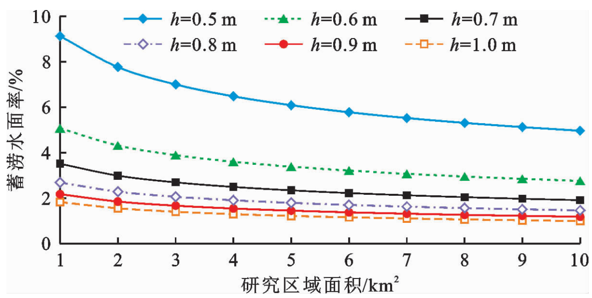

图 2　不同调蓄水深下蓄涝水面率与研究区域面积的关系

3.1.2　蓄涝水面率与降雨重现期的关系　假定研究区域面积为 1 km²,降雨历时为 24 h,雨水管渠设计重现期为 5 a 一遇,在此条件下,图 3 展示了不同调蓄水深(h)下蓄涝水面率与降雨重现期之间的关系。图 3 显示,蓄涝水面率随降雨重现期的增大而显著增大,但与调蓄水深呈非线性负相关关系。以 100 a 一遇降雨重现期为例,当调蓄水深 h 从 0.50 m 增至 0.75 m 时,蓄涝水面率从 9.1% 骤降至 3.0%,表明 h 在 0.50~0.75 m 区间内变化会显著影响蓄涝水面率的结果。

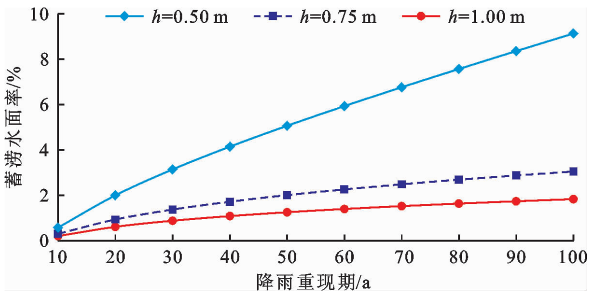

图 3　不同调蓄水深下蓄涝水面率与降雨重现期的关系

3.1.3　蓄涝水面率与调蓄水深的关系　假定研究区域面积为 1 km²,降雨历时为 24 h,雨水管渠设计重现期为 5 a 一遇,在此条件下,图 4 展示了不同降雨重现期下蓄涝水面率与调蓄水深的关系。由图 4 可知,在调蓄水深小于 0.7 m 时,蓄涝水面率会随着调蓄水深的增大而显著减小;调蓄水深大于 0.9 m 之后,蓄涝水面率减小幅度很小。当研究区域面积扩大至 5 km² 时,也呈现出上述趋势。这表明蓄涝水面率与调蓄水深的关系在研究尺度变化时具有一定的稳定性。由于不同城市的不透水率、管网标准及地形坡度存在差异,因此调蓄水深的最优区间需要根据这些因素综合调整。

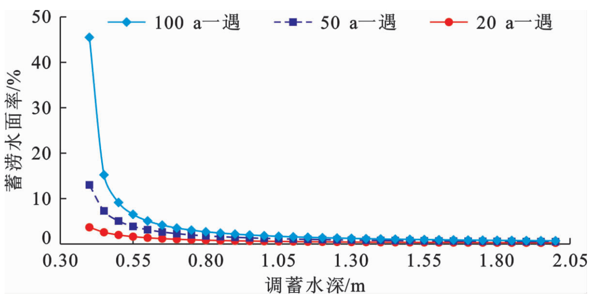

图 4　不同降雨重现期下蓄涝水面率与调蓄水深的关系

3.1.4　蓄涝水面率与降雨历时的关系　假定研究区域面积为 1 km²,图 5 展示了在 100 a 一遇降雨重现期和 5 a 一遇雨水管渠设计重现期时,不同调蓄水深下蓄涝水面率与降雨历时的关系。由图 5 可以看出,调蓄水深为 0.4 m 时,蓄涝水面率随着降雨历时的增大而增加的幅度明显大于其他调蓄水深。降雨历时越长,则所需蓄涝水面率越大,但是当调蓄水深大于 0.6 m 时,蓄涝水面率随着降雨历时变化的幅度很小,因此,在长历时降雨条件下,适当增加调

蓄水深可以有效降低对蓄涝水面率的需求。此外，当研究区域面积增加至 5 km^2 时，上述蓄涝水面率随降雨历时的变化趋势不变，这表明，即使在更大范围的城市化区域内，这一规律仍然适用。因此，在大面积城市化区域中，合理的蓄涝水面率规划可以有效降低内涝风险[22]。

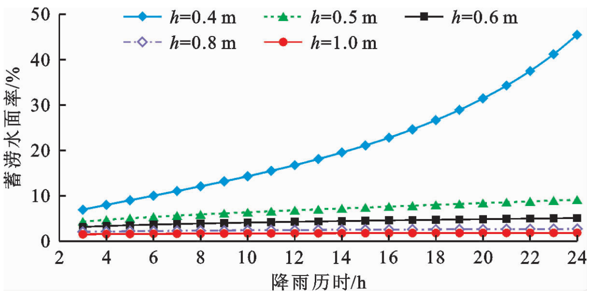

图 5 不同调蓄水深下蓄涝水面率与降雨历时的关系

3.1.5 与现行规范的对比验证 由综合数据与公式(18)所得结果可知：当降雨历时为 12 h、降雨重现期为 50 ~ 100 a、研究区域面积为 1 ~ 5 km^2 和雨水管渠设计重现期为5 a一遇时，若调蓄水深取0.6 ~ 0.7 m，公式计算所得蓄涝水面率为 5.5% ~ 10.4%；当降雨历时增至 24 h，蓄涝水面率范围增大至 6.1% ~ 11.9%。上述结果与《治涝标准》(SL 723—2016)对南方丰水地区“蓄涝水面率不宜小于 8% ~ 12%”的建议值基本吻合，从而初步验证了本研究推导公式的可靠性。

3.2 全局敏感性分析

图 6 为降雨重现期、调蓄水深、降雨历时、研究区域面积 4 个参数的一阶和总敏感性指数随样本数量的变化情况。

图 6 中的结果表明，当样本数量超过 10 000 时，各参数的敏感性指数值均趋于稳定，说明此时分析结果已达到收敛状态，样本数量的增加不再显著影响敏感性估计的准确性。基于此收敛规律，本研究最终选取 50 000 个样本进行深入分析，绘制了各参数的一阶敏感性指数和总敏感性指数柱状图以及二阶交互作用热力图，分别如图 7、8 所示。该样本规模的选择既保证了分析结果的可靠性，又兼顾了计算效率。

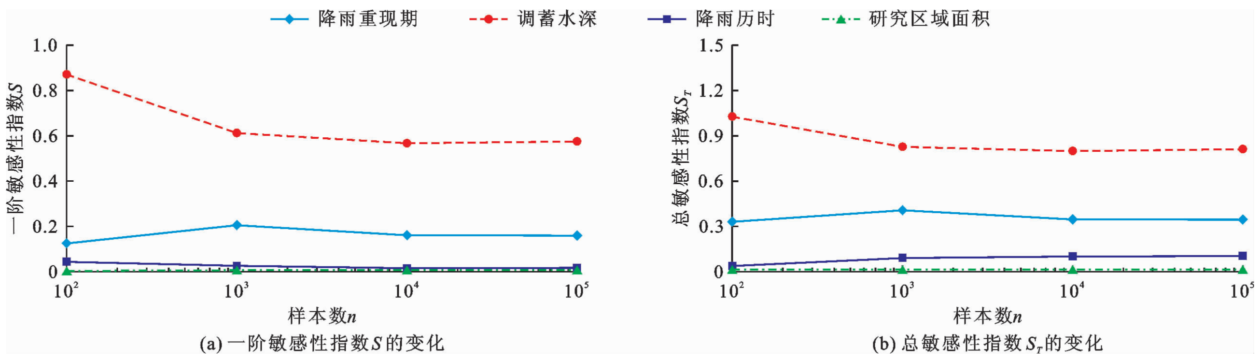

图 6 各参数的一阶和总敏感性指数随样本数的变化

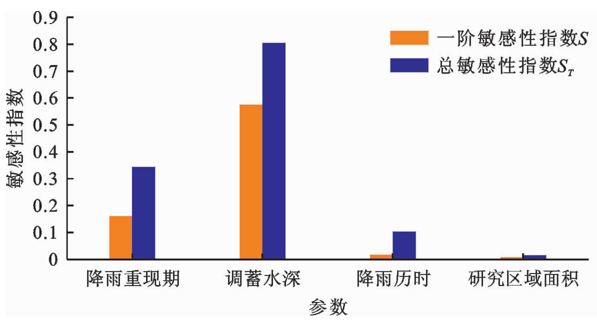

图 7 各参数一阶和总敏感性指数柱状图

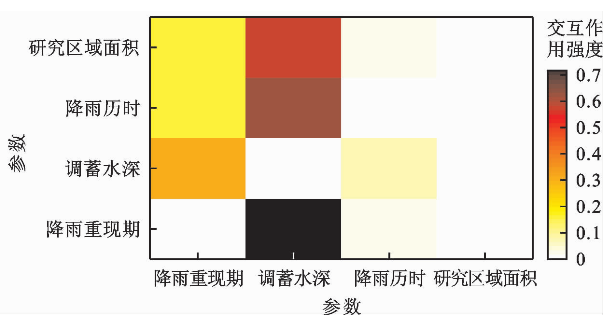

图 8 各参数二阶交互作用热力图

分析图 7 可知，调蓄水深是影响蓄涝水面率的绝对主导因素，其一阶敏感性指数和总敏感性指数均显著高于其他参数；降雨重现期的影响次之，表明其重要性仅次于调蓄水深；降雨历时和研究区域面积的敏感性指数则相对较低。除研究区域面积外，其余参数的总敏感性指数均显著高于其一阶敏感性指数，这表明参数间存在强烈的交互作用，这些交互作用对模型输出的影响不容忽视。

分析图 8 可知，各参数之间的二阶交互作用强度存在显著差异。调蓄水深与降雨重现期的交互效

应对蓄涝水面率影响最为显著,表现出强协同效应;调蓄水深与降雨历时的交互作用次之;而降雨历时与研究区域面积、降雨重现期与研究区域面积的交互作用均较弱。主要原因在于研究区域面积的增大会延长流域集流时长,进而削弱降雨因子对径流峰值的直接影响作用,且研究区域面积的空间尺度效应在模型中已由独立参数“流域集流时长”表征,导致其交互作用弱化。由此可见,研究区域面积对蓄涝水面率的影响具有相对独立性。

4 讨　论

本文研究结果表明,城市化地区蓄涝水面率与多个关键参数存在显著关联。具体而言,蓄涝水面率与计算系数、陆域综合径流系数、设计暴雨强度、流域集流时长等呈正相关,而与调蓄水深呈负相关。这些发现与现有研究结果相符,如已有研究指出,调蓄水深对蓄涝水面率有影响显著[21],且降雨重现期的增加会显著提高蓄涝水面率需求[8],这与城市应对极端降雨事件时对调蓄能力的要求相一致。

相较于需要耦合 SWMM(storm water management model)等水动力模型进行反复迭代的传统优化方法(如 Li 等[6]旨在降低洪水风险的研究路径)或侧重于分析水系结构影响的研究(如史书华等[22]),本研究提出的基于水量平衡方程和暴雨积水量计算理论的快速量化方法可直接输出蓄涝水面率阈值,从而大幅提升计算效率,更适用于规划阶段的快速方案比选。此外,本研究通过 Sobol 全局敏感性分析揭示了关键参数间的相互作用机制。分析表明,调蓄水深和降雨重现期是最关键的影响参数,且参数间的交互作用对蓄涝水面率的影响显著,特别是调蓄水深与降雨重现期的交互效应最为显著。

该快速量化方法的核心优势在于为规划阶段提供了一个高效求解设计蓄涝水面率的解析途径。然而,正如模型假设和推导过程所示,该方法基于静态的设计暴雨条件和固定的蓄涝水面率概念,这导致其在模拟实际降雨过程中的动态蓄涝需求时,尤其是应对非标准雨型或超设计标准暴雨时,会存在一定误差。未来的研究可探索将动态水面变化因素纳入快速估算框架的可能性,或明确本方法结果作为动态模型初始输入或基准值的应用方式,并且进一步结合实际城市规划案例探索更多影响蓄涝水面率的因素以及不同城市区域的适用性,以完善该方法的理论体系和应用范围。

5 结　论

本研究提出的快速量化方法计算结果与《治涝标准》(SL 723—2016)中南方丰水地区的建议值基本吻合,充分验证了研究方法与结果的可靠性,为相关实践应用提供了有力支撑。根据研究结果得出以下主要结论。

(1)蓄涝水面率与研究区域面积的负相关关系具有普适性,且在小面积(1 km^2)情景下这种关联更为显著。

(2)降雨重现期与蓄涝水面率呈显著正相关,而调蓄水深对蓄涝水面率的非线性负向影响在特定区间(0.50~0.75 m)尤为突出。

(3)调蓄水深对蓄涝水面率的影响存在明显阈值,调蓄水深在 0.7 m 以下时影响剧烈,在 0.9 m 以上时影响微弱,调蓄水深的最优区间受城市自身特性(如不透水率、管网标准、地形坡度等)的综合作用影响。

(4)降雨历时延长会使蓄涝水面率增大,且调蓄水深较低(0.4 m)时这种增幅更为明显,调蓄水深较高(大于 0.6 m)时则变化平缓,该趋势不受区域面积扩大的影响。

(5)Sobol 全局敏感性分析表明,调蓄水深是影响蓄涝水面率的最敏感参数,应作为优化和管理的重点;降雨重现期也对蓄涝水面率有显著影响,特别是在与其他参数的交互作用中;降雨历时和研究区域面积的影响相对较小,但仍需在综合考虑时予以关注。

参考文献:

[1] 俞孔坚. 构建和修复一个健康的水生态系统[J]. 景观设计学(中英文),2021,9(4):5-9 +4.

[2] 周 军,潘志祺,蔡 琪. 广州中心城区新型城市内涝应急管理模式经验探讨[J]. 中国给水排水,2023,39(16):41-45.

[3] WANG Gelan, WEN Xin, BAI Yuhao, et al. Research on ecological lawn regulation and storage system in flight area based on sponge airport[J]. Applied Sciences, 2024, 14(17): 7683.

[4] FU J C, TUNG C M. Peak flow in single-building lots in a residential areas with rainwater storage facilities in Taiwan[J]. Journal of Earth System Science, 2024, 134(1): 15.

[5] KHAN A, PARK Y, PARK J, et al. Assessment of stormwater harvesting potential: the case study of South Korea[J]. Sustainability, 2024, 16(9): 3812.

[6] LI Xuan, HOU Jingming, CHAI Jie, et al. An online data-driven evolutionary algorithm-based optimal design of urban stormwater-drainage systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2022, 148(11): 04022041.
[7] DINIZ G J D, SCUDELARI A C, DE MEDEIROS J D F. Performance of low impact development techniques in flood hazard mitigation in a closed urbanised catchment for extreme precipitation events[J]. Urban Water Journal, 2024, 21(8): 987-1002.
[8] WANG Zhe, ZHANG Zhiming, LIU Qianting, et al. Study on the coordinated regulation of storage and discharge mode in plain cities under extreme rainfall: a case study of a southern plain city[J]. Water, 2025, 17(9): 1385.
[9] 郭元裕,白宪台,雷声隆.南方圩(湖)区最优水面率研究[J].水利学报,1982(7):8-17.
[10] 周建康,朱春龙,罗国平.平原圩区设计排涝流量与水面率关系研究[J].灌溉排水学报,2004(4):64-66+70.
[11] 姜欣彤,廖小龙,全栩剑,等.基于Landsat的粤港澳大湾区水面率演变分析[J].人民珠江,2022,43(6):21-27.
[12] 刘璐铭,殷丽雪,颜军,等.一种遥感影像快速计算水面率的方法[J].遥测遥控,2023,44(4):96-101.
[13] 夏成亮,王露,许生,等.海绵城市建设背景下江苏宿迁市中心城区水面率与内涝关系研究[J].中国防汛抗旱,2024,34(8):6-10+21.
[14] 柯文杰.基于多目标优化的城镇适宜水面率研究[J].水利规划与设计,2024(8):27-32+144.
[15] 何旸,程麒铭,苏义鸿,等.基于参数全局敏感性分析的LID设施空间布局优化研究[J].水资源保护,2025,41(3):194-203.
[16] 陈燕,黄瑾,蔡丽婧.适用于初雨截流的降雨-径流定量表达方法与设计雨型[J].中国给水排水,2025,41(4):49-53.
[17] 印发《广州市中心城区暴雨公式及计算图表》的通知[R].广州:广州水务局,2011.
[18] 黄浩辉,植石群.广州市暴雨强度公式编制与设计暴雨雨型研究技术报告[R].广州:广东省气候中心,2022.
[19] 邓培德.城市暴雨的积水计算[J].给水排水,1998,24(7):6-12+3.
[20] 唐明,周涵杰,许文涛,等.蓄涝水面率选择对城市内涝治理效果的影响及分区研究[J].水利水电技术(中英文),2021,52(12):12-24.
[21] 施奇妙,徐宗学,卢兴超,等.基于局部和全局方法的SWMM模型参数敏感性分析[J/OL].水利水电技术(中英文),1-23[2025-07-22]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20241227.1138.002.html.
[22] 史书华,陈星.基于调蓄能力与水系结构关系分析的城市合理水面率研究:以常熟市为例[J].三峡大学学报(自然科学版),2020,42(2):1-6.

(上接第56页)

[16] SHIFERAW N, KIM J, SEO D. Identification of pollutant sources and evaluation of water quality improvement alternatives of a large river[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(11): 31546-31560.
[17] 张明锐,段宏伟,徐杰,等.基于层次分析法与熵权法的城市轨道交通牵引变压器健康状态评估[J].城市轨道交通研究,2025,28(1):138-143.
[18] 温达鑫.基于AHP-熵权-云模型的水利工程施工安全评价研究[J].水利科技与经济,2023,29(7):93-97.
[19] 高建强,张浩,危日光.基于熵权-TOPSIS法的风光柴储互补发电系统容量优化配置[J].动力工程学报,2025,45(2):300-306.
[20] 李德毅,孟海军,史雪梅.隶属云和隶属云发生器[J].计算机研究与发展,1995(6):15-20.
[21] 佘淑园,刘高东,靳皓琛,等.基于水质水量联合调度的岷江干流污染应急处置研究[J/OL].水电能源科学,2025(9):29-33[2025-07-16]. https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241970.
[22] 谭茜,田鑫,吴师,等.引江济淮工程试调水期间菜子湖及巢湖水质响应变化研究[J].水利规划与设计,2025(6):58-65+74.
[23] 陈东.基于CRITIC－CEEMDAN－CM的河流生态治理后环境影响评价方法[J].陕西水利,2025(5):74-77.
[24] 夏进喜,聂俊坤,庄志华,等.基于云模型-改进D－S证据理论耦合的土石坝渗压安全评价[J].中国农村水利水电,2025(8):184-190.
[25] 侯公羽,马骁赟,孙晓荣,等.基于组合赋权-云模型的抽水蓄能电站综合效益评价[J/OL].工程科学与技术,1-15[2025-07-16]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20250513.0946.002.html.