

罗渝复, 林凯荣, 方煜铭, 等. 考虑风场作用的城市建筑区产流特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 728-735. LUO Y F, LIN K R, FANG Y M, et al. Runoff generation characteristics of urban building areas considering the effect of wind fields[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 728-735. (in Chinese)

## 考虑风场作用的城市建筑区产流特征

罗渝复<sup>1</sup>, 林凯荣<sup>1,2</sup>, 方煜铭<sup>1</sup>, 张靖文<sup>1,2</sup>, 张清涛<sup>1,2</sup>, 庄鲁文<sup>1,2</sup>, 朱涵<sup>1</sup>, 陈刚<sup>3</sup>

(1. 中山大学土木工程学院, 广州 510275; 2. 广东省海洋土木工程重点实验室, 广州 510275;  
3. 广东省水文局广州分局, 广州 510140)

**摘要:** 为探究风场与建筑物对城市建筑区产流的影响, 采取理论与实验相结合的研究方法, 考虑风场与建筑区特征, 提出一个建筑区产流计算公式。通过降雨径流实验对公式的合理性进行验证, 实验结果与公式计算结果相近, 表明公式在一定程度上反映建筑区产流特征。对于独栋建筑与松散建筑区, 风场对产流有直接影响, 建筑区产流量随降雨倾角增大而减小; 对于密集建筑区, 建筑区产流受风场与建筑区自身特征影响, 产流量随建筑密度增加呈先增后减的趋势。在不同降雨倾角与不同建筑密度下, 对建筑区产流进行计算, 结果表明: 降雨倾角不同时, 建筑密度对产流量影响也不同; 降雨倾角较大时, 密集建筑区产流量随建筑密度增大而增大。

**关键词:** 建筑区; 风场; 产流计算; 建筑密度; 降雨径流实验

**中图分类号:** TV122 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0074

随着全球气候变化的加剧, 极端气候引发的城市洪涝灾害对城市建设和居民生活造成了严重影响<sup>[1-4]</sup>, 是当今城市发展面临的重要挑战之一。同时, 随着城市化进程的不断加快, 城市下垫面特征对城市地表产汇流过程的影响越发显著<sup>[5-8]</sup>。

作为城市下垫面的重要组成部分, 城市建筑区在城市洪涝过程中起关键作用。Leandro 等<sup>[9]</sup>研究发现, 城市空间异质性对地表积水深度有中到高度的影响。Li 等<sup>[10]</sup>使用改进的 SCS-CN (soil conservation service curve number) 模型, 研究了沈阳市城市化对直接径流的影响, 发现高密度住宅区和商业区往往具有较大的径流量和较高的径流系数。钟家民等<sup>[11]</sup>使用洪水分析软件 IFSM (integrated flood modeling system), 对广州市天河区猎德涌流域进行建模, 得出密集建筑物会缩小淹没范围, 加快汇流速度, 加大淹没水深的结论。因此, 精确计算城市建筑区产流量, 探究城市建筑区产流特征, 对预防城市洪涝发生、控制洪涝灾害的影响具有重要意义。目前, 已有学者对城市建筑区产流影响因素进行研究, 提出了一些城市建筑区产流计算方法。

Zhou 等<sup>[12]</sup>和 Lin 等<sup>[13]</sup>使用机器学习算法探究建筑区特征对城市洪涝过程的影响, 发现建筑密度、建筑物拥挤程度与容积率对城市洪涝过程有显著影响。Yoo 等<sup>[14]</sup>结合降雨径流模型与降雨径流实验, 证明在风场作用下高层建筑墙面对倾斜降雨具有截留作用, 能够增大建筑区径流量与径流峰值, 同时延长汇流时间。Isidoro 等<sup>[15-16]</sup>通过模拟风场作用的缩尺实验证明建筑密度、建筑高度以及降雨时空分布对建筑区产流有明显影响。高希超等<sup>[17-18]</sup>将建筑区的产流面划分为水平产流面与竖直接流面, 提出风场作用下的建筑区产流具体计算公式。然而, 当前并无成熟的建筑区产流计算方法, 大多数城市雨洪模型将建筑物概化为不透水下垫面, 这种方式忽略了建筑物墙面的产流过程, 具有一定的局限性。将建筑区产流面划分为水平产流面与竖直接流面的计算方法, 对雨强的测量精度要求较高, 且未考虑建筑间距对产流的影响。

本文在上述研究的基础上, 对已有的建筑区产流计算方法进行改进, 分别考虑建筑间距较大与建筑间距较小的情况, 提出考虑建筑间距的城市建筑

收稿日期: 2023-11-25 修回日期: 2024-02-04 网络出版时间: 2024-07-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240711.0850.002>

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金卓越青年团队项目(2023B1515040028); 广东省水文局项目(440001-2023-10716)

作者简介: 罗渝复(2000—), 男, 浙江台州人, 主要从事城市水文研究。E-mail: [luoyf56@mail2.sysu.edu.cn](mailto:luoyf56@mail2.sysu.edu.cn)

通信作者: 林凯荣(1980—), 男, 福建漳州人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: [linkr@mail.sysu.edu.cn](mailto:linkr@mail.sysu.edu.cn)

区产流公式,同时进行降雨径流实验,对公式可靠性进行验证,并基于提出的公式探究降雨倾角、建筑密度及容积率对城市建筑区产流的影响。

## 1 考虑风场作用的建筑区产流计算方法

### 1.1 风场作用的概化

风场对建筑区产流的影响源于风对雨滴运动轨迹的改变,即雨滴受到风作用的水平力倾斜下落,形成倾斜降雨<sup>[19-20]</sup>。当降雨范围内无建筑物时,倾斜降雨对产流无明显影响;而当降雨范围内存在建筑物时,则必然导致部分降雨落在建筑物墙面,即建筑物墙面的截留作用。同时,由于建筑物的存在,位于下风向的部分地表将被建筑物遮挡而未参与产流,即建筑物的遮挡作用<sup>[17]</sup>,见图1。

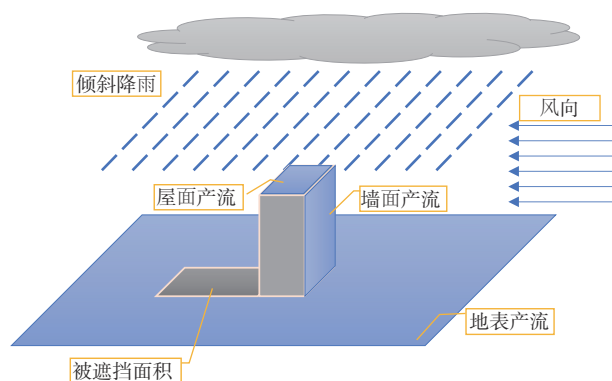


图1 风场作用概化

Fig. 1 Schematic diagram of generalization

### 1.2 建筑物的概化

当前城市雨洪模型在产流计算时将城市下垫面简化为透水面与不透水面。其中,将建筑物作为不透水面的一部分进行考虑,即将三维建筑物概化为二维<sup>[21-23]</sup>。本研究保留建筑物的三维特征,但现实中建筑物的形状复杂,将建筑物概化为规整的六面体,见图1。同时,忽略降雨在建筑物墙面与建筑物屋面的下渗。

### 1.3 计算公式

高希超等<sup>[17]</sup>将雨强分解为水平向(作用于垂直产流面)与垂直向(作用于水平产流面),分别计算垂直面产流与水平面产流后合并得到最终产流量。其假设实际测量的雨强为垂直向雨强,水平向雨强可通过降雨倾角与垂直向雨强求得。

本研究认为实际测量的雨强存在误差,并不一定为垂直向雨强,假设实际测量的雨强为倾斜雨强且作用于所有产流面。同时,考虑建筑间距与风场

动态变化的影响。对于建筑间距,以是否存在墙面遮挡作用为界限,将产流情形分为建筑物间距较小与建筑物间距较大分别考虑。在降雨过程中,风场的动态变化是一个重要考虑因素。风向风速可能随时改变,同时建筑物的存在也会对风场产生一定的干扰<sup>[24]</sup>。这使得建筑物的屋顶和墙面并非始终处于完全暴露于降雨的状态,因此,不同部位的墙面和屋顶受到的雨水强度也会有所不同<sup>[25-26]</sup>,公式中的雨强为实际作用在建筑物墙面的可能的最大值。为了更准确地描述这种现象,引入折减系数对产流进行折减,该系数的取值范围为0~1。本文提出的计算公式如式(1)、式(2)所示,公式右侧依次为地表产流项、墙面产流项、屋面产流项、地表下渗项和雨期蒸发项。

当建筑物间距较大时,建筑物仅对其后地表产生遮挡作用,导致地表产流面积减小,遮挡区域为图2中阴影部分,计算公式为

$$Q = r(BL - nbl - nbhtan\theta) + a_1rnhb + a_2rnbl - f(BL - nbl - nbhtan\theta) - E \quad (1)$$

当建筑物间距较小时,建筑物不仅对其后地表产生遮挡作用,也对其后的建筑物墙面产生遮挡作用,导致地表和建筑物墙面产流面积减小。计算公式为

$$Q = r(BL - nbl - nbd) + a_1rnbd/\tan\theta + a_2rnbl - f(BL - nbl - nbd) - E \quad (2)$$

式(1)、(2)中:  $Q$  为产流量,  $m^3/s$ ;  $a_1$  为墙面产流折减系数;  $a_2$  为屋面产流折减系数;  $r$  为降雨强度,  $m/s$ ;  $B$  为建筑区宽度,  $m$ ;  $L$  为建筑区长度,  $m$ ;  $n$  为建筑区内建筑物数量;  $b$  为建筑物屋面迎风向长度,  $m$ ;  $l$  为建筑物屋面另一方向长度,  $m$ ;  $h$  为建筑物高度,  $m$ ;  $f$  为地表下渗速率,  $m/s$ ;  $\theta$  为降雨倾角, ( $^\circ$ );  $E$  为雨期单位时间的蒸发量,  $m^3/s$ ;  $d$  为建筑物间距,  $m$ 。

## 2 城市建筑区产流实验

为了验证本文提出公式(1)和(2)的合理性,进行城市建筑区产流实验。搭建建筑模型,模拟低密度建筑区在不同降雨倾角和不同降雨强度下的降雨产流过程。使用流量计测量固定时间间隔的入渗流速,计算得到入渗量,未对雨期蒸发量进行测量。实验模拟场地表面积为  $1 m^2$ , 建筑物高度约为  $0.6 m$ 。实验装置见图3。实验结果与公式计算结果对比见表1。

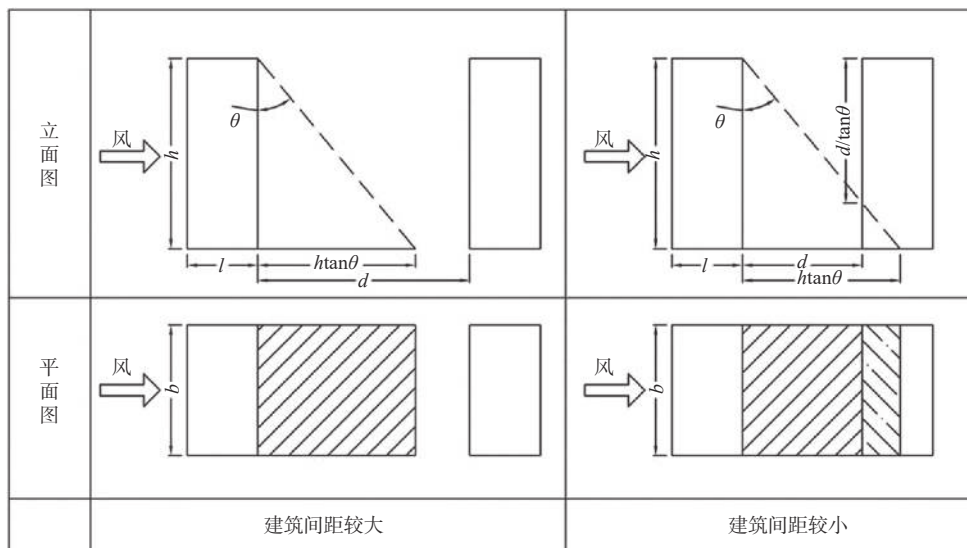


图 2 不同建筑间距下建筑物遮挡作用

Fig. 2 Schematic diagram of building shielding effect under different building spacing



(a) 降雨径流实验装置

(b) 建筑物模型

图 3 建筑区产流实验装置

Fig. 3 Experimental device for flow generation in building areas

情景 1、2 的折减系数根据情景设置确定, 其余

情景的折减系数使用最小二乘法拟合得到, 各情景的折减系数取值见表 1。情景 1 与情景 2 的计算结果与实验结果呈现的趋势相一致, 且相对误差较小, 表明公式能够反映建筑物对建筑区产流的影响。情景 3 至情景 5 的计算结果与实验结果趋势相符, 情景 4 与情景 5 相对误差较大的原因可能是实验误差; 情景 6 至情景 8 的计算结果与实验结果的相对误差较小, 表明公式能够反映风场对建筑区产流的影响。综上, 本文提出的公式能够在一定程度上反映城市建筑区的产流规律。

表 1 实验结果与公式计算结果对比

Tab. 1 Comparison between experimental results and formula results

序号	情景	降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	降雨 时间/h	$a_1$	$a_2$	降雨量/ m <sup>3</sup>	公式各项 求和/m <sup>3</sup>	实测径流量/ m <sup>3</sup>	计算径流量/ m <sup>3</sup>	相对误差/ %
1	无建筑, 降雨倾角0°	100	2	0	1	0.200	0.200	0.121	0.118 4	2.149
2	有建筑, 降雨倾角0°	100	2	0	1	0.200	0.214	0.125	0.119 0	4.800
3	有建筑, 降雨倾角10°	30	2	0.361	0.361	0.060	0.060	0.025	0.026 4	-5.600
4	有建筑, 降雨倾角15°	30	2	0.361	0.361	0.060	0.059	0.019	0.025 6	-34.737
5	有建筑, 降雨倾角20°	30	2	0.361	0.361	0.060	0.058	0.017	0.024 9	-46.471
6	有建筑, 降雨倾角10°	100	2	0.361	0.361	0.200	0.201	0.111	0.120 4	-8.468
7	有建筑, 降雨倾角15°	100	2	0.361	0.361	0.200	0.198	0.116	0.117 4	-1.207
8	有建筑, 降雨倾角20°	100	2	0.361	0.361	0.200	0.194	0.124	0.114 2	7.903

注: 建筑对降雨的截留作用发生的前提条件为倾斜降雨(存在风场)与降雨范围内存在建筑物。因此, 降雨倾角为0或无建筑时, 墙面折减系数 $a_1$ 取0, 屋面折减系数 $a_2$ 取1。

### 3 城市建筑区产流特征

#### 3.1 独栋建筑与松散建筑区产流特征

基于上述对风场与建筑的概化, 独栋建筑的产

流主要受降雨倾角的影响。当建筑区建筑密度较小, 建筑物间距较大, 即建筑物布局松散(各建筑物在风场作用下无墙面遮挡作用)时, 建筑区产流特征与独栋建筑产流特征相同。根据公式(1), 假设情

景,对不同降雨倾角作用下的松散建筑区产流特征进行研究,结果见图4。图4中纵坐标为有建筑物时产流量( $Q$ )与无建筑时产流量( $Q_0$ )的比值,横坐标为降雨倾角。

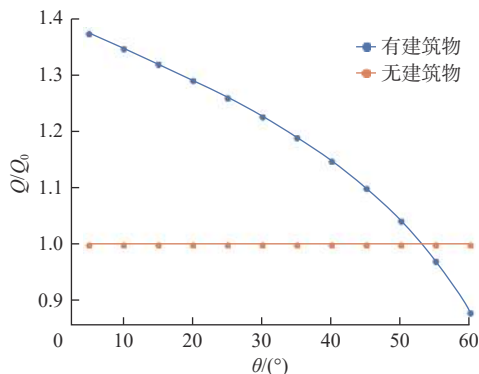


图4 不同降雨倾角下松散建筑区产流量

Fig. 4 Flow of loose construction areas under different rainfall inclination

结果表明,松散建筑区产流量随降雨倾角的增大呈现减少趋势。当降雨倾角较小时,建筑区产流量增加明显。潜在原因是在风场作用下,建筑墙面参与了产流,其影响大于建筑物的不透水性(与建筑物几何尺寸相关)与建筑对地表的遮挡。当降雨倾角不为0时,随着降雨倾角的增大,建筑物的遮挡作

用不断加强,建筑区产流量不断减少。

### 3.2 密集建筑区产流特征

随着城市化进程的加快,松散建筑区较为少见,城市建筑区内往往存在大量建筑物,其产流特征受建筑物在建筑区内的分布特征影响<sup>[15]</sup>。因此,尝试从建筑密度的角度,探究密集建筑区的产流特征。建筑密度(building coverage ratio, BCR)指建筑区内,建筑物的基底面积总和与建筑区总平面面积的比值,在一定程度上反映了建筑物的平面分布特征。本文根据公式(1)和(2),对不同建筑密度的建筑区产流特征进行研究。当建筑区面积一定时,建筑密度与建筑间距、建筑物数量、容积率相关,建筑密度增大将会导致建筑间距减小、建筑物数量的增多以及容积率的增大。容积率(floor area ratio, FAR)指建筑区内建筑物的各层建筑面积总和与建筑面积的比值,在一定程度上反映了建筑物的空间分布特征。当降雨倾角为30°时,建筑区产流量、建筑间距与容积率随建筑密度变化情况见图5。不同降雨倾角与建筑密度下的建筑区产流量见图6。图6中各色块数值为有建筑物时产流量( $Q$ )与无建筑时产流量( $Q_0$ )的比值。

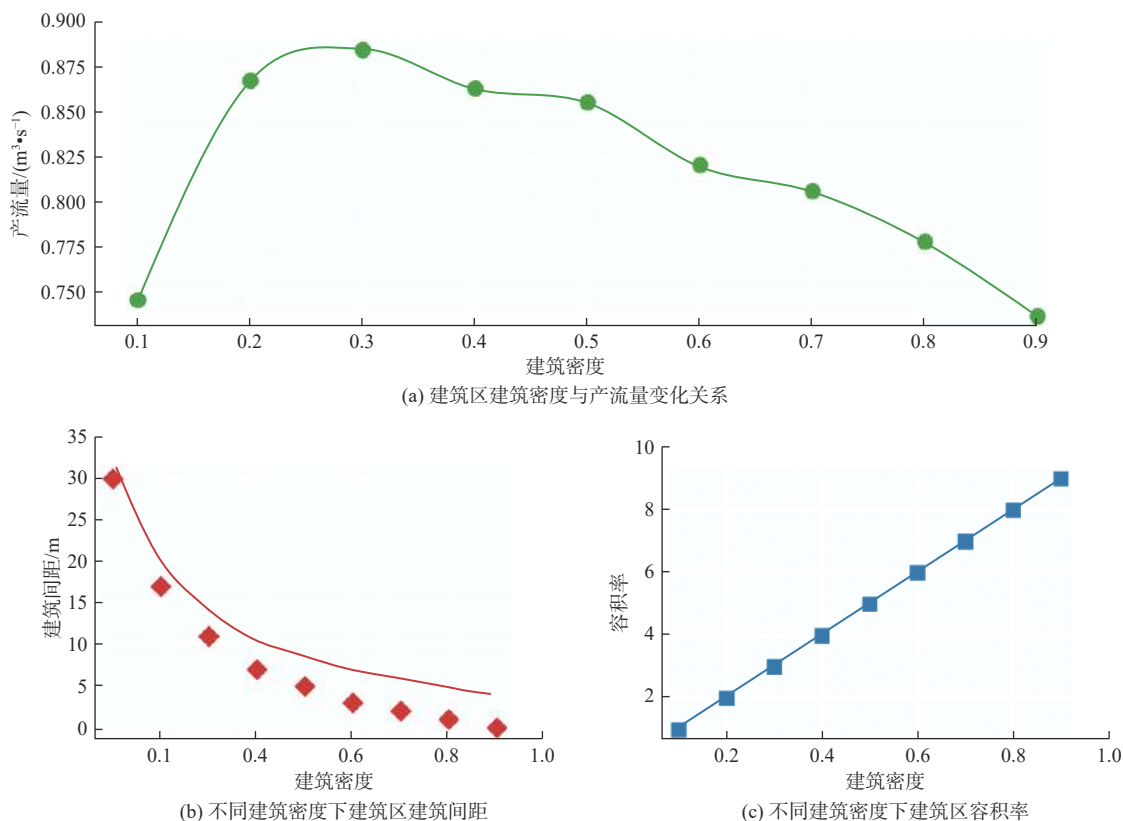


图5 不同建筑密度下建筑区产流量

Fig. 5 Runoff in building areas under different building coverage ratios



由图 5 可知,建筑区产流量随建筑密度的增大呈现先增大后减小的趋势。建筑区产流增大的原因可能是建筑物数量的增多,导致建筑物墙面产流面积增大。建筑区产流减少的原因可能是随着建筑物的增多,建筑间距减小,建筑物与建筑物间互相遮挡,导致建筑物墙面产流面积减少。同时,建筑物对地表的遮挡作用增强,也导致了建筑区产流的减少。

由图 6 可知,当建筑密度一定时,建筑区产流量随降雨倾角增大而减小(建筑物对地表遮挡作用不断加强)。当降雨倾角较小( $\leq 45^\circ$ )时,建筑区产流量随建筑密度的增大呈现先增大后减小的趋势。当降雨倾角较大( $> 45^\circ$ )时,建筑区产流量随建筑密度增大而增大(产流增加源于建筑密度增大导致的建筑区不透水性增强)。

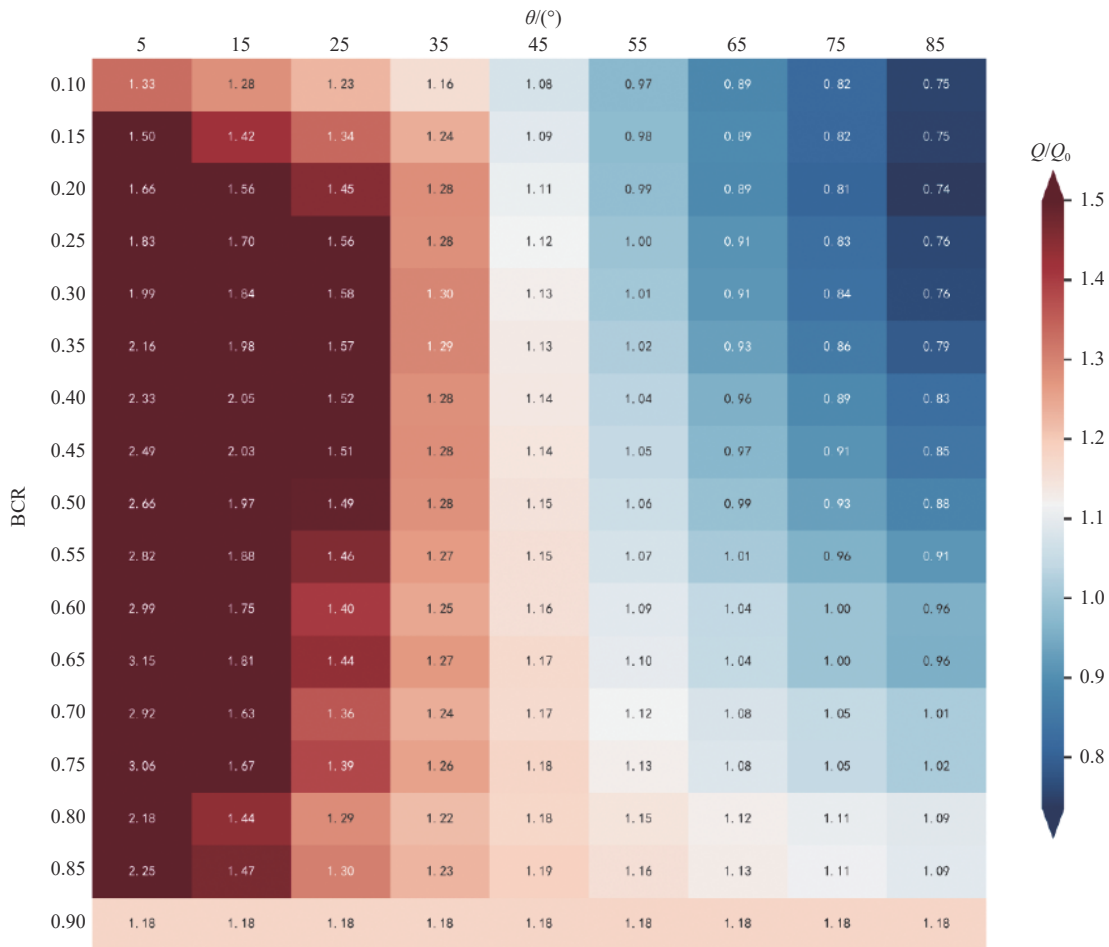


图 6 不同降雨倾角与不同建筑密度下建筑区产流量

Fig. 6 Runoff in building areas under different rainfall inclination angles and building coverage ratios

#### 4 结论

风场对建筑区产流具有显著影响,不同风场条件与建筑区条件的组合可能导致产流量的增减变化。得出以下主要结论:

在独栋建筑与松散建筑区中,随着降雨倾角的增大,产流量呈现逐渐减小的趋势。这是因为随着降雨倾角的增大,建筑物对地表的遮挡作用变得更强。

对于密集建筑区,其产流受到建筑区自身性质的影响。在降雨倾角较小( $\leq 45^\circ$ )时,产流量随建筑

密度增大呈现先增大后减小的趋势。这一趋势的形成既因建筑物墙面产流随建筑密度增大而增加,也因建筑物对地表和其他建筑物的遮挡作用增强。

当降雨倾角较大( $> 45^\circ$ )时,密集建筑区的产流量随建筑密度增大呈现增大趋势。这是因为建筑物墙面与屋面的产流面积随建筑密度增大而增加。

在风场的作用下,建筑区产流的增加主要源于建筑物的不透水性导致的下渗减少,以及倾斜降雨导致的产流面积增加。

## 参考文献:

- [1] 姜仁贵,王思敏,解建仓,等. 变化环境下城市暴雨洪涝灾害应对机制 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1): 102-109. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2022.0012.
- [2] 刘家宏,骆卓然,张永祥,等. 城市化对河南省极端降水空间分布的影响 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 100-105. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.013.
- [3] 秦雪,徐海顺. 城市雨洪管理效益评估研究综述 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(4): 10-23. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.04.002.
- [4] 程晓陶,刘昌军,李昌志,等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略 [J]. *水利学报*, 2022, 53(7): 757-768. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20220351.
- [5] 梅超,刘家宏,王浩,等. 城市下垫面空间特征对地表产汇流过程的影响研究综述 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(5): 791-800. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.04.001.
- [6] 张业彤,王海涛,柴禾蕾. 城市下垫面对地表水文循环过程的影响分析: 以长春市为例 [J]. *国土与自然资源研究*, 2022(5): 42-45. DOI: 10.16202/j.cnki.tnrs.2022.05.002.
- [7] 刘慧娟,卫伟,王金满,等. 城市典型下垫面产流过程模拟实验 [J]. *资源科学*, 2015, 37(11): 2219-2227. DOI: CNKI:SUN:ZRZY.0.2015-11-014.
- [8] SOHN W, KIM J H, LI M H, et al. How does increasing impervious surfaces affect urban flooding in response to climate variability?[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 118: 106774. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106774.
- [9] LEANDRO J, SCHUMANN A, PFISTER A. A step towards considering the spatial heterogeneity of urban key features in urban hydrology flood modelling[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 356-365. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.01.060.
- [10] LI C L, LIU M, HU Y M, et al. Effects of urbanization on direct runoff characteristics in urban functional zones[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 643: 301-311. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.211.
- [11] 钟家民,贺嘉琦,邓镇业,等. 密集建筑物对城市洪涝模拟的影响研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2023(8): 32-40. DOI: 10.12396/znsd.222068.
- [12] ZHOU S Q, LIU Z Y, WANG M, et al. Impacts of building configurations on urban stormwater management at a block scale using XGBoost[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 87: 104235. DOI: 10.1016/j.scs.2022.104235.
- [13] LIN J Y, HE X Y, LU S Y, et al. Investigating the influence of three-dimensional building configuration on urban pluvial flooding using random forest algorithm[J]. *Environmental Research*, 2021, 196: 110438. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110438.
- [14] YOO C, CHO E, NA W, et al. Change of rainfall-runoff processes in urban areas due to high-rise buildings[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126155. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126155.
- [15] ISIDORO J M G P, DE LIMA J L M P, LEANDRO J. Influence of wind-driven rain on the rainfall-runoff process for urban areas: Scale model of high-rise buildings[J]. *Urban Water Journal*, 2012, 9(3): 199-210. DOI: 10.1080/1573062X.2012.654801.
- [16] ISIDORO J M G P, DE LIMA J L M P. Laboratory simulation of the influence of building height and storm movement on the rainfall run-off process in impervious areas[J]. *Flood Risk Manage*, 2014, 7: 176-181. DOI: 10.1111/jfr3.12030.
- [17] 高希超,王浩,杨志勇,等. 考虑风场影响的城市建筑区产流计算方法 [J]. *水科学进展*, 2023, 34(1): 88-101. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.01.009.
- [18] GAO X C, YANG Z Y, HAN D W, et al. The impact of wind on the rainfall-runoff relationship in urban high-rise building areas[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(11): 6023-6039. DOI: 10.5194/hess-25-6023-2021.
- [19] BLOCKEN B, DEROME D, CARMELIET J. Rain-water runoff from building facades: A review[J]. *Building and Environment*, 2013, 60: 339-361. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.10.008.
- [20] GHOLAMALIPOUR P, GE H, STATHOPOULOS T. Wind-driven rain (WDR) loading on building facades: A state-of-the-art review[J]. *Building and Environment*, 2022, 221: 109314. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109314.
- [21] 汤青峰,彭立云,蒋永红,等. 基于SWMM的城市河网情景调控与分析研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(5): 15-26. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.05.002.
- [22] 孙蓝心,夏军,余敦先,等. 九江市中心城区下垫面

- 变化及其径流响应 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 625-635. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0066](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0066).
- [23] 周宏, 刘俊, 丁华凯, 等. 城市有效不透水下垫面及其识别研究进展 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 39-48. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.006](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.006).
- [24] MIKHAILUTA S V, LEZHENIN A A, PITT A, et al. Urban wind fields: Phenomena in transformation [J]. *Urban Climate*, 2017, 19: 122-140. DOI: [10.1016/j.uclim.2016.12.005](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.12.005).
- [25] CHO E, YOO C, KANG M, et al. Experiment of wind-driven-rain measurement on building walls and its in-situ validation [J]. *Building and Environment*, 2020, 185: 107269. DOI: [10.1016/j.buildenv.2020.107269](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107269).
- [26] LU B, FANG J, LI Y, et al. Accuracy of semi-empirical models for wind-driven rain using different data processing methods for wind velocity and direction [J]. *Building and Environment*, 2023, 237: 110300. DOI: [10.1016/j.buildenv.2023.110300](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110300).

## Runoff generation characteristics of urban building areas considering the effect of wind fields

LUO Yufu<sup>1</sup>, LIN Kairong<sup>1,2</sup>, FANG Yuming<sup>1</sup>, ZHANG Jingwen<sup>1,2</sup>, ZHANG Qingtao<sup>1,2</sup>, ZHUANG Luwen<sup>1,2</sup>, ZHU Han<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>3</sup>

( 1. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Marine Civil Engineering, Guangzhou 510275, China; 3. Guangzhou Branch of Guangdong Hydrology Bureau, Guangzhou 510140, China )

**Abstract:** With the rapid pace of urbanization in the past few decades, both the height and density of buildings within cities experienced a noticeable surge. This transformation not only altered the skyline but also introduced new dynamics to natural processes, notably in the interplay between wind fields and rainfall runoff. This study delved into the intricate relationship between wind fields and their influence on runoff within built environments. Under the action of wind, raindrops tend to fall obliquely with an angle and form inclined rainfall. Inclined rainfall is intercepted by buildings with large heights. Meanwhile, part of the area behind the building is shielded due to the existence of the building. According to the phenomenon discussed above, this study endeavored to improve the existing methods of runoff calculation specific to building areas.

The proposed formula includes five terms, which are ground runoff, building wall runoff, roof runoff, ground infiltration and evaporation during rainfall period. To improve the accuracy of the proposed formula, the dynamic characteristics of wind field and the characteristics of building areas were considered. The dynamic characteristics of wind field were reflected by adopting reduction factors. The characteristics of building areas were reflected by including the shielding effect between buildings. The shielding effect between buildings existed when the building distance is smaller than the length of shielded area. Rainfall runoff experiments were conducted to validate the soundness of the improved formula. Different scenarios with different inclined rainfall angle and building environments were designed. The experimental results closely mirrored the outcomes predicted by the formula, underscoring its effectiveness in capturing the flow characteristics unique to building areas. This correlation served as a testament to the formula's reliability. Buoyed by this success, the study embarked on an extended exploration of runoff patterns within urban construction zones.

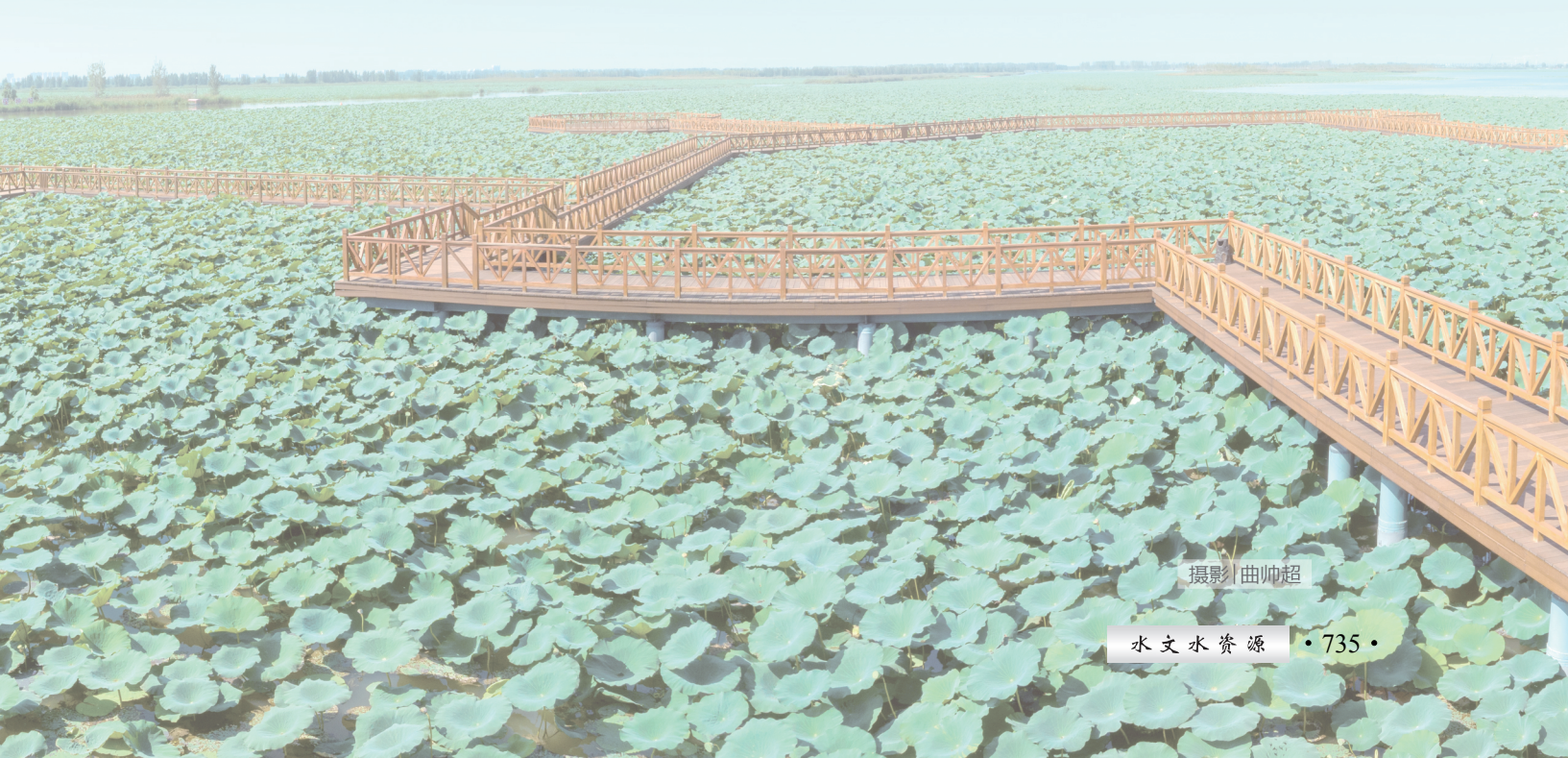
In the case of single-family dwellings and sparsely constructed areas, the angle at which rainfall descends exhibited a palpable influence on runoff generation. As the incline of precipitation increased, a discernible decrease in runoff within these areas was observed. This phenomenon was possibly the result of the increasing building shielding effects when the inclined rainfall angle increases. Conversely, complex mechanisms of runoff calculation were found in densely populated urban areas. Here, the building coverage ratio exerted a direct influence on water flow within the vicinity. As the number of buildings grew, accompanied by an escalation in building density, a twofold effect emerged. On one hand, this surge amplified the expanse of building wall runoff, as a greater surface



area was exposed to the rainfall. Concurrently, the proliferation of buildings enhanced their collective shielding effect, thus instigating a nuanced trend in runoff dynamics. Initially, there was an upswing in runoff, as the augmented surface area contributed to a surge in water collection. However, this trend exhibited a tipping point, after which the runoff gradually receded.

In summary, a formula for runoff calculation of building areas considering the impact of wind fields was proposed. Rainfall runoff experiments were conducted to testify its rationality. Based on the formula proposed, the runoff producing characteristics of different building areas were explored. In sparse distributed building area, the runoff producing is mainly influenced by the inclined rainfall angle; while in dense distributed building area, the runoff producing is not only influenced by the inclined rainfall angle but also the feature of building areas.

**Key words:** building area; wind field; runoff calculation; building coverage ratio; rainfall runoff experiment



摄影|曲帅超