

建筑物密度及排列方式对小区地表径流的影响

肖 洋^{1,2},冯 雯²,张涛涛²,梁东方³

(1. 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 210098;
2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 3. 剑桥大学工程系,英国 剑桥 CB21PZ)

摘要: 由于建筑物密度及排列方式是影响城市小区地表径流过程的重要因素,利用二维浅水方程建立了城市小区降雨径流模型并用 BH 法模拟建筑物,在利用相关人工降雨试验结果对模型参数进行率定的基础上,研究了不同建筑物密度、整齐与交错两种排列方式对城市小区地表降雨径流过程的影响。结果表明,随着建筑物密度的增大,达到平衡流量的汇流时间延长,二者满足指数函数关系;同一建筑物密度,交错排列方式下的汇流时间较整齐排列方式下的增幅更大,且两种排列方式的汇流时间差值随着建筑物密度的增大而增大。在有建筑物的断面上,平均水深与平均流速均大于无建筑物情况,且随着建筑物密度的增大而增大;在无建筑物的断面上,平均水深与无建筑物情况相近,而平均流速小于无建筑物情况,且随着建筑物密度的增大而减小;阻力系数随着建筑物密度的增大而增大,当建筑物密度小于 16% 时,阻力系数增幅较缓,当建筑物密度大于 16% 后,阻力系数显著增大。

关键词: 地表径流;建筑物密度;汇流时间;阻力系数;数值模拟

中图分类号: P333.1;TV135.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2018)04-0001-06

Effects of building density and arrangement on surface runoff process in urban resident//XIAO Yang^{1,2}, FENG Wen², ZHANG Taotao², LIANG Dongfang³ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge CB21PZ, UK)

Abstract: Building density and arrangement are important factors of the runoff process in urban resident area. Based on the two-dimensional shallow water equations and the building-hole method which was used to simulate the buildings, a rainfall run off model of urban community was established. Related artificial rainfall experimental results were used to validate the model parameters, and then the influences of building density and two arrangement types of inline layout and staggered layout in runoff process were studied. The results show that the time of concentration increases with the increasing building density, they satisfy the exporential function relation. For the same building density, the time of concentration in staggered layout is larger than that in inline layout. The difference between these two layouts is increasing as the building density increases. At the cross-sections where building exists, average water depth and average flow velocity are greater than non-building situation, and they increase with the building density. At the non-building cross-sections, the average depth is similar to the situation of non-building but the average velocity is lower and it decreases with the increasing building density. The resistance coefficient increases with the building density. When the building density is less than 16%, the resistance coefficient increases slowly, but it increases significantly when the building density surpasses 16%.

Key words: surface runoff; building density; time of concentration; resistance coefficient; numerical simulation

随着城市化进程的加快,城市小区逐渐增多,建筑物密度也不断增大^[1]。密集的建筑群会引起降雨产流过程中水位、流速、水流阻力等在建筑物附近发生变化,进而影响城市小区的地表径流过程^[2]。因此,揭示建筑物密度及排列方式对城市小区地表

径流过程的影响规律具有重要的现实意义^[3]。

建筑物的存在给数值模拟带来了较大的难度,目前的研究大多关注城市小区建筑物的模拟方法^[4-7]。如在 Trevt 模型^[8]、Jflow 模型^[9]中,通过逐个构建建筑物的高程和边界来处理城市小区建筑

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0402605);江苏省第五期“333 工程”培养资金(BRA2017371);高等学校学科创新引智计划(B17015)

作者简介:肖洋(1974—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: sediment_lab@hhu.edu.cn

群,较好地模拟了建筑物周边局部区域的流场,但密集的建筑群对计算精度要求较高,导致计算量较大,计算耗时很长^[10]。天津市城区洪涝仿真模型^[11]利用网格的建筑面积修正率来模拟建筑物对单元网格蓄水的影响,但未考虑建筑物对流量通量的影响。周浩澜等^[12]比较了BH (building-hole)、BB (building-block)、BR (building-resistance)以及BP (building-porosity)4种建筑物处理方法,认为BH法模拟效果最好,能够真实地反映建筑物内部及外部区域的水流运动,BB法对计算网格的要求较高,适用性较低,BP法模拟效果较好,但实际应用中操作困难,BR法对计算机性能的要求最低,计算耗时最短,使用方便。Cea等^[13]比较了BH和BB法,认为BH法对网格的精度要求较低,计算速度快,从计算效率角度看更优,而BB法由于考虑了建筑物屋面降雨,在物理意义上更精确,但对网格精度要求较高。Jochen等^[14]在实际的溃坝洪水演进预测中分析比较了BH、BB、BR、BP这4种方法,认为BR法适用于缺少建筑物几何数据的情况,BB法的计算成本过高、适用性较低,BH法适合于建筑物几何形状规则简单、间距较大或建筑物密度较大的城市区域模拟,且BP法使用难度较大。

鉴于BH法适于模拟规则建筑物的优点,Liang等^[15]利用浅水方程和BH法建立了城市小区数学模型,初步研究了25%的建筑物密度对城市小区汇流时间的影响,与无建筑物情况相比,达到50%平衡流量所需的时间 t_{50} 增加了40%;当建筑物密度一定时,建筑物数量越多,汇流时间越长;交错排列比整齐排列的汇流时间更长,稳定阶段的水深更大,但没有揭示建筑物密度及排列方式对城市小区产流过程的影响。

本文基于Liang等^[15]的模型,在利用城市小区人工模拟降雨试验数据对模型参数进行率定的基础上,拟研究不同建筑物密度、整齐与交错两种排列方式对汇流时间、水深、流速与沿程阻力的影响,有望为城市小区降雨径流的研究和城市雨洪管理提供科学依据。

1 数值模拟方法

1.1 控制方程

假设研究区域为完全不透水表面,忽略蒸发以及下渗作用,二维浅水方程如下^[15]:

连续方程:

动量方程:

式中: x,y 为直角坐标; t 为时间; $s;\eta$ 为水面高程, $m;q_x$ 和 q_y 分别为 x,y 方向上的单宽流量, $m^2/s;n$ 为曼宁系数, $s/m^{1/3};H$ 为总水深, $m;g$ 为重力加速度, $m/s^2;i$ 为降雨强度, m/s 。

1.2 参数率定

曼宁系数 n 采用已有的人工模拟降雨试验结果进行率定。人工模拟降雨试验选用1.48 m×2.96 m的杉木板作为不透水坡面,降雨历时为8 min,在坡面出口处采用体积法测量流量。为保证计算条件和试验条件一致,数值模型单元网格的大小设置为0.01 m×0.01 m。根据表1中的工况进行参数率定后,得出不同试验条件下 n 的值约为0.05。将 n 值代入模型中进行计算,并将流量过程的模型计算结果与实测结果进行比较(图1),结果表明该模型能较好地预测降雨径流过程。

1.2 参数率定

表1 模型验证工况及结果

建筑物排列方式	坡度/(°)	降雨强度 $i/(mm\cdot h^{-1})$	曼宁系数 $n/(s\cdot m^{-1/3})$
无建筑物	1	22.36,43.25, 51.12,82.46	0.055,0.05, 0.049,0.05
建筑物 整齐排列	1	24.69,45.91, 61.41,79.56	0.05,0.047, 0.05,0.048
建筑物 交错排列	1	21.52,41.74, 59.02,73.24	0.045,0.049, 0.051,0.047

1.3 研究区域与网格划分

为准确反映城市小区建筑物对地表径流过程的影响,模型的计算区域设置为长300 m、宽150 m的矩形区域,建筑物尺寸的设置参考Fewtrell等^[16]提取的Baldwin地区建筑物几何数据,将尺寸设置在5~30 m范围内。建筑物为大小相同且呈线性排列的矩形,从几何适应性来说,采用矩形网格对区域进行划分比三角网格好,且使用矩形网格的计算稳定性已在Liang等^[15]的研究中得到验证。单元网格的大小设置为1.0 m×1.0 m,在 x 方向上划分为301个网格(包含上边界), y 方向上划分为152个网格(包含区域两侧边界)。

1.4 计算工况

计算工况的设计参考《江苏省城市规划管理技术规定(2011)》^[17]的相关规定,城市建筑物密度 a

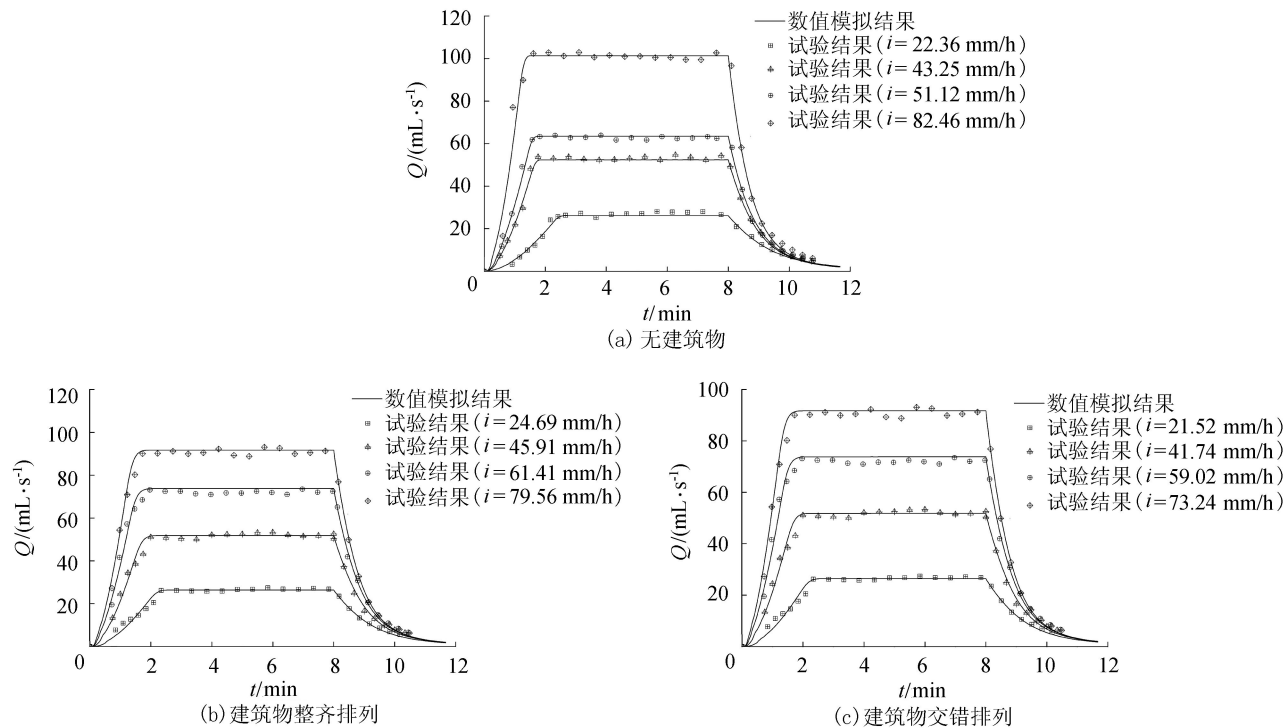


图1 流量过程的计算结果与实测结果比较

的范围在6%~50%之间。计算工况的设计采用单因子变量法,不透水坡面坡度恒为1°,降雨强度恒为60 mm/h,建筑物密度选择以下15种:0%、4%、5.44%、9%、11.11%、16%、18.78%、25%、28.44%、36%、40.11%、49%、53.78%、64%、69.44%,在每种建筑物密度下建筑物分为整齐和交错2种排列方式,共30种工况,图2(a)(b)为建筑物密度为25%时的2种排列方式。为研究相同建筑物密度下不同单个建筑物面积及建筑物数量对径流过程的影响,还设计了2种建筑物覆盖方式,①覆盖方式1:保持建筑物数量一致,改变单个建筑物的面积;②覆盖方式2:保持单个建筑物面积一致,改变建筑物数量,图2(c)(d)为建筑物密度为9%时的2种覆盖方式。

当研究建筑物对汇流时间的影响时,取图2(a)

中出口断面20作为观测断面;当研究建筑物密度对沿程水深、流速、阻力系数的影响时,沿水流方向取图2(a)中断面1~19作为观测断面,分别为0+15.0 m、0+30.0 m、0+45.0 m、0+60.0 m、…、0+285.0 m。

2 结果分析

2.1 建筑物密度及排列方式对汇流时间的影响

降雨径流过程可用无量纲 S 曲线表示,即

$$Q^* = \frac{Q_t}{iA} \quad (4)$$

式中: Q^* 为无量纲流量; Q_t 为流量, m^3/s ; A 为区域面积, m^2 , $A=150\text{ m}\times 300\text{ m}$ 。

图3(a)(b)分别为整齐、交错排列方式下不同建筑物密度 a 对应的 S 曲线,汇流时间 t_e 指从开始

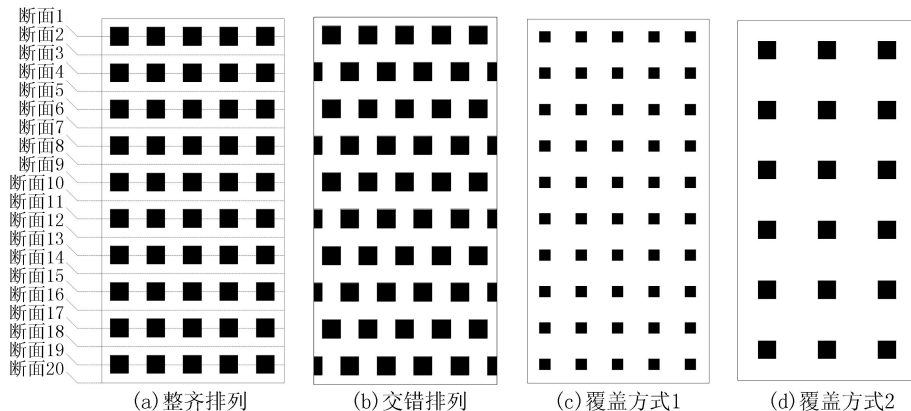


图2 部分数值模拟工况

降雨至流域出口处流量达到平衡流量所需的时间,即 $Q_{t_c}=Q_{\text{平}}, t_c$ 的大小可以反映流量的增加速度。从图 3 可以看出,整齐与交错排列方式下 t_c 均随着建筑物密度的增大而增大,整齐排列下,当建筑物密度增大到 69.44% 时, t_c 约从 21 min 增大到 29 min,增加了 34%;交错排列下的增幅更大, t_c 约从 21 min 增大到 34 min,增加了 55%。

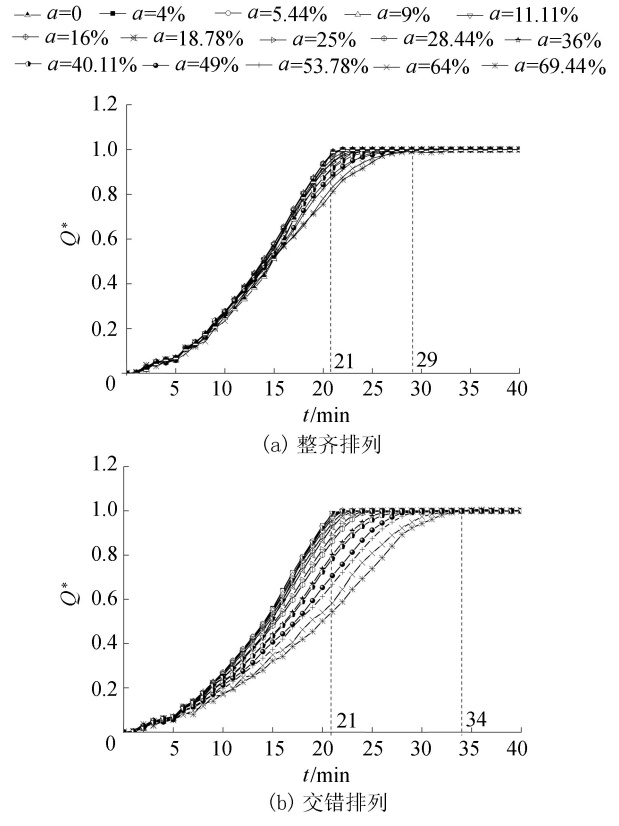


图 3 整齐、交错排列方式下不同建筑物密度的 S 曲线

由于出口处流量达到稳定流量后依然会有波动,难以准确确定汇流时间 t_c , Liang 等^[15] 选取 t_{50} (达到 50% 平衡流量所需的时间) 来代表汇流时间,但由于 t_{50} 到 t_c 间隔较大,不能很好地代表汇流时间的变化规律,为此采用流量达到 95% 平衡流量所需的时间 t_{95} 来代表汇流时间。图 4 为整齐、交错排列方式下,不同建筑物密度 a 所对应的 t_{95} ,由图 4 可见,两种排列方式下 t_{95} 的变化趋势一致,即 t_{95} 随着建筑物密度的增大而增大,两者呈指数函数关系,且交错排列方式下 t_{95} 的增幅更大。当建筑物密度较小时,两种排列方式下 t_{95} 相近,随着建筑物密度的增大,交错排列与整齐排列下 t_{95} 的差值增大,主要是由于随着建筑物面积的增大或数量的增多,建筑物对径流的阻碍作用相应增大,延长了汇流时间。

图 5 为不同建筑物覆盖方式对地表径流过程的影响,从图 5 可以看出,在不同建筑物密度下两种覆盖方式的 S 曲线基本重合,表明地表径流过程与建

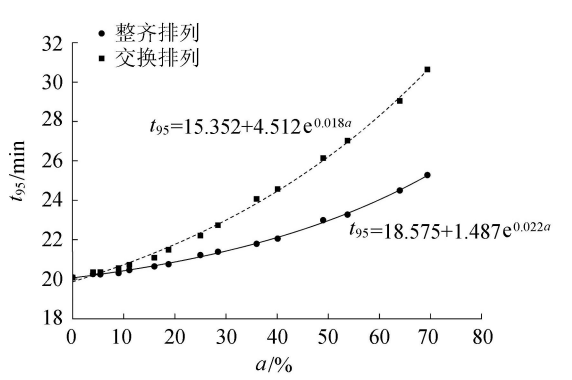


图 4 不同建筑物密度的 t_{95} 变化曲线

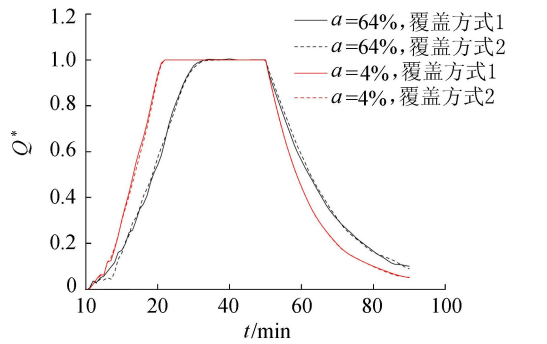


图 5 不同建筑物覆盖方式下的 S 曲线

筑物覆盖方式无关。

2.2 建筑物密度及排列方式对水深的影响

为研究不同建筑物密度及排列方式对整个坡面水深的影响,选择了各观测断面稳定期的平均水深来分析,各观测断面平均水深通过以下公式进行计算:

$$\bar{h}_k = \frac{\sum_{j=1}^{150} h_{k,j}}{150 - n_{\text{房屋}}} \quad (5)$$

式中: $\bar{h}_k$ 为稳定期 k 断面的平均水深, m; $h_{k,j}$ 为稳定期 k 断面单元网格的水深, m; $n_{\text{房屋}}$ 为 k 断面上房屋所占的网格总数。

图 6(a)(b) 分别表示整齐、交错排列方式下,不同建筑物密度对应的沿程断面平均水深,由图 6 可见,当无建筑物时(建筑物密度为 0),沿程平均水深呈缓慢增长的趋势;当有建筑物后,各断面平均水深增加,但增幅不同,有建筑物断面上的平均水深明显增大,这主要由于建筑物的存在束窄了过水断面,引起平均水深增大,而在无建筑物断面上平均水深基本不变;随着建筑物密度的增大,有建筑物断面上的平均水深也随之增大,且增幅随着坡长 L 的增加逐渐增大;两种排列方式下平均水深变化规律相近。

2.3 建筑物密度及排列方式对流场的影响

图 7 为建筑物密度 25% 时整齐、交错排列方式下的流域流线与局部流场,从图中可以看出,受建筑物阻隔影响,在建筑物交错排列情况下,流线变得弯曲,水流路径变长,造成汇流时间延长。当水流流经

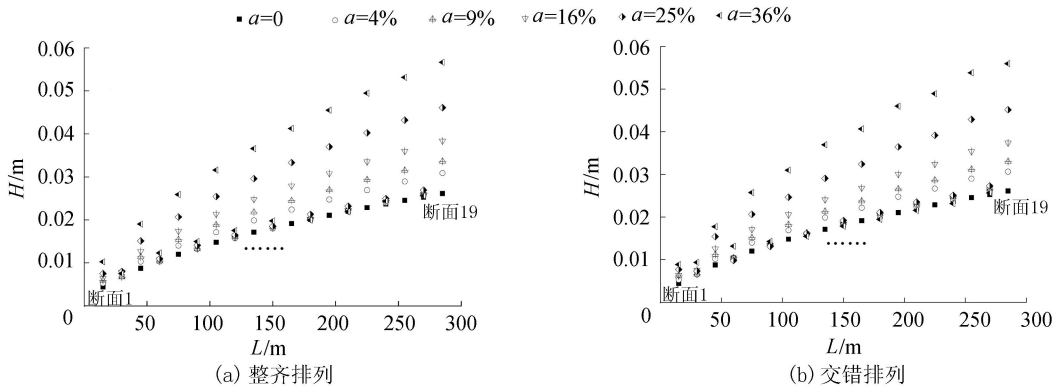


图6 整齐、交错排列方式下不同建筑物密度的沿程平均水深

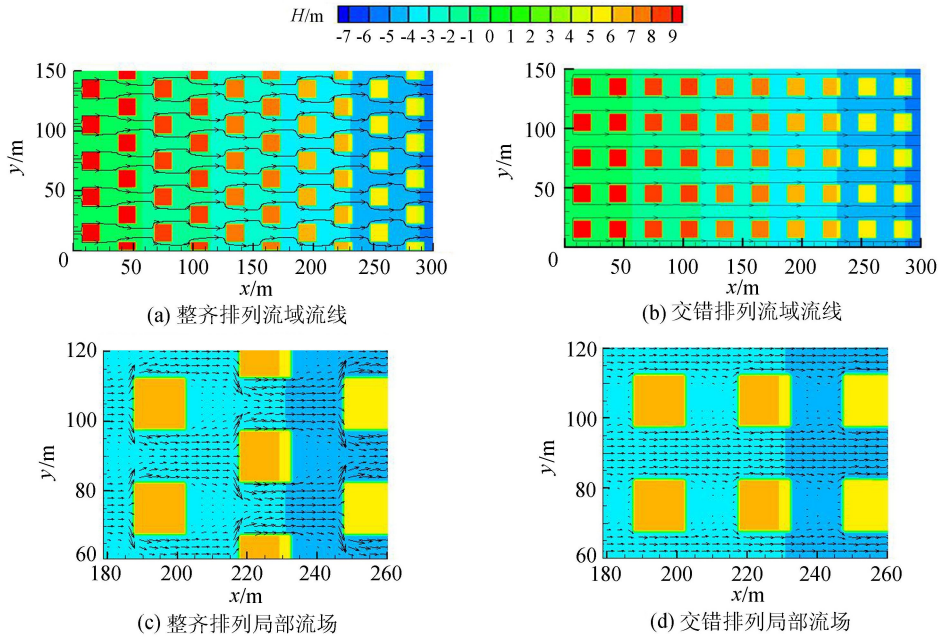


图7 建筑物密度25%时整齐、交错排列方式下流域流线与局部流场

建筑物时流速增加,在建筑物后方流速下降;在整齐排列情况下,流线基本平顺,建筑物周围的流速小于交错排列情况,在建筑物后方,流速明显下降。

选择稳定期19个观测断面的平均流速来分析不同建筑物密度及排列方式对整个坡面流速的影响,各观测断面平均流速通过公式(6)进行计算:

$$\bar{u}_k = \frac{\sum_{j=1}^{150} q_{k,j} \Delta x}{\sum_{j=1}^{150} h_{k,j} \Delta x} \quad (6)$$

式中: $\bar{u}_k$ 为 k 断面的平均流速, m/s ; $q_{k,j}$ 为 k 断面单元网格的单宽流量, m^2/s ; $h_{k,j}$ 为 k 断面每个网格的水深, m ; Δx 为单元网格宽度, m 。

图8(a)(b)分别为不同建筑物密度在整齐、交错排列方式下对应的沿程断面平均流速,由图8可见,当无建筑物时,沿程断面平均流速呈递增趋势;有建筑物后,有建筑物断面上的平均流速大于无建筑物情况,主要是由于建筑物不过水,过水断面减

小,引起断面平均流速增大;无建筑物断面上的平均流速小于无建筑物情况,主要原因是建筑物阻水引起建筑物背流面流速下降,断面平均流速减小。在有建筑物断面上,随着建筑物密度的增大,流速随之增大,且随着坡长 L 的增加,增幅也逐渐增大;无建筑物断面上,随着建筑物密度的增大,流速降低,且随着坡长 L 的增加,降幅也逐渐增大。两种排列方式下断面平均流速变化规律相似。

2.4 建筑物密度及排列方式对阻力系数的影响

不透水坡面地表径流的阻力系数通常由Darcy-Weisbach阻力系数表示:

$$f = \frac{8gRJ}{u^2} \quad (7)$$

式中: f 为Darcy-Weisbach阻力系数; g 为重力加速度, 9.81 m/s^2 ; R 为水力半径, m ,近似取流域平均水深,其值为稳定期19个观测断面水深的平均值; J 为水力坡降; u 为流域平均流速,其值为稳定期19个观测断面流速的平均值, m/s 。

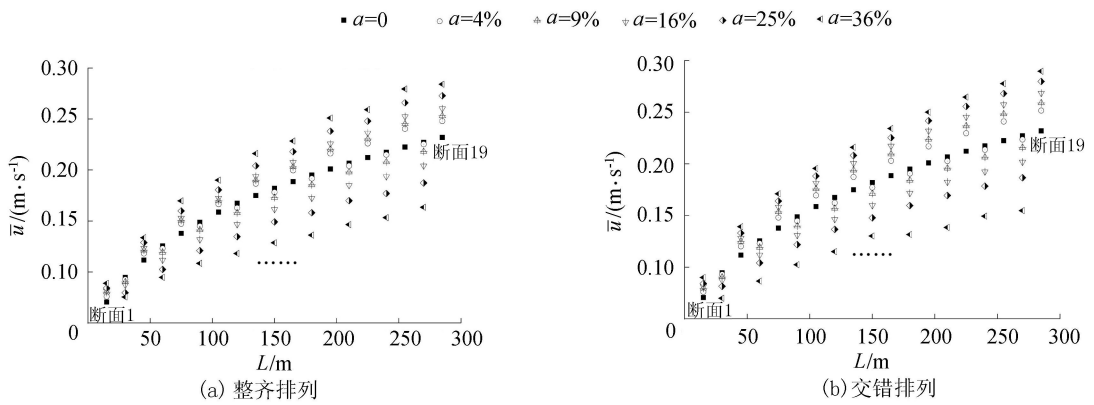


图8 整齐、交错排列下不同建筑物密度的沿程平均流速

图9为整齐、交错排列方式下,不同建筑物密度对应的阻力系数。由图9可见,随着建筑物密度的增大,阻力系数逐渐增大,当建筑物密度小于16%时,阻力系数增幅较小,整齐、交错排列方式下的阻力系数大小相近;当建筑物密度大于16%后,阻力系数显著增大,且交错排列的阻力系数略大于整齐排列的阻力系数。这主要是由于建筑物的存在对水流有阻滞作用,当建筑物密度增大,建筑物的阻滞作用增大,产生的能量损耗增加,相应的阻力系数也随之增大。

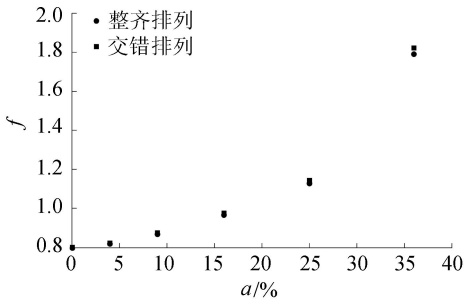


图9 整齐、交错排列方式下不同建筑物密度的阻力系数

3 结 论

- 在整齐与交错两种排列方式下,汇流时间 t_{95} 随着建筑物密度的增大而增大,且二者满足指数关系,交错排列方式下汇流时间 t_{95} 的增幅更大;建筑物覆盖方式对地表径流过程几乎没有影响。
- 无建筑物时,平均水深沿程逐渐增加;有建筑物后,平均水深沿程变化不一致,在有建筑物断面上,平均水深大于无建筑物情况,且随着建筑物密度的增大而增大,其增幅随着坡长的增加而增大;在无建筑物断面上,平均水深基本不变,交错、整齐排列下平均水深变化规律相似。
- 无建筑物时,平均流速沿程逐渐递增;有建筑物后,平均流速沿程变化不一致,在有建筑物断面上,平均流速大于无建筑物情况,且随着建筑物密度的增大而增大,其增幅随着坡长的增加而增大;在无建筑物断面上,平均流速小于无建筑物情况,且随着

建筑物密度的增大而减小,其降幅随着坡长的增加而增大,两种排列方式下平均流速变化规律相似。

d. 在整齐与交错两种排列方式下,阻力系数随着建筑物密度的增大而增大,当建筑物密度小于16%时,阻力系数增幅较缓,当建筑物密度大于16%后,阻力系数显著增大。

参考文献:

- [1] 李树平,黄廷林.城市化对城市降雨径流的影响及城市雨洪控制[J].中国市政工程,2002(3):35-38. (LI Shuping, HUANG Tinglin. Influence on rainfall run-off due to urbanization and rain-water flood control in the city [J]. China Municipal Engineering, 2002(3): 35-38. (in Chinese))
- [2] 金义蓉,胡庆芳,王银堂,等.快速城市化对上海代表站降水的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):204-210. (JIN Yirong, HU Qingfang, WANG Yintang, et al. Impacts of rapid urbanization on precipitation at two representative rain gauges in Shanghai City [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2017, 45(3): 204-210. (in Chinese))
- [3] 翁浩轩,廖文景,梁旭,等.基于建筑密度系数的二维城市洪水数值模拟[J].长江科学院院报,2015,32(7):22-28. (WENG Haoxuan, LIAO Wenjing, LIANG Xu, et al. A two-dimensional numerical model of urban flood based on building density coefficient [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(7): 22-28. (in Chinese))
- [4] 王晓霞,徐宗学.城市雨洪模拟模型的研究进展[C]//中国水利学会2008学术年会论文集(下册).北京:中国水利学会,2008.
- [5] 张倩,毛云飞,徐艳峰,等.建筑物布置对城市洪水演进影响的实验研究[J].吉林水利,2017(2):36-42. (ZHANG Qian, MAO Yunfei, XU Yanfeng, et al. Experimental study on the effects of building layout on the propagation of urban flood [J]. Jilin Water Resources, 2017(2): 36-42. (in Chinese))

(下转第20页)

- 刷率[J]. 泥沙研究, 1998(1):1-11. (WANG Zhaoyin, HUANG Jinchi, SU Dehui. River channel scour and scour rate of clear water flow [J]. Journal of Sediment Research, 1998(1):1-11. (in Chinese))
- [17] HOOKE J M. An analysis of the processes of river bank erosion[J]. Journal of Hydrology, 1979, 42(1/2):39-62.
- [18] 徐锡荣,钟凯,白金霞. 长江小黄河洲演变对下游汉道分流特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014,42(3):211-216. (XU Xirong, ZHONG Kai, BAI Jinxia. Influence of evolution of Xiaohuangzhou bifurcated reach on flow-dividing characteristics of downstream bifurcated reaches of Yangtze River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014,42(3):211-216. (in Chinese))
- [19] 胡秀艳,姚炳魁,朱常坤. 长江江都嘶马段岸崩灾害的形成机理与防治对策[J]. 地质学刊,2016,40(2):357-362. (HU Xiuyan, YAO Bingkui, ZHU Changkun. Formation mechanism and prevention strategies of bank collapsing at Sima Bend of Jiangdu in the Yangtze River [J]. Journal of Geology, 2016, 40(2):357-362. (in Chinese))
- [20] 彭丽云,李涛,刘建坤. 黄河冲积粉土的吸力和强度特性关系[J]. 北京交通大学学报,2009,33(4):129-133. (PENG Liyun, LI Tao, LIU Jiankun. Relationship between matric suction and strength characteristic of Yellow River alluvial silts[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(4):129-133. (in Chinese))
- [21] 王四巍,刘海宁,刘汉东. 黄河下游堤防边坡多因素敏感性分析[J]. 人民黄河,2009,31(7):18-19. (WANG Siwei, LIU Haining, LIU Handong. Analysis on sensibility of multi-factor of embankment slope of the Lower Yellow River[J]. Yellow River, 2009, 31(7):18-19. (in Chinese))

(收稿日期:2017-09-13 编辑:骆超)

(上接第6页)

- [6] 岑国平,詹道江,洪嘉年. 城市雨水管道计算模型[J]. 中国给水排水,1993(1):37-40. (CEN Guoping, ZHAN Daojiang, HONG Jianian. Calculation model of urban storm water pipeline [J]. China Water and Wastewater, 1993(1):37-40. (in Chinese))
- [7] 周玉文,赵洪宾. 城市雨水径流模型研究[J]. 中国给水排水,1997(4):4-6. (ZHOU Yuwen, ZHAO Hongbin. A study on urban storm runoff model [J]. China Water and Wastewater, 1997(4):4-6. (in Chinese))
- [8] 唐莉华,彭光来. 分布式水文模型在小流域综合治理规划中的应用[J]. 中国水土保持,2009(3):34-36. (TANG Lihua, PENG Guanglai. Application of distributed hydrological model in comprehensive management plan of small watershed [J]. Soil and Water Conservation in China, 2009(3):34-36. (in Chinese))
- [9] BRADBROOK K F, LANE S N, WALLER S G, et al. Two dimensional diffusion wave modelling of flood inundation using a simplified channel representation [J]. International Journal of River Basin Management, 2004, 2(3):211-223.
- [10] VILLANUEVA I, WRIGHT N G. Linking Riemann and storage cell models for flood prediction [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management, 2006, 159(1):27-33.
- [11] 解以扬,李大鸣,李培彦,等. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J]. 水科学进展,2005,16(3):384-390. (XIE Yiyang, LI Daming, LI Peiyan, et al. Research and application of the mathematical model for urban rainstorm water logging [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3):384-390. (in Chinese))
- [12] 周浩澜,陈洋波. 城市地面洪水演进模拟方法的数值实验对比研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2011,43(4):1-6. (ZHOU Haolan, CHEN Yangbo. Numerical experiment comparative research on simulation methods for flood propagation in urbanization ground [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(4):1-6. (in Chinese))
- [13] CEA L, GARRIDO M, PUERTAS J. Experimental validation of two-dimensional depth-averaged models for forecasting rainfall-runoff from precipitation data in urban areas[J]. Journal of Hydrology, 2010, 382(1):88-102.
- [14] JOCHEN ES, BRETT FS. Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency [J]. Advances in Water Resources, 2012, 41(2):49-64.
- [15] LIANG D, ÖZGEN I, HINKELMANN R, et al. Shallow water simulation of overland flows in idealised catchments [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(11):7307-7318.
- [16] FEWTRELL T J, BATES P D, HORRITT M, et al. Evaluating the effect of scale in flood inundation modelling in urban environments[J]. Hydrological Processes, 2008, 22(26):5107-5118.
- [17] 江苏省住房和城乡建设厅. 江苏省城市规划管理技术规定(2011)[M]. 南京:江苏人民出版社,2011. (收稿日期:2017-12-18 编辑:骆超)