

建筑物密度对降雨径流溶解态污染物传输过程的影响

成浩科¹,王旭²,张涛涛^{3,4,5},肖洋^{3,4,5},沈菲⁶

(1. 长江生态环保集团有限公司,湖北 武汉 430010; 2. 浙江钱塘江水利建筑工程有限公司,浙江 杭州 311500;
3. 苏州科技大学环境科学与工程学院,江苏 苏州 215009; 4. 河海大学水灾害防御全国重点实验室,江苏 南京 210098;
5. 河海大学水安全与水科学协同创新中心,江苏 南京 210098; 6. 常州市武进区河道湖泊管理处,江苏 常州 213164)

摘要:为分析城市区域建筑物密度对溶解态污染物传输过程的影响规律,选取保守性溶解态污染物为研究对象,构建了建筑区域二维降雨径流及污染物传输数学模型,模拟分析了不同建筑物密度对区域溶解态污染物质量浓度、传输率和累计传输过程的影响。模拟结果表明:建筑物密度在 4%~16% 时,汇流中间阶段流量呈现出相对较快的上升态势;随着建筑物密度的增大,建筑物间隙下游水深先增大后减小,在建筑物密度为 36% 时达到最大值;区域出口污染物质量浓度整体呈逐渐下降的趋势,而污染物传输率则先增大后减小;建筑物交错排列情形下,上游污染物通过建筑物间隙间歇性传输到下游;当建筑物密度大于 9% 时,在流量达到最大之前,区域出口污染物质量浓度和传输率会出现多次波动;随着建筑物密度的增大,污染物传输率会减小,且峰值出现时间会延后;污染物最终累计传输比例随建筑物密度的增大而降低。

关键词:建筑物密度;溶解态污染物;污染物传输;降雨径流;数值模拟

中图分类号:TV131.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)04-0039-06

Influence of building density on transport process of dissolved pollutants in rainfall runoff//CHENG Haoke¹, WANG Xu², ZHANG Taotao^{3,4,5}, XIAO Yang^{3,4,5}, SHEN Fei⁶(1. Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 2. Zhejiang Qiantang River Water Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311500, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 4. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. National Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 6. River and Lake Management Office of Wujin District, Changzhou City, Changzhou 213164, China)

Abstract: To analyze the influence of building density in urban areas on the transport process of dissolved pollutants, taking conservative dissolved pollutants as the object, a two-dimensional mathematical model for rainfall runoff and pollutant transport in the building area was established, and the effects of different building densities on the mass concentration, transport rate and cumulative transport process of dissolved pollutants were simulated and analyzed. The simulated results show that when the building density ranges from 4% to 16%, the flow rate increases relatively quickly in the middle stage of runoff confluence. With the increase of building density, the water depth downstream of the building gaps first increases and then decreases, and reaches its maximum value at a building density of 36%. The mass concentration of pollutants at the regional outlet generally decreases gradually, while the pollutant transport rate first increases and then decreases. In the case of staggered building arrangements, the upstream pollutants are intermittently transported downstream through the gaps between buildings. When the building density is greater than 9%, the mass concentration and transport rate of pollutants at the regional outlet exhibit multiple fluctuates before the runoff reaches its maximum. With the increase of building density, the transport rate of pollutants decreases and the peak occurrence time is delayed. The final cumulative transport proportion of pollutants decreases with the increase of building density.

Key words: building density; dissolved pollutants; pollutant transport; rainfall runoff; numerical simulation

城市区域雨水径流已成为导致受纳水体污染的关键污染源^[1-3]。随着城市化不断深入,水体污染现

状将进一步恶化^[4],同时城市建筑小区逐渐增多,建筑物密度也不断增大^[5]。建筑物的排布和密度

基金项目:长江生态环保集团有限公司员工科研项目(NBYG202300324);国家自然科学基金项目(52309102, 52379075);苏州市水利水务科技项目(2023004)

作者简介:成浩科(1987—),男,高级工程师,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:313512229@qq.com

通信作者:张涛涛(1992—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:ztt714521@163.com

会引起降雨产流过程发生变化^[6-7],进而影响污染物传输过程^[8]。因此,深入探究建筑物密度对污染物传输过程的影响规律,对于精准把握城市区域径流污染机制以及初期雨水污染防控具有重要价值。

建筑物增加了城市地表径流的复杂性,目前针对城市建筑区域地表径流演进过程的研究大多聚焦于建筑物的数值模拟手段及其在不同建筑物排列和密度情境下的适用性^[6-7,9]。在城市建筑区域雨水径流污染传输方面,当前主要通过现场监测、模拟降雨试验和数值模拟计算开展相关研究。雨水径流污染物按其赋存状态可分为颗粒态和溶解态^[10],相比之下,易溶于水的溶解态污染物较易随径流传输,进而在降雨初期发生降雨初始冲刷效应,其对受纳水体的危害不可小觑。已有研究^[11]表明,溶解态污染物对于水生态的危害更具持久性,治理难度也更高,为此部分学者针对城市区域降雨径流中溶解态污染物传输过程和模型构建开展了研究。例如:何流等^[12-13]基于人工模拟降雨试验发现溶解态污染物较颗粒态污染物更容易被冲刷;Xiao 等^[14-16]以 NaCl 模拟溶解态污染物,通过室内降雨试验探究了降雨强度、坡面坡度和粗糙度对污染物传输过程的影响,并提出了适用于溶解态污染物的指数传输模型;Zhang 等^[17-19]提出了“控制层”概念,假设控制层与其上部径流层水体污染物完全混合,构建了一维、二维城市区域溶解态污染物传输模型,并通过建筑小区和非恒定降雨的室内试验结果对模型进行了验证,同时发现建筑物会延缓污染物传输过程;肖洋等^[20]通过数值模拟分析发现不同建筑物密度对城市小区产汇流过程会产生显著影响。然而,有关建筑物密度对溶解态污染物传输过程影响规律尚不清晰。

本文基于 Zhang 等^[19]构建的模型和相关参数,以保守性溶解态污染物为研究对象,通过设置不同建筑物密度,模拟分析降雨作用下城市建筑区域溶解态污染物质量浓度、传输率和累计传输过程差异,揭示建筑物密度对溶解态污染物传输过程影响规律,以期对城市小区的科学规划布局和雨水径流污染精准防治提供参考。

1 数值模拟方法

1.1 控制方程

本文建筑区域考虑为无下渗的下垫面坡面,降雨历时较短,不考虑蒸发过程导致的水量损失,同时忽略风力、科氏力等因素的影响,则考虑降雨的标准浅水方程为

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = I \quad (1)$$

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial (u^2 h)}{\partial x} + \frac{\partial (uvh)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{n^2 gu \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial (uvh)}{\partial x} + \frac{\partial (v^2 h)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{n^2 gv \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (3)$$

式中: t 为时间,s; $x、y$ 为直角坐标系坐标; η 为水面高程,m; $u、v$ 分别为 $x、y$ 方向上的流速分量,m/s; h 为总水深,m; I 为降雨强度,m/s; n 为曼宁粗糙系数,s/m^{1/3}; g 为重力加速度,m/s²。其中式(1)为连续方程,式(2)(3)为动量方程。

保守性污染物溶质在水体中的分布满足质量守恒定律,当污染物溶质完全随水体流动时,其质量浓度分布可以通过以下对流-扩散方程来描述:

$$\frac{\partial h\rho_r}{\partial t} + \frac{\partial uh\rho_r}{\partial x} + \frac{\partial vh\rho_r}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(hD_{xx} \frac{\partial \rho_r}{\partial x} + hD_{xy} \frac{\partial \rho_r}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(hD_{yx} \frac{\partial \rho_r}{\partial x} + hD_{yy} \frac{\partial \rho_r}{\partial y}) + S \quad (4)$$

式中: ρ_r 为沿水深平均的污染物质量浓度,kg/m³; $D_{xx}、D_{xy}、D_{yx}、D_{yy}$ 为扩散系数,其方向与水流流动方向一致,m²/s; S 为源项,表示单位时间单位面积坡面上流入或流出水体的污染物质量。

关于城市区域降雨径流过程和水流中污染物溶质传输过程均已找到相应控制方程,唯一需要解决的问题是对流-扩散方程中源项的表达式,其表达式决定了建筑区域表面上污染物进入降雨径流中的过程。根据 Zhang 等^[19]提出的控制层模型,在降雨初期由于坡面粗糙度和张力的存在会形成一个薄的“水层”(定义为控制层),在此期间,可溶性污染物会溶解在该水层,并在径流产生后与上部径流层发生物质交换从而随径流传输出坡面,同时假设:①控制层污染物与上部径流层污染物完全混合;②控制层各向流速为0。根据以上假设可知,控制层不存在对流和扩散过程。设控制层厚度为 h_c 、污染物质量浓度为 ρ_c ,则满足以下方程:

$$\partial h_c \rho_c / \partial t = -S \quad (5)$$

$$\rho_c = \rho_r \quad (6)$$

至此,源项 S 的表达式已经求出,即建筑区域二维溶解态污染物传输模型已构建好。参考 Zhang 等^[19]的研究结果,控制层厚度假定为常数,但控制层污染物质量浓度是随时空变化的。

1.2 模型参数

模型相关参数参考 Zhang 等^[19]的研究,曼宁糙

率系数取 $0.050\text{ s/m}^{1/3}$, 控制层厚度取 0.62 mm 。在对流-扩散方程中, 需要确定的参数是扩散系数 D_{xx} 、 D_{xy} 、 D_{yx} 、 D_{yy} , 根据 Liang 等^[21] 的研究, 扩散系数可以通过以下公式进行计算:

$$D_{xx} = \sqrt{gh}(\varepsilon_1 u^2 + \varepsilon_l v^2)/C\sqrt{u^2 + v^2} \quad (7)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \sqrt{gh}(\varepsilon_1 - \varepsilon_l)uv/C\sqrt{u^2 + v^2} \quad (8)$$

$$D_{yy} = \sqrt{gh}(\varepsilon_1 v^2 + \varepsilon_l u^2)/C\sqrt{u^2 + v^2} \quad (9)$$

式中: C 为谢才系数; ε_1 为纵向分散系数; ε_l 为湍流扩散系数。谢才系数 C 可以通过曼宁公式以及曼宁糙率系数 n 求得, ε_1 、 ε_l 分别取为 13.0 和 1.2。

1.3 工况设置与网格划分

参考《江苏省城市规划管理技术规定(2011 年版)》的相关规定, 城市建筑物密度一般介于 6% ~ 50% 之间。为反映真实城市建筑小区, 模拟区域(研究区)为长 300 m、宽 150 m 的矩形建筑小区, 研究区坡度沿长度方向取 1° 。建筑物轮廓形状均为正方形, 建筑物密度取 0%、4%、9%、16%、25%、36%、49%、64%, 采用交错排列方式布置。不同建筑物密度通过改变单个建筑物尺寸来实现, 即保持建筑物数量为 50 个, 密度为 4%、9%、16%、25%、36%、49%、64% 的建筑物边长分别为 6、9、12、15、18、21、24 m。降雨设为降雨强度为 60 mm/h 的恒定均匀降雨, 降雨总历时为 80 min。从几何适应性角度考虑, 模型采用矩形网格, 单元网格的大小设置为 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$, 在 x 方向上划分为 302 个网格(包含上下边界), y 方向上划分为 152 个网格(包含区域两侧边界)。Liang 等^[9,20] 在研究建筑物及其排列方式对降雨径流过程的影响时采用了 BH(building-hole) 建筑物处理方法, 本文同样采用 BH 方法来对建筑物进行处理。由于屋顶降雨一般通过排水管直接排入地下雨水管网, 不影响地表径流过程, 故本文不考虑建筑物屋顶产汇流过程, 模型网格和部分建筑物分布情况如图 1 所示。因不考虑建筑物屋顶径流过程, 污染物只考虑均匀分布在非建筑物区域, 每平方米污染物初始分布质量为 28.5 g 。模拟过程中设置了 3 个监测点以分析污染物传输过程, 测点布置如图 1(a) 所示。

2 结果与分析

2.1 区域出口流量与水深变化

对区域出口流量过程进行无量纲化处理(将不同时刻的断面流量除以平衡阶段的流量), 得到不同建筑物密度下区域出口断面无量纲流量变化过程如图 2 所示, 可以看出建筑物的存在会增加坡面径流阻力并延长流路长度, 使得汇流时间延长, 且汇流时间随着建筑物密度的增大呈指数增长^[20]。但在

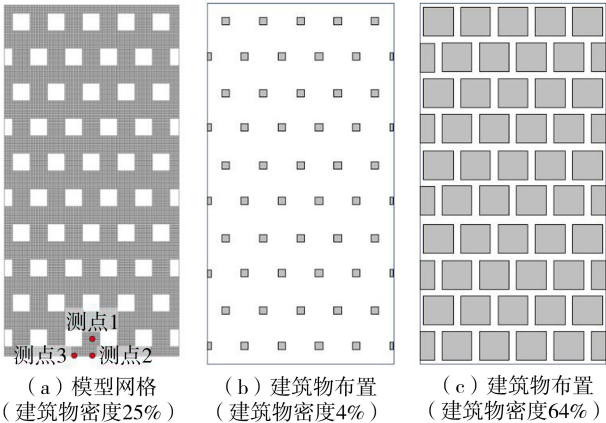


图 1 模型网格和不同建筑物密度下建筑物布置示意图

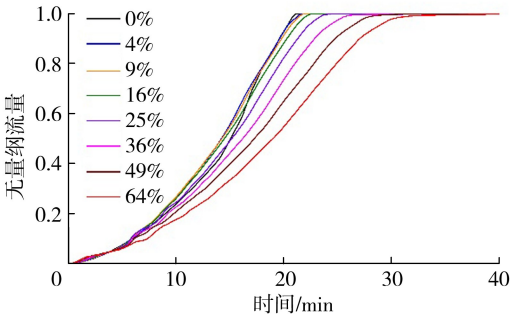


图 2 不同建筑物密度下出口无量纲流量变化

流量上升的中间阶段(5~15 min 时间段), 与小建筑物密度情况(建筑物密度为 4%~16%)相比, 无建筑物情况下的流量上升更缓慢。这主要是因为, 虽然建筑物会增加流路长度和水流阻力, 但在小建筑物密度时这种增加不明显, 而建筑物会减小过水断面、增大断面平均流速, 反而使得流量上升速度加快。

图 3 给出了不同建筑物密度下区域下边界测点 2 的水深变化过程, 在汇流阶段测点水深不断增大, 至流量达到最大时达到最大值。随着建筑物密度的增大, 测点最大水深呈先增大后减小的变化规律, 在建筑物密度为 36% 时达到最大值。这主要是建筑物会减小过水断面面积, 致使水深增加, 但当建筑物密度过高时, 承雨区域产生的降雨径流量会降低。

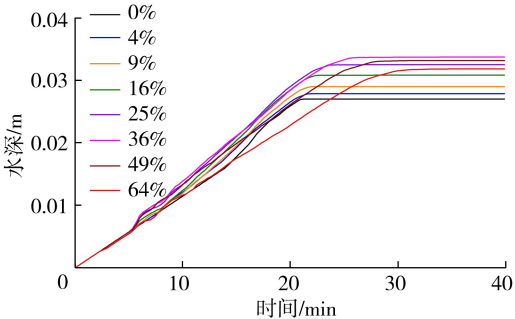


图 3 不同建筑物密度下测点 2 水深变化

2.2 污染物质量浓度变化与分布

污染物质量浓度是衡量水体水质的关键指标,

图4给出了不同建筑物密度下区域出口断面污染物平均质量浓度的变化过程,可以看出污染物质量浓度在降雨初期较高,随后总体呈下降趋势,最终趋于0。这一现象主要归因于降雨初期坡面上可传输污染量比较大,随着降雨的持续,坡面残留的污染物逐渐减少。需要强调的是,污染物初始质量浓度即为质量浓度峰值,这主要由于坡面表面张力作用导致降雨开始与径流形成之间存在一定的时间差。在该时间差内,坡面累积的雨水形成控制层,而本文模拟的溶解态污染物易溶于水,迅速溶解于这部分积水中。因此,降雨初期污染物质量浓度较高,但随着降雨持续与稀释作用,质量浓度迅速降低,后期降幅逐渐趋缓。

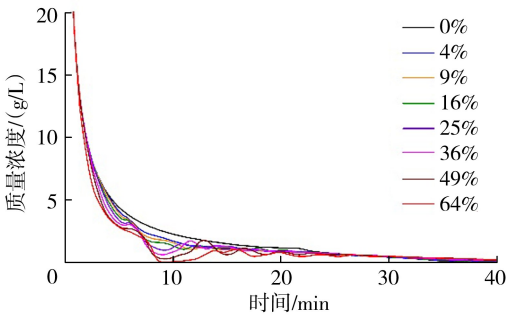


图4 不同建筑物密度下区域出口断面污染物平均质量浓度变化

污染物质量浓度的变化过程与建筑物密度密切相关,具体表现为:①当建筑物密度较低时(不超过9%),污染物质量浓度随时间呈单调递减趋势;②当建筑物密度大于9%时,降雨初期污染物质量浓度下降较快,但在径流达到平衡之前的时间段(5~25 min 区间)会出现多次波动,尤其在建筑物密度为36%和49%时,波动幅度较为显著。这主要与建筑物的布置方式和密度有关。建筑物从上游到下游呈交错的方式布置,上游高质量浓度径流水体受建筑物阻碍,会通过建筑物间隙间歇性传输至区域出口。当建筑物密度较低时,其对水流的阻碍作用较弱,对质量浓度波动的影响不明显。图5~7分别为不同建筑物密度下测点2、3的质量浓度变化和测点1、2的质量浓度变化对比,可以看出位于建筑物间隙内的测点1及其下游的测点2质量浓度变化均呈现出相似的波动特征。由于测点1、2位于两个相邻建筑物间隙内,尽管降雨冲刷会使质量浓度降低,但上游建筑物间隙内的污染物传输至该位置时,会导致测点质量浓度间歇性增大。因测点1位于测点2的上游,其质量浓度波动出现时间较测点2提前(图7);而位于建筑物背水面下游的测点3质量浓度在初期快速降低并趋于0,后期因相邻高质量浓度水体的

扩散作用,出现小幅抬升后再次降低。图8为部分建筑物密度下的污染物质量浓度分布(图中 t 为时间),在降雨初期坡面污染物质量浓度较高,尤其在建筑物迎水面,而背水面质量浓度快速降低。这主要是因为迎水面持续接受上游污染物输入,背水面则始终处于冲刷状态。总体而言,区域上游污染物质量浓度降低较快,污染物通过建筑物间隙向下游传输,并出现间歇性质量浓度增大的现象,与图6和图7结果一致。

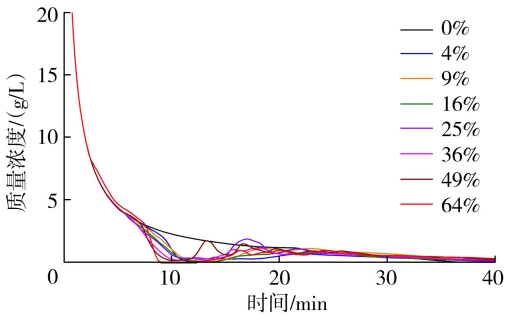


图5 不同建筑物密度下测点2 污染物质量浓度变化

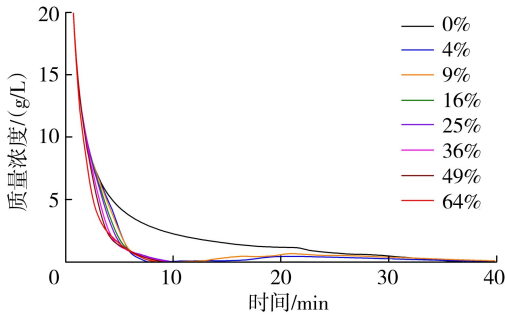


图6 不同建筑物密度下测点3 污染物质量浓度变化

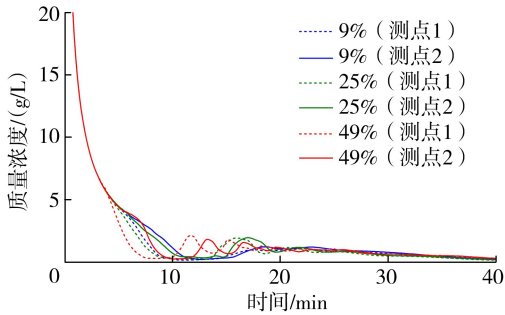


图7 不同建筑物密度下测点1、2 污染物质量浓度变化对比

2.3 污染物累计传输过程

污染物传输率是衡量污染物输移快慢的重要参数。图9为不同建筑物密度下区域出口断面污染物传输率变化过程,无建筑物区域的污染物传输率呈现典型的单峰曲线:从0逐渐上升至峰值,随后逐渐下降,最终趋于0。对于有建筑物的区域,污染物传输率整体上表现为先上升后下降的趋势,但在达到峰值前存在波动现象。总体而言,建筑物密度的增大会导致污染物传输率降低,且峰值出现时间延迟。

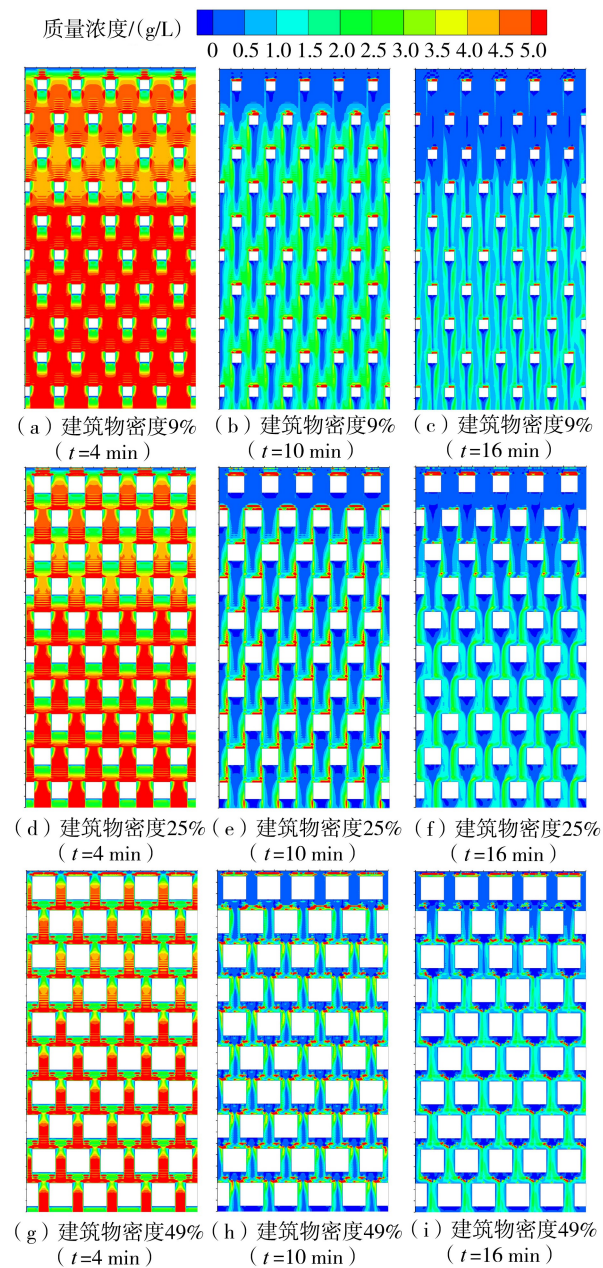


图8 不同建筑物密度下不同时刻的污染物质量浓度分布

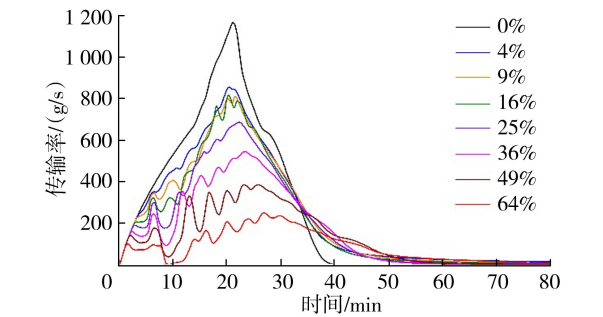


图9 不同建筑物密度下区域出口污染物传输率变化

与图2对比分析可知,不同建筑物密度下污染物传输率峰值出现时间与汇流时间基本一致。这一现象可根据流量与污染物质量浓度的变化过程解释如下:在降雨初期,流量从0开始逐渐增大,污染物质量浓度从初值逐步降低;在有建筑物的情况下,污染

物质量浓度会出现波动,从而导致传输率在流量达到最大值前呈现波动现象;当流量达到最大并趋于稳定后,污染物质量浓度持续下降,因此污染物传输率表现为单调递减趋势,随着区域污染物总量的不断减少,最终趋于0。

图10为不同建筑物密度下区域污染物累计传输比例的变化过程,随着降雨的进行,污染物累计传输比例逐渐上升,最终趋于稳定。在降雨初期,由于污染物传输率较低,累计传输比例增长缓慢;后期传输率上升,累计传输比例增长加快。但随着区域内残留污染物逐渐减少,累计传输比例增长速率减缓并趋于稳定。总体而言,建筑物会延缓污染物传输,且建筑物密度越高,污染物最终传输比例越低。图11给出了不同建筑物密度下区域径流层污染物比例的变化过程,在降雨初期,随着水深的增大,径流层污染物比例迅速上升至最大值,随后逐渐下降并趋于0。最大峰值接近0.9,表明约90%的污染物通过与控制层混合进入径流层。径流层污染物比例的峰值出现在汇流时间之前,并随着建筑物密度的增大而减小。在峰值附近,径流层污染物比例也会出现小幅波动,这主要与区域局部径流水深和质量浓度的变化有关。

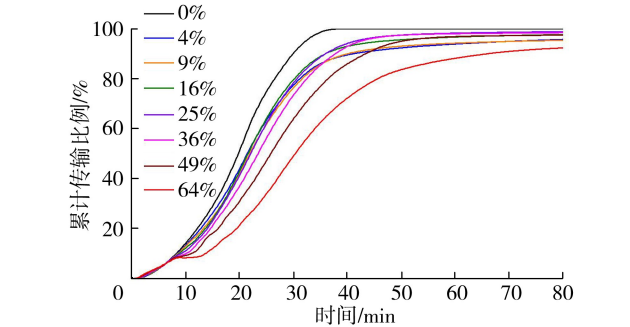


图10 不同建筑物密度下区域污染物累计传输比例变化

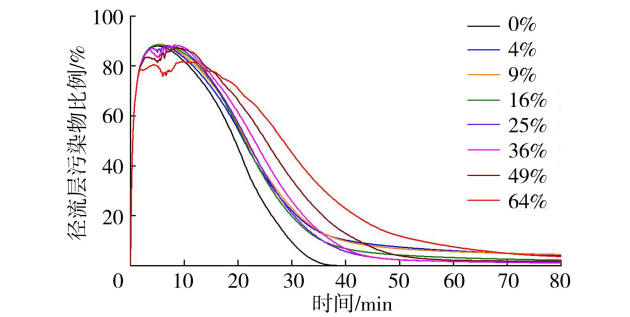


图11 不同建筑物密度下区域径流层污染物比例变化

3 结 论

a. 建筑物密度处于4%~16%区间时,汇流中间阶段流量上升速率相对较快。随着建筑物密度的增大,建筑物间隙下游水深变化呈现先增大后减小

的规律,在建筑物密度为 36%时水深达到最大值。

b. 建筑物密度不超过 9%时,区域出口污染物质量浓度随降雨过程呈现单调递减趋势。建筑物密度大于 9%时,区域出口污染物质量浓度初期下降迅速。在建筑物交错排列的情况下,上游高质量浓度径流水体通过建筑物间隙间歇性传输至区域出口,导致在流量达到最大值前的时段内,污染物质量浓度出现多次波动。建筑物密度为 36%和 49%时质量浓度波动幅度较为显著。

c. 区域出口污染物传输率整体上表现为先上升后下降的趋势,但在达到峰值前会出现波动现象。随着建筑物密度的增大,污染物传输率降低,峰值出现时间延迟,且峰值时间与汇流时间基本一致。污染物累计传输比例随降雨进行逐渐增大并趋于稳定,最终累计传输比例随建筑物密度的增大而降低。

参考文献:

[1] LUO Yuzhou, SPURLOCK F, JIANG Weiyong, et al. Pesticide washoff from concrete surfaces: literature review and a new modeling approach[J]. Water Research, 2013, 47(9): 3163-3172.

[2] RIO M, SALLES C, CERNESSON F, et al. An original urban land cover representation and its effects on rain event-based runoff and TSS modelling [J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124865.

[3] 陈亚松, 闫玉亭, 朱雅婷, 等. 重庆主城区降雨径流污染特征及其社会影响因素分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 117-125. (CHEN Yasong, YAN Yuting, ZHU Yating, et al. Characteristics of rainfall-induced runoff pollution and its social influencing factors in main urban area of Chongqing City[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 117-125. (in Chinese))

[4] NAVES J, RIECKERMANN J, CEA L, et al. Global and local sensitivity analysis to improve the understanding of physically-based urban wash-off models from high-resolution laboratory experiments[J]. Science of the Total Environment, 2020, 709: 136152.

[5] 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): 35-37. (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): 35-37. (in Chinese))

[6] 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))

[7] 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(1/2/3/4): 88-102.

[8] 栾广学, 侯精明, 马鑫, 等. 建筑小区尺度下径流控制率与非点源污染负荷削减率协同关系研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 208-215. (LUAN Guangxue, HOU Jingming, MA Xin, et al. Research on synergistic relationship between runoff control rate and non-point source pollution load reduction rate at residential community scale[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 208-215. (in Chinese))

[9] LIANG Dongfang, ÖZGEN I, HINKELMANN R, et al. Shallow water simulation of overland flows in idealised catchments[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(11): 7307-7318.

[10] SHENG Y, YING G, SANSALONE J. Differentiation of transport for particulate and dissolved water chemistry load indices in rainfall-runoff from urban source area watersheds[J]. Journal of Hydrology, 2008, 361(1/2): 144-158.

[11] GOONETILLEKE A, THOMAS E, GINN S, et al. Understanding the role of land use in urban stormwater quality management [J]. Journal of Environmental Management, 2005, 74(1): 31-42.

[12] 何流. 人工降雨模拟地表污染物冲刷规律及初期效应分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.

[13] 张超, 姜应和, 金建华, 等. 不同下垫面径流污染物冲刷规律研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(8): 128-132. (ZHANG Chao, JIANG Yinghe, JIN Jianhua, et al. Study on rainwater pollutant washoff rate in different underlying surface [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(8): 128-132. (in Chinese))

[14] XIAO Yang, ZHANG Taotao, LIANG Dongfang, et al. Experimental study of water and dissolved pollutant runoffs on impervious surfaces [J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(1): 162-165.

[15] XIAO Yang, ZHANG Taotao, WANG Lei, et al. Analytical and experimental study on dissolved pollutant wash-off over impervious surfaces [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(25): 4520-4529.

[16] 肖洋, 王磊, 张涛涛, 等. 不透水表面坡度对溶解态污染物传输过程的影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 74-79. (XIAO Yang, WANG Lei, ZHANG Taotao, et al. Influence of slope on the dissolved pollutant transport process over impervious surface [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 74-79. (in Chinese))

(下转第 59 页)

式及其检验[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(5): 75-79. (LI Ruohua, SHI Yingbiao, ZHANG Shuyu. Prediction model of salinity-resisting discharge in Qiantang Estuary and its validation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(5): 75-80. (in Chinese))

[6] 韩曾萃, 程杭平. 钱塘江江水含盐度计算的研究[J]. 水利学报, 1981(6): 46-50. (HAN Zengcui, CHENG Hangping. Study on calculation of salinity in Qiantang River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1981(6): 46-50. (in Chinese))

[7] 卢祥兴. 钱塘江河口盐水入侵的模型试验[J]. 水利水运科学研究, 1991(4): 403-410. (LU Xiangxing. Model experiment on saltwater intrusion of the Qiantang River estuary[J]. Research on Water Conservancy and Water Transport Science, 1991(4): 403-410. (in Chinese))

[8] 罗小峰, 陈志昌. 径流和潮汐对长江口盐水入侵影响数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2005, 24(3): 1-6. (LUO Xiaofeng, CHEN Zhichang. Numerical simulation study of effect of runoff and tide on the Changjiang River mouth saltwater intrusion[J]. Coastal Engineering, 2005, 24(3): 1-6. (in Chinese))

[9] LIU Bingjun, LIAO Yeying, YAN Shulan, et al. Dynamic characteristics of saltwater intrusion in the Pearl River Estuary, China[J]. Natural Hazards, 2017, 89(3): 1097-1117.

[10] 潘存鸿, 张舒羽, 史英标, 等. 钱塘江河口盐水入侵影响因素及数值预报[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(6): 13-19. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, SHI Yingbiao, et al. Factors and numerical forecast of saltwater intrusion in Qiantang River Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6): 13-19. (in Chinese))

[11] 韩曾萃, 程杭平, 史英标, 等. 钱塘江河口咸水入侵长历时预测和对策[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 232-240. (HAN Zengcui, CHENG Hangping, SHI Yingbiao, et al. Long-term predictions and countermeasures of saltwater intrusion in the Qiantang Estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2): 232-240. (in Chinese))

[12] 李若华, 黄士稳. 钱塘江河口水质时段离散程度及对污染物通量估算的影响[J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 36-39. (LI Ruohua, HUANG Shiwen. Dispersion degree of water quality and its influence on the estimation for pollutant fluxes in Qiantang Estuary [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(1): 36-39. (in Chinese))

[13] 潘存鸿, 韩曾萃, 等. 钱塘江河口保护与治理研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017: 1-2.

[14] 李若华, 马继侠, 张舒羽, 等. 强潮作用下钱塘江河口盐水入侵机制[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 37-44. (LI Ruohua, MA Jixia, ZHANG Shuyu, et al. Saltwater intrusion mechanism in the Qiantang River estuary under strong tide [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 37-44. (in Chinese))

[15] 潘存鸿, 张舒羽, 史英标, 等. 涌潮对钱塘江河口盐水入侵影响研究[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1301-1309. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, SHI Yingbiao, et al. Study on saltwater intrusion in Qiantang Estuary affected by tidal bore[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(11): 1301-1309. (in Chinese))

[16] 李若华, 夏冬梅, 姚凯华. 钱塘江河口七堡段氯度时空变化及与水文的关系[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 21-25. (LI Ruohua, XIA Dongmei, YAO Kaihua. Temporal and spatial variation of chlorinity and its relationship with hydrology in Qibao Section of Qiantang Estuary[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 21-25. (in Chinese))

[17] LI Ruohua, GAO Liang, PAN Cunhong, et al. Detecting the mechanisms of longitudinal salt transport during spring tides in Qiantang Estuary [J]. Journal of Integrative Environmental Sciences, 2019, 16(1): 123-140.

(收稿日期: 2024-07-26 编辑: 俞云利)

(上接第 44 页)

[17] ZHANG Taotao, XIAO Yang, LIANG Dongfang, et al. Rainfall runoff and dissolved pollutant transport processes over idealized urban catchments [J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 305.

[18] ZHANG Taotao, XIAO Yang, LIANG Dongfang, et al. A physically-based model for dissolved pollutant transport over impervious surfaces[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125478.

[19] ZHANG Taotao, XIAO Yang, LIANG Dongfang, et al. A two-layer model for studying 2D dissolved pollutant runoff over impermeable surfaces [J]. Hydrological Processes, 2021, 35(5): e14152.

[20] 肖洋, 冯雯, 张涛涛, 等. 建筑物密度及排列方式对小区地表径流的影响[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(4): 1-6. (XIAO Yang, FENG Wen, ZHANG Taotao, et al. Effects of building density and arrangement on surface runoff process in urban resident [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(4): 1-6. (in Chinese))

[21] LIANG Dongfang, WANG Xiaolin, FALCONER R A, et al. Solving the depth-integrated solute transport equation with a TVD-MacCormack scheme [J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(12): 1619-1629.

(收稿日期: 2024-08-04 编辑: 熊水斌)