

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.01.010

# 城市屋面降雨冲刷污染物变化模型模拟研究

陈伟伟<sup>1</sup>, 吴晓楷<sup>2</sup>, 李自明<sup>1</sup>

(1. 黄河水利科学研究院 水利部黄河泥沙重点实验室, 河南 郑州 450003;

2. 海河水利委员会 漳卫南运河管理局, 山东 德州 253009)

**摘要:** 城市屋面降雨径流污染是受纳水体质量恶化的主要影响因素。以典型屋面作为汇水单元, 开展天然降雨情况下雨水径流水文水质过程监测试验, 水质指标包括 SS、COD、TN。利用雨水径流产流负荷替代降雨强度校正了传统冲刷模型, 研究有效降雨深度与径流水质之间的相关函数关系, 构建了雨水径流污染物浓度变化模型, 对相关参数进行求解。模型模拟的 SS、COD、TN 的浓度变化过程精度较高, 纳什效率系数均在 0.87 以上。表明模型的实用性较好, 可为城市雨水资源高效利用、面源污染控制技术与措施制定、海绵城市建设等提供依据。

**关键词:** 城市屋面; 降雨径流; 污染物浓度; 冲刷; 模型模拟

中图分类号: X502

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)01-0048-04

## Simulation Model of Rainfall Wash-off Pollutant on Urban Roof

CHEN Weiwei<sup>1</sup>, WU Xiaokai<sup>2</sup>, LI Ziming<sup>1</sup>

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Key Laboratory of Yellow River Sediment Research, the Ministry of Water Resources, Zhengzhou, He'nan 450003, China; 2. Zhang River, Wei River and South Canal Administration, Haihe River Water Conservancy Commission, Dezhou, Shandong 253009, China)

**Abstract:** Rainfall runoff pollution from urban roof is one of the major influencing factors for the deterioration of receiving water body. With the typical urban roof as the catchment unit, in this research we conducted series of experiments to monitor the hydrology and water quality change of rainwater-runoff under natural rainfall conditions. Water quality monitoring indicators included SS, COD, TN. Using the rainfall runoff generation load instead of rainfall intensity to correct the traditional erosion model, we analyzed the function relationship between runoff water quality and effective rainfall depth, and developed the rainfall-runoff pollutants concentration change model and calibrated the relevant parameters. The accuracy of SS, COD and TN concentration variation process was higher in model simulation, and the Nash efficiency coefficients were over 0.87. It turned out the model is practical which can provide evidence for effectively utilizing urban rainfall resources, non-point source pollution of management technologies and measures, sponge city construction and so on.

**Keywords:** urban roof; rainfall runoff; pollutant concentration; wash-off; model simulation

城市单次降雨过程中积累于不透水面上的污染物部分或全部被冲刷掉或溶入径流是一个较为复杂的过程。初始降雨湿润了污染物后, 可溶性污染物首先被冲洗, 在雨水填满坑洼低地形成径流后, 各种可溶性污染物随着地表径流而运动。对于非可溶性物质, 当启动流速低于水流流速时, 其上附着的固体颗粒随之运动。最终, 均随雨水径流进入雨水口, 并通过雨水管网排入受纳水体。

上述污染物冲刷过程与许多因素关系密切。在不同城市间, 由于径流水深、流速等的不同, 影响了冲洗污染物的效果, 使得溶性和非可溶性污染物的冲洗过程不同; 降雨强度通过径流水深和流速影响冲洗效果, 以及土地利用类型、下垫面清扫情况、降雨历时、前期干旱天数等因素也与之有关。研究表明<sup>[1-12]</sup>, 降雨径流存在汇集过程, 污染物运移与汇流形成之间存在时间差。因此, 分析降雨径流与径

收稿日期: 2016-10-17

修稿日期: 2016-11-14

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(HKY-JBYW-2016-46); 国家自然科学基金项目(51379085)

作者简介: 陈伟伟(1980—), 男, 河南宜阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水资源与水环境研究。E-mail: chenwei0217@126.com

流中污染物冲刷的关系,可以降低时间差所形成的模型误差,也为精确模拟径流污染强度和污染物运移变化过程提供基础。

### 1 径流冲刷模型构建

径流污染物冲刷速率可用包含污染量和降雨强度的模型表示,并呈线性相关关系<sup>[13-14]</sup>,如式(1)所示:

$$W_r = - \frac{dM}{dt} = cRM \quad (1)$$

式中:  $W_r$  为冲刷速率,  $mg/(m^2 \cdot min)$ ;  $c$  为冲刷系数,  $mm$ ;  $R$  为平均降雨强度,  $mm/min$ ;  $M$  为残留污染量,  $mg/m^2$ ;  $t$  为降雨时间,  $min$ 。

式(1)在研究污染冲刷量时,忽略了未形成径流的前期降雨,也没有分析降雨与污染冲刷之间的非同步性。采用区域表面产流负荷替代降雨强度,如式(2)所示:

$$R_{ef} = \frac{Q(t)}{A} \quad (2)$$

式中:  $R_{ef}$  为产流负荷,  $mm/min$ ;  $Q(t)$  为流量,  $m^3/s$ ;  $A$  为汇流面积,  $m^2$ 。

将式(2)代入式(1)后积分可得:

$$M = M_0 \exp\left[-\frac{c}{A}V(t)\right] \quad (3)$$

式中:  $M_0$  为累积污染量,  $mg/m^2$ ;  $V(t)$  为降雨径流量,  $L$ 。

令:

$$\frac{V(t)}{A} = H_{ef} \quad (4)$$

$$C(t) = \frac{AW_r}{Q(t)} \quad (5)$$

式中:  $H_{ef}$  为径流产流深度,  $mm$ ;  $C(t)$  为径流污染物浓度,  $mg/L$ 。式(3)、式(4)、式(5)合并可得:

$$C(t) = cM_0 \exp[-cH_{ef}] \quad (6)$$

式(6)可用作污染物浓度计算。对于单场次降雨,可变形为:

$$\ln C(t) = \ln cM_0 - cH_{ef} \quad (7)$$

式(7)中,污染物浓度  $\ln C(t)$  与径流深  $H_{ef}$  之间为线性关系,其中,  $-c$  为斜率,  $\ln cM_0$  为截距。

### 2 模型参数分析与确定

#### 2.1 产流负荷对冲刷系数影响

采用式(6)分析污染物浓度的变化时,出现前期浓度高于中、后期的现象,主要原因在于降雨强度对污染物冲刷系数影响很大,随着雨强、径流深的变化而变化<sup>[14-15]</sup>。结合已有研究结果<sup>[15]</sup>,对冲刷系数

修正如下:

$$c = \frac{a}{1.1 - \exp\left(-\frac{H_{ef}^\delta}{b}\right)} \times R_{ef}^\delta + 0.01 \quad (8)$$

式中:  $c$  为冲刷系数,  $1/mm$ ;  $a$ 、 $\delta$  为待定系数;  $H_{ef}$  为  $t$  时刻的有效降雨深度;  $b$  为  $1 mm$  时即将有效降雨深度无量纲化所需的值。

将式(8)代入式(3)、式(5)积分变形可得:

$$C(t) = M_0 c \exp\left[(-0.01H_{ef}) - \int_0^t (c - 0.01)R_{ef}dt\right] \quad (9)$$

可见,初始污染物浓度与地表面产流负荷之间呈线性相关关系,同时,径流后期污染物浓度与有效降雨深度、地表产流负荷之间也呈相关关系,地表产流负荷的加大也可能使得污染物浓度增加。

#### 2.2 冲刷模型校验

试验研究区域为某单位办公楼顶,坡度 1.0%,长宽为 7.50 m × 18.05 m,利用雨落管收集后进行水量、水质监测。在四场小强度降雨中对屋面雨水径流开展试验监测,利用式(7)分析模型精度,分析结果如图 1、图 2、图 3 所示。

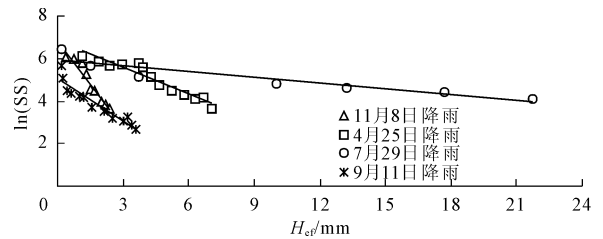


图 1 屋面 SS 冲刷规律

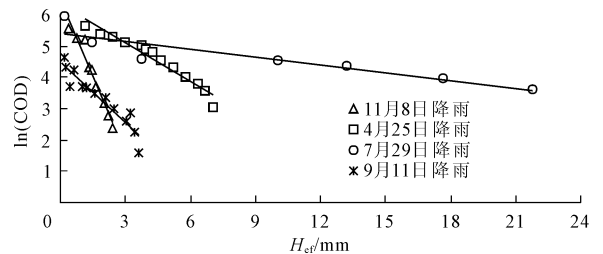


图 2 屋面 COD 冲刷规律

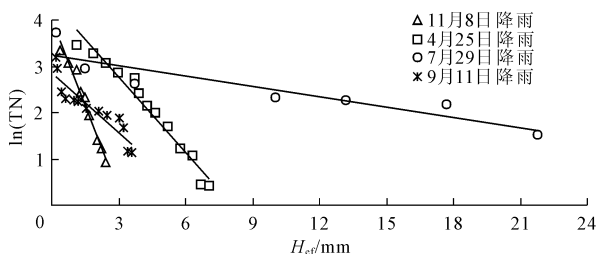


图 3 屋面 TN 冲刷规律

由图 1、图 2、图 3 可以看出,污染物浓度  $\ln C(t)$  与有效降雨强度深度  $H_{ef}$  呈良好的线性关系,SS、COD、TN 相关系数  $R^2$  平均分别为 0.899、0.901、0.902。可见,在降雨强度被地表产流负荷替代后,不仅降低了降雨径流与污染物冲刷之间存在的时间差,也提高了污染物的模拟精度。同时,屋面受人类活动影响很小,降雨是引起污染物冲刷的主要原因,也使得相关系数较高。

根据式(8),计算 SS、COD、TN 的冲刷系数分别为 0.629、0.688、0.571,总体差异较小。主要原因在于 COD、TN 在 SS 上的附着性较高,冲刷过程中表现出很好的相关性。COD 的冲刷系数略高,主要受下垫面沥青 SBS 材料析出物所致,降雨条件下溶解性污染物更容易被冲刷至雨水径流中。

当有效降雨深度大于 10 mm 时,不透水面上累积的污染物已大体输送结束,污染物浓度基本趋于稳定,此时地表剥离对污染物二次积累的影响增加,导致污染物冲刷过程不再服从于冲刷规律<sup>[5]</sup>。因此,污染物的浓度变化过程不宜采用上述公式分析,应采用趋于基本稳定的降雨后期浓度表征。由此可见,前 3 mm 的降雨径流是形成径流污染的主要阶段<sup>[3-5]</sup>,天然情况下也应以小强度降雨事件为主,污染物冲刷规律研究也应集中于有效降雨深不超过 10 mm 的径流过程。

### 2.3 模型参数确定

降雨过程中冲刷系数存在变化过程,利用式(7)、式(8)对降雨过程中冲刷系数的变化参数进行分析,如式(10)所示:

$$\ln(c - 0.01) = \ln 10a + \delta \ln R_{ef} \quad (10)$$

式中:降雨  $\ln(c - 0.01)$  分别与  $\ln R_{ef}$  呈线性关系,斜率为  $\delta$ ,截距为  $\ln 10a$ ;符号意义同上。

对屋面径流初始、末端降雨径流污染进行监测,采用式(10)计算冲刷系数的计算参数,计算结果见表 1。

表 1 污染物冲刷系数的计算参数

污染物	序号	$\delta$	$a$	$\bar{\delta}$	$\bar{a}$
SS	起端	0.72	0.80	1.82	1.56
	末端	0.88		1.29	
COD	起端	0.73	0.71	1.83	1.58
	末端	0.69		1.32	
TN	起端	0.62	0.68	1.57	1.53
	末端	0.75		1.49	

由表 1 可知,不同类型污染物的冲刷系数有关计算参数差别较小,原因在于同场次降雨中污染物

冲刷具有较好的相关性。此外,冲刷系数相关计算参数具有地域性、时效性等特征,表 1 中计算参数值是在低强度降雨条件下的分析结果,不同研究区域应对其进行重新校正。

## 3 屋面雨水径流冲刷模型验证

同场次降雨中 SS 与 COD、TN 的冲刷具有相似性,相关系数  $R^2$  在 0.87 以上。因此,在冲刷规律模拟中以 SS 为基础模拟污染物,对屋面污染物冲刷过程进行模拟,其中研究区参数  $\delta$  为 0.80,  $a$  为 1.56,  $M_0$  为 550 mg/m<sup>2</sup>。屋面径流冲刷系数变化如图 4 所示,SS、COD、TN 浓度变化分别如图 5、图 6、图 7 所示。选用纳什模拟效率系数( $C_{ns}$ )评价模型计算结果,  $C_{ns}$  值均在 0.87 以上,表明该模型在该区域具有较好的模拟效果。

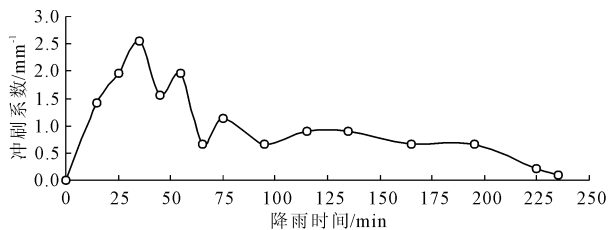


图 4 屋面径流过程冲刷系数变化

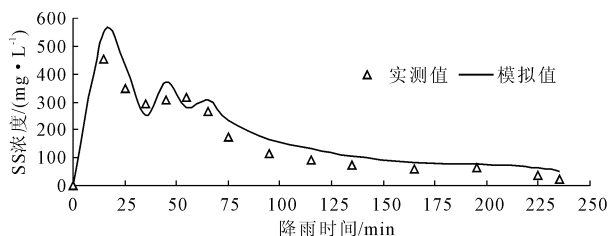


图 5 屋面径流 SS 浓度变化模拟

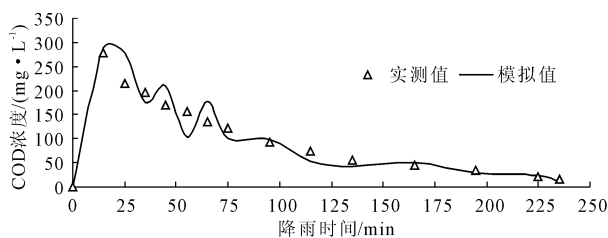


图 6 屋面径流 COD 浓度变化模拟

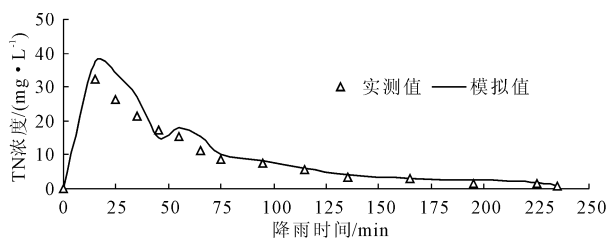


图 7 屋面径流 TN 浓度变化模拟

由图4可以看出,污染物冲刷过程中,冲刷系数是变化的,即随着降雨过程的持续,表现为初期迅速升高、后期缓慢降低的趋势。根据式(8)的分析结果,降雨产流负荷对冲刷系数的影响较大,在初期阶段产流负荷增加迅速,使得冲刷系数升高。随着降雨过程的持续,冲刷系数达到峰值后呈下降趋势。由于屋面汇水面积较小,污染物浓度峰值出现较早,径流污染物更趋向于前期输送。

由图5、图6、图7分析可知,冲刷系数受地表产流负荷、降雨径流深的影响之后,对冲刷系数参数模型进行修定,污染物浓度变化的模拟过程与实测值吻合性较好,可见,模拟精度较高。在后期污染物浓度的模拟出现了误差,其原因在于径流末期地表累积的污染物基本被全部冲刷,人类活动、随机因素等对水质的影响增加;同时,污染物二次释放过程、地表侵蚀过程也会使得污染物量继续增加,模拟精度降低。

## 4 结 语

(1) 利用雨水径流产流负荷代替降雨强度,对传统冲刷模型进行校正,分析了有效降雨深度与径流水质之间的函数关系,避免了汇流时间差所导致的模型误差,为模拟污染强度和污染物运移变化过程提供基础。

(2) 降雨强度对污染物冲刷系数的影响较大,具有地域性特征。因此,对冲刷系数的计算参数公式进行了修正,利用研究区域特征值、试验监测结果等,对其分析计算。

(3) 根据污染物浓度变化过程和冲刷系数的计算情况,对试验区屋面雨水径流中SS、COD、TN的变化过程进行模拟,其结果与实测的拟合性较好, $C_{ns}$ 值均在0.87以上。

(4) 雨水径流污染是一个较为复杂的过程,研究降雨径流污染物冲刷变化过程,需要大量的试验监测结果,可以避免随机因素带来的误差。同时,雨水径流污染的形成是开放的,污染物类型呈多元化态势。因此,下一步应拓展研究尺度,增加污染物监测指标,开展不同区域的雨水径流污染规律研究。

### 参考文献:

[1] 王宝山.城市雨水径流污染物输移规律[D].西安:西安

建筑科技大学,2011.

- [2] Egodawatta P, Thomas E, Goonetilleke A. Understanding the physical processes of pollutant build-up and wash-off on roof surfaces[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(6):1834-1841.
- [3] Kahinda J M, Taighenu A E, Boroto J R. Domestic rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2007, 32(15/18):1050-1057.
- [4] 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.
- [5] 赵 晓.苏州市高新区不透水表面雨水径流污染与控制研究[D].苏州:苏州科技学院,2012.
- [6] 陈伟伟,薛建国,郭 宇,等.城市屋面降雨径流污染物一维运移规律研究[J].*灌溉排水学报*, 2016, 35(S1):54-56.
- [7] 陈伟伟,张会敏,黄福贵,等.城区屋面雨水径流水文水质特征研究[J].*水资源与水工程学报*, 2011, 22(3):86-88.
- [8] 陈伟伟,张会敏,张建斌,等.城区路面径流水质特征与初期径流量研究[J].*水利与建筑工程学报*, 2013, 11(5):123-125, 177.
- [9] 陈伟伟,申继先,卞艳丽,等.城区雨水管网径流污染特征研究[J].*水资源与水工程学报*, 2014, 25(5):85-88.
- [10] 田少白.北方城市雨水径流污染特征及生态化利用研究[D].邯郸:河北工程大学,2013.
- [11] 任南琪,冯玉杰,陈 卫,等.城市水系统污染物转化规律及资源化理论与技术[M].北京:科学出版社,2012.
- [12] 荆红卫,华 蕾,陈圆圆,等.城市雨水管网降雨径流污染特征及对受纳水体水质的影响[J].*环境化学*, 2012, 31(2):208-215.
- [13] Soonthornonda P, Christensen E R, Liu Y, et al. A wash off model for stormwater pollutants[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 402(2/3):248-256.
- [14] Egodawatta P, Thomas E, Goonetilleke A. Mathematical interpretation of pollutant wash-off from urban road surfaces using simulated rainfall [J]. *Water Research*, 2007, 41(13):3025-3031.
- [15] Osuch-Pajdzińska E, Zawilski M. Model for storm sewer discharge II: Calibration and verification[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1998, 124(7):600-611.