

镇江城市道路雨水径流污染预测

吴春笃³, 汝梅², 黄卫东¹, 张波³, 陶明清⁴

(1. 中国科学技术大学地球与空间科学系, 安徽合肥 230026; 2. 中国科学技术大学网络信息中心, 安徽合肥 230026;
3. 江苏大学环境学院, 江苏镇江 212013; 4. 江苏镇江中天城市水务环保有限公司, 江苏镇江 212001)

摘要:以模拟平均偏差为比较标准, 采用单纯形算法和基因算法, 优化模型参数, 得到了6种雨水径流污染模型参数和模型拟合的平均偏差, 比较了基于污染物累积和冲刷过程建立的这6种雨水径流污染模型在镇江道路路面雨水径流污染模拟方面适用性。计算表明, 不同方法所得结果相近, 平均相对偏差约为10%。

关键词:雨水径流污染; 模型; 参数优化; 累积模型; 冲刷模型

中图分类号:X502 **文献标识码:**A

Prediction of stormwater pollutants on road of urban Zhenjiang

WU Chun-du³, RU Mei², HUANG Wei-dong¹, ZHANG Bo³, TAO Ming-qing⁴

(1. School of Earth and Space Sci., University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Network Information Center, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. College of Environmental Eng., Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
4. Zhenjiang Zhongtian Municipal Water and Environmental Protection Ltd, Zhenjiang 212001, China)

Abstract: It has been proposed that stormwater pollutants from impervious surfaces can be modeled as buildup process during dry periods, and washoff of the accumulated pollutants during rainfall events. 6 different stormwater pollutant models including buildup and washoff processes were compared based on the average error of the model prediction. The model parameters were optimized with simplex and genetic algorithm. The result indicates that all six model predictions gave about 10% relative error.

Key words: stormwater pollutants; model; parameter calibration; buildup; washoff

0 引言

雨水径流污染产生包括污染物晴天累积和雨天冲刷两个过程。它们均受复杂因素控制, 使雨水径流污染预测和模拟变得非常复杂; 目前国外发达国家针对污染物晴天累积和雨天冲刷两个过程建立了多个模型, 这些模型是否能用于我国的径流污染预测? 如何选择模型并确定最佳模型参数是预测和控制雨

水径流污染需要解决的技术问题。

随着我国工业污水和城市生活污水等点源污染治理工作的深入, 雨水径流带来的面源污染对地面水环境的影响越来越大。在发达国家, 如美国, 面源污染占水体污染总量的2/3左右^[1], 已成为美国天然水体污染的主要原因。因此, 在国外发达国家, 城市面源污染控制已成为城市建设和管理的主要工作之一。如何更加有效地设计规划、改造和管理城市雨

收稿日期: 2007-03-18; 修回日期: 2007-09-27

基金项目: 国家科技部镇江城市水环境专项课题(2003AA60100-3-4)资助。

作者简介: 吴春笃, 男, 1962年生, 博士/教授。研究方向: 环境污染治理。E-mail: chunduwu@sohu.com

通讯作者: 黄卫东, 博士/副教授。E-mail: huangwd@ustc.edu.cn; Tel: 0551-3606631

水管理系统,减小雨水径流污染对城市水环境影响,应是我国面源污染控制今后相当长时间内的主要工作之一。

雨水径流污染控制的主要方面是水质和水量的预测。正确的水量预测将有助于有效控制洪水、保护水质和公共安全。对水质的正确了解和控制是确保城市高质量环境的基本要求。目前已有多家单位开展雨水径流污染特点及其模拟的研究。赵剑强和孙奇清^[2],何庆慈等^[3]报道了城市雨水径流污染特征。曾晓岚等^[4]采用将径流污染物浓度与径流速率和径流时间相关联,但结果与实测相比偏差较大;叶阍等^[5]、车武等^[6]以及郭凤台等^[7]采用冲刷模型模拟了单次降雨污染物浓度。方红远和陈志春^[8]以及张伟和周永潮^[9]采用不同方法估算了城市一次降雨径流污染总负荷。这些工作均没有解决雨水径流污染水质水量随时间变化的预测。

与径流污染相关的过程主要包括地表污染物累积、暴雨冲刷和污染物传输等^[10],目前国内的研究工作还未见报道同时标定污染物累积、冲刷和传输的模型参数。检验这些模型在我国的应用前景,从而有助于预测径流污染排放水质水量随时间变化情况。本文以镇江市内某城市道路路面雨水径流污染为研究对象,比较研究了不同的污染物累积和冲刷模型对径流水质水量的预测结果。

1 计算模型

产生雨水径流污染的主要过程包括晴天地面污染物的积累和雨天的冲刷。地面污染物的积累量主要与污染物雨前累积时间相关。模拟污染物晴天累积效应的模型包括幂函数、指数函数和饱和函数法^[11]。对幂函数模型,单位面积上污染物累积量 B_T 采用下式进行计算:

$$B_T = \min(B_0, B_1 T^{B_2}) \quad (1)$$

式中, T 是污染物雨前累积时间; B_0 是单位面积污染物最大累积量; B_1 是污染物累积速率常数; B_2 是时间指数。

指数函数法是本文比较研究采用的模拟计算污染物累积效应的第二种模型,其计算方法如下:

$$B_T = B_L + (B_0 - B_L) * \exp(-B_1 * T) \quad (2)$$

式中, B_L 是污染物累积前地面遗留的污染量。饱和函数法是本文比较研究采用的模拟计算污染物累积效应的第三种模型,其计算方法如下:

$$B_T = B_L + (B_0 - B_L) \frac{T}{B_3 + T} \quad (3)$$

其中, B_3 是污染物累积半饱和常数(污染物积累到最大累积量一半所需时间),

污染物冲刷模型主要比较研究了指数函数法和标定曲线法^[12],其中指数函数法,单位时间单位面积污染物冲刷量 W 表示为

$$W = C_1 q^{C_2} B \quad (4)$$

式中, C_1 是冲刷系数; C_2 是冲刷指数; B 是 t 时刻地面可冲刷污染量; q 是单位面积径流量。

在标定曲线法中,单位时间单位面积污染物冲刷量 W 表示为

$$W = C_1 q^{C_2} \quad (5)$$

以污染物晴天累积的饱和函数法和雨水冲刷的指数函数法为例,根据式(4)得到

$$dB = -Wdt = -C_1 q^{C_2} Bdt \quad (6)$$

将上式积分得到

$$B = B_T \exp\left(-C_1 \int_0^t q(t)^{C_2} dt\right) \quad (7)$$

因此,我们得到径流污染物浓度 C

$$\begin{aligned} C &= C_0 + W/q = \\ &C_0 + C_1 q^{C_2-1} B_T \exp\left(-C_1 \int_0^t q(t)^{C_2} dt\right) = \\ &C_0 + C_1 q^{C_2-1} \left(B_L + (B_0 - B_L) \frac{T}{B_1 + T}\right) \cdot \\ &\exp\left(-C_1 \int_0^t q(t)^{C_2} dt\right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, C_0 是雨水落地前所含污染物浓度; C_1 , C_2 和 B_0 是参数,含意如前所述; $q(t)$ 是径流量随时间变化的函数,可以根据径流模型进行计算,常用的径流模型可以简单表示为

$$\frac{dh}{dt} = i - f - q \quad (9)$$

式中, h 为地面径流平均深度; i 为降雨强度; f 为渗透率。该模型假定在集水区出口以一定水深 $h - h_0$ 均匀流出, h_0 为地表平均蓄水深度,因此,对该地地表流,基于曼宁公式:

$$q = \frac{1}{nl} (h - h_0)^{5/3} S^{0.5} \quad (10)$$

这里, l 为集水区长度; n 为集水区平均曼宁糙率系数; S 为集水区平均地表坡度。将式(10)代入式(9),采用数值方法,可计算 $q(t)$ 。

优化和评价指标可根据模型预测值与实验值相对偏差进行,如下式:

表 1 根据径流污染模型推导的径流污染物浓度与径流时间的关系

Tab. 1 Relationship between waste concentration in stormwater and time

序号	模型		径流污染物浓度 C 与径流时间 t 关系
	累积	冲刷	
1	饱和	指数函数	$C = C_0 + C_1 q^{C_2-1} \left(B_L + (B_0 - B_L) \frac{T}{B_3 + T} \right) \exp \left(-C_1 \int_0^t q(t) C_2 dt \right)$
2	饱和	曲线数	$C = C_0 + C_1 q^{C_2-1}$ if $B > 0$
			$C = C_0$ if $B \leq 0$
3	指数	指数	$C = C_0 + C_1 q^{C_2-1} (B_L + (B_0 - B_L) * \exp(-B_1 * T)) \exp \left(-C_1 \int_0^t q(t) C_2 dt \right)$
4	指数	曲线数	$C = C_0 + C_1 q^{C_2-1}$ if $B > 0$
			$C = C_0$ if $B \leq 0$
5	幂	指数	$C = C_0 + C_1 q^{C_2-1} (B_L + B_0 T^{B_1}) \exp \left(-C_1 \int_0^t q(t) C_2 dt \right)$ ($B_L + B_0 T^{B_1} < B_{max}$)
			$C = C_0 + C_1 q^{C_2-1} B_{max} \exp \left(-C_1 \int_0^t q(t) C_2 dt \right)$ ($B_L + B_0 T^{B_1} \geq B_{max}$)
6	幂	曲线数	$C = C_0 + C_1 q^{C_2-1}$ if $B > 0$
			$C = C_0$ if $B \leq 0$

$$\sigma = \frac{1}{n} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n ((C - C_i) / C_i)^2 \right]} \quad (11)$$

或按照模型预测值与实验值绝对偏差进行,如下式:

$$\sigma = \frac{1}{n} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (C - C_i)^2 \right]} \quad (12)$$

其中, C 是根据模型计算得到的预测结果; C_i 是实测结果. 在参数优化计算时, 径流量可根据实测径流量数据, 或根据径流模型计算得到的数据, 采用曲线拟合方法获得. 为了简化计算, 本文主要根据径流模型结果或实测数据, 采用多项式拟合得到. 从上式可以看出, 预测污染物浓度的表达式是二元非线性函数, 含有非常复杂的非解析型积分表达式, 难以采用通常的曲线拟合方法得到这些参数. 本文主要采用遗传算法与拟牛顿法和单纯形法相结合进行参数估计, 有关具体算法见另文介绍^[13].

2 结果和讨论

以镇江市长江路某段路面三次雨水径流污染物悬浮固体(SS)和化学需氧量(COD_{Cr})实测资料为样本^[14], 计算了表 1 所列 6 种雨水径流污染物模型参数和平均残差, 结果如表 2 所示. 从表 2 中可以看出, 对悬浮固体污染物的模拟, 污染物冲刷模型以指数函数法较好, 而污染物累积模型对最终结果影响较小; 对化学需氧量模型来看, 污染物冲刷模型以曲线数模型较好, 同样污染物累积模型对最终结果影响较小. 污染物累积模型对模型选择影响较小的原因是所使用的样本数较少的缘故. 从相对偏差来看, 不同方法所预测的结果与实测结果相近, 最大为 10.8%, 最小为 8.98%.

表 2 中模型序号代表的模型参见表 1; 残差按

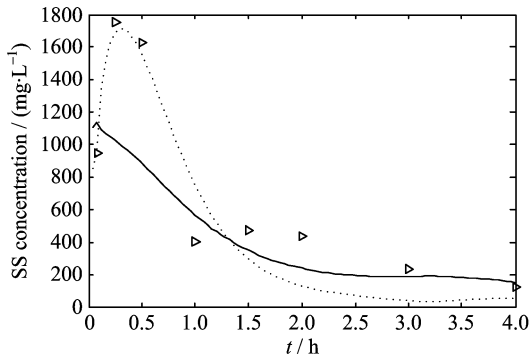
表 2 不同模型模拟实测雨水径流污染参数优化结果

Tab. 2 Optimum result of parameter in model with experimental stormwater data

模型	污染物	残差	C ₀	C ₁	C ₂	B ₀	B ₁	B _L /B ₂	相对偏差
1	SS	70.11	257.76	0.254 6	1.121 2	1.17	1.62	0.000 0	9.18%
	COD	38.5	316.95	19.02	3.404 2	2.544 9	10.50	1.046 1	9.79%
2	SS	74.08	439.06	864.22	1.024 9	2.154 2	0.645 2	0	9.67%
	COD	35.01	233.35	405.18	1.056 4	1.123 0	1.130	0	8.98%
3	SS	69.92	263.32	0.262 3	1.128 3	1.186 8	0.164	0.000 0	9.15%
	COD	38.11	296.49	7.828 6	2.175 3	1.230 0	14.37	0.631 5	9.78%
4	SS	74.08	439.06	864.22	1.024 9	2.000 8	0.872 4	0	9.67%
	COD	35.54	229.99	378.50	1.016 6	1.189 0	1.064 4	0	9.12%
5	SS	70.59	215.97	0.212 4	1.078 7	1.131 9	1.568 7	1.263 8	9.24%
	COD	38.11	296.49	7.828 6	2.175 3	1.230 0	0.795 4	3.791 1	9.78%
6	SS	82.19	580.72	1 022.4	1.510 1	19.441 7	2.584 8	28.900 3	10.8%
	COD	35.24	305.19	462.34	1.538 1	12.480 5	14.153 3	16.836 6	9.08%

式(11)计算,参数含意如前所述.

不同优化标准对结果影响较大,如图 1 所示,按照式(11)所列平均相对偏差优化的结果与按公式(12)所列的绝对平均偏差相比,采用绝对平均偏差,优化结果表明对高浓度初始径流的模拟更准确.采用相对平均偏差作为优化标准,则对低浓度径流浓度的模拟更准确,由于对高浓度初始径流能够模拟得更准确,而这部分污染物在径流污染物中所占比例较大,因此,采用绝对平均偏差作为优化目标,更能准确估算和模拟雨水径流污染.



— 相对平均偏差最小;... 绝对平均偏差最小;△ 实验数据

图 1 不同优化标准对模拟结果的影响

Fig. 1 Effects on simulation result with different standards

2.1 污染物累积模型

以上三种污染物累积模型主要考虑污染物累积最大限量现象和累积速率随累积时间递减线性设计的.此外,还有一些因素也影响雨水径流污染物浓度^[15],主要包括,在降雨期间的污染物积累和所研究区域周边地区,特别是未开发区域,污染物被降雨的冲入;另外,大雨冲刷的污染物质与小雨相比,要多得多,这反映雨前累积的污染物可冲刷量还受径流强度影响.考虑这些因素,就会使模型更加复杂,同时,在模型校准时,需要更多的样本,这使模型的应用变得复杂,使计算时间加大.

2.2 冲刷模型

最早的冲刷模型是 Metcalf 和 Eddy 公司的工程师 Burdoin 提出的^[10],认为地面污染物被冲刷的量与地面污染物现有可冲刷量成正比,与径流量成正比.根据该模型,可以得到

$$C = C_1 B_T \exp\left(-C_1 \int_0^t q(t) dt\right) = C_1 B_T \exp(-C_1 Q(t)) \quad (13)$$

这里, $Q(t)$ 代表了一次降雨经过时间 t 后的总径流量.由于总径流量随时间不断增加,因此,该模型得

到的结果是雨水径流污染物浓度随时间不断下降.这与实际测定结果是不一致的.为了解决这个矛盾,现在常用的模型是式(4),即地面污染物被冲刷的量与径流量的幂成正比.然而,无论是指数模型,还是标定曲线模型,仍然存在着明显的问题.由于污染物可冲刷量受径流强度影响, Burdoin 采用有效冲刷因子确定累积的污染物在降雨条件下可被冲刷的部分,有效冲刷因子 AV 与径流强度相关,按下式进行计算:

$$AV = a + bq^c$$

式中, a, b, c 为常数,需要根据实测数据进行校准.

影响降雨径流污染的主要影响因素包括:降雨强度和分布;地面沉淀物累积程度;地面沉积物粒径分布和空间分布;径流速度;地面环境条件和周围污染物的冲刷等.其中降雨强度及其分布,地面沉积物粒径分布和空间分布是主要影响因素.本文所采用的径流污染数据主要来源于同一地点的三次降雨数据,环境条件相近,降雨强度相差不大,因此,模型预测结果相对较好.

3 模型应用

根据模型比较结果,我们采用模型 1 模拟了镇江东吴路 2004 年 7 月 13 日暴雨径流 SS 浓度,采用模型 2 模拟了镇江东吴路 2004 年 7 月 13 日暴雨径流 COD 浓度,模拟结果与实测结果进行了比较,见图 2 和图 3,模型预测相对平均偏差分别为 10.9% 和 14.4%.反之,采用模型 1 模拟了镇江东吴路 2004 年 7 月 13 日暴雨径流 COD 浓度,采用模型 2 模拟了镇江东吴路 2004 年 7 月 13 日暴雨径流 SS

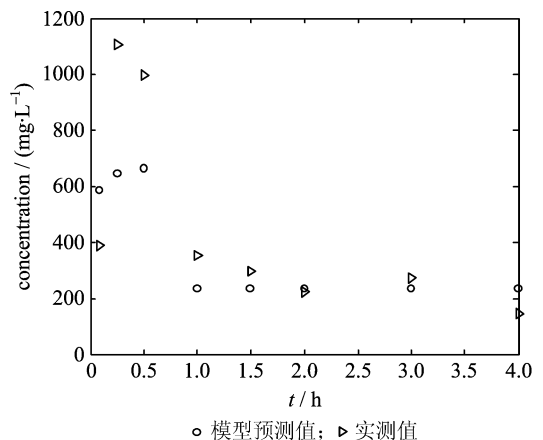


图 2 应用模型 2 预测镇江东吴路一次降雨的 COD 浓度

Fig. 2 Prediction of COD concentration in a stormwater in Dongwu Lu, Zhenjiang

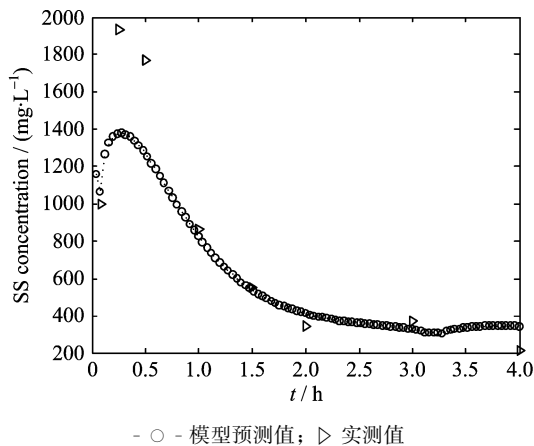


图3 应用模型1预测镇江东吴路一次降雨的SS浓度

Fig. 3 Prediction of SS concentration in a stormwater in Dongwu Lu, Zhenjiang

浓度,则预测值与实测值的相对平均误差分别为12.3%和19.6%,预测准确性明显下降.该预测结果表明在该次雨水径流污染物SS和COD模拟中,模型1比模型2有更好的预测准确性,其主要原因可能是模型1考虑了污染物积累过程对径流污染物排放的影响,而模型2则忽略了该项因素.预测误差还可能来源于所用模型没有考虑其他有关的因素,如污染物粒径分布等.在模型中,增加影响雨水径流污染浓度的因素会增加预测的计算量,需要更多的计算资源,目前国外常用的还是上述6种模型^[15].

4 结论

本文比较了不同模型预测雨水径流污染的情况,并与实测结果进行了比较,主要结论如下:

(I) 镇江城市道路雨水径流污染可以用污染物累积和冲刷模型进行预测.

(II) 不同累积和冲刷模型对同一地段降雨径流污染的预测结果相差虽然不大,但采用优化后的参数预测新地点的降雨事件,结果有明显差异,低偏差模型有更好的预测精度.

(III) 模型选择和参数优化时,使用绝对平均偏差作为比较标准,对污染总负荷的预测准确性比相对平均偏差好.

(IV) 本文同时校准污染物累积和冲刷模型参数,优化了模型参数,使模型能够预测降雨事件中污染物浓度,径流量随时间的变化,从而满足了径流污

染预测控制要求.

(V) 需要不同地点多次实测降雨污染物数据优化模型参数,才能提高模型预测的准确性.

参考文献(References)

- [1] Corbitt RA. Standard handbook of environmental engineering[S]. 2nd edit. New York: McGraw-Hill, Inc, 1999.
- [2] 赵剑强,孙奇清. 城市道路路面径流水质特性及排污规律[J]. 长安大学学报, 2002,22(3):21-23.
- [3] 何庆慈,李立青,孔玲莉,等. 武汉市汉阳区的暴雨径流污染特征[J]. 中国给水排水, 2005,21(2):101-103.
- [4] 曾晓岚,张智,丁文川,等. 城市雨水口地面暴雨径流模型研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2004,26(6):78-85.
- [5] 叶闽,杨国胜,张万顺,等. 城市面源污染特性及污染负荷预测模型研究[J]. 环境科学与技术, 2006,29(2):67-69.
- [6] 车伍,刘燕,欧岚,等. 城市雨水径流面污染负荷的计算模型[J]. 中国给水排水, 2004,20(7):56-58.
- [7] 郭凤台,朱磊,刘贵德. 邯郸市城区道路路面径流水质特性及污染物冲刷排放规律研究[J]. 河北水利, 2005,37(6):34-35.
- [8] 方红远,陈志春. 城市降雨径流负荷计算的统计分析法[J]. 环境科学与技术, 2002,25:13-15,8.
- [9] 张伟,周永潮. 城市雨水径流污染负荷计算及评价模型[J]. 湖南城市学院学报:自然科学版, 2005,14(1):27-29.
- [10] Metcalf and Eddy Inc., University of Florida, Water Resources Engineers Inc. Stormwater management MODEL, volume 1: Final report[R]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1971.
- [11] Huber W C. Stormwater Management Model User's Manual-Version III[S]. US Environmental Protection Agency: Athens, GA, 1981.
- [12] Huber W C, Dickinson R E. Stormwater Management Model Version 4: User's Manual[S]. Environmental Protection Agency: Athens, GA,1988:595.
- [13] 黄卫东,吴春笃. 城市雨水径流污染模型参数优化方法比较研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2007,37(8):1 031-1 035.
- [14] 韩松. 镇江市城市地表径流污染特征及控制技术研究[D]. 镇江:江苏大学生物与环境工程学院,2005.
- [15] Sutherland, R C, Jelen S L. Stormwater quality modeling improvements needed for SWMM[M]// Practical Modeling of Urban Water Systems Monograph 11. CHI Publications, 2003:253-289.