

城市雨水径流面污染负荷的计算模型

车 伍, 刘 燕, 欧 岚, 李俊奇
(北京建筑工程学院 城市建设系, 北京 100044)

摘 要: 对城市雨水径流的污染负荷进行定量分析评价是制定控制策略和实施有效总量控制的基础,为此建立了一种计算城市径流面污染负荷的数学模型,它具有参数少、因果关系清楚、简便直接等特点。利用该模型可对城市径流非点源污染进行量化分析并合理确定初期雨水径流控制量,这为城市径流污染控制决策的制定提供了一种有效的分析方法。

关键词: 城市雨水径流; 面污染负荷; 计算模型

中图分类号: TU991.11 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2004)07-0056-03

Calculation Model for Area Source Pollution Load of Urban Rain Water Runoff

CHE Wu, LIU Yan, OU Lan, LI Jun - qi

(Dept of Urban Construction, Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Quantitative analysis on pollution load of urban runoff was a basis for working out control strategy and implementing effective control of total runoff. Therefore, a mathematic model was established for calculating area source pollution load of urban runoff, which was characterized by few parameters, clarified causality, and convenient for application. The model could be used for quantitative analysis on non - point pollution of urban runoff and rational determination of first flush split flow. It provided an effective analysis method for decision - making of pollution control of urban runoff.

Key words: urban rain water runoff; area source pollution load; calculation model

1 汇水面污染物负荷的计算模型

由于城区屋面和道路等汇水面面积小且比较平整,故可做如下假定:①降落在汇水面上的雨水全部形成径流(即径流系数 $\psi=1$);②小汇水面上的降雨强度是均匀的,集流的汇水面积随着集流时间增长的速度($f=F/\tau_0$)为常数;③降雨历时等于或大于雨水径流从汇水面最远点流到集流取样点处的时间 τ_0 。依据雨水管渠设计流量推理公式的推导思想和降雨径流对城市汇水面污染物的冲刷规律,可推导出由雨水径流带来的污染物负荷(以下简称面污染

负荷)的计算模型。

$$Y = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} [C(t) \cdot \int_0^t h'(t) dt] dt + \frac{1}{\tau_0} \int_{\tau_0}^T [C(t) \cdot \int_{t-\tau_0}^t h'(t) dt] dt \quad (1)$$

式中 Y ——从汇水面带来的面污染负荷, mg/m^2
 τ_0 ——雨水从汇水面最远点流到集流点的时间, min
 T ——总降雨历时, min

$C(t)$ —— t 时刻到达取样点的径流中的污染物浓度, mg/L

$h(t)$ ——降雨曲线函数的导数, 即 t 时刻的降雨强度 $p(t)$, mm/min

式(1)中的第一项为 $t \leq \tau_0$ 时 $0 \sim \tau_0$ min 内产生的面污染负荷 Y_1 , 第二项为 $t > \tau_0$ 时段产生的面污染负荷 Y_2 。经对城市雨水径流污染物冲刷规律的大量统计分析可知, $C(t)$ 符合“一阶”冲刷模型, 即:

$$C(t) = C_0 e^{-Kt} \text{ 或 } C(h) = C_0 e^{-K'h} \quad (2)$$

式中 K, K' ——冲刷系数

C_0 ——径流的初始污染物浓度

h —— t 时刻的降雨量

利用统计分析方法很容易得到函数 $h(t)$ 。为简化计算, 可近似认为 $h(t)$ 符合线性关系, 即:

$$h(t) = p \cdot t \quad (3)$$

式中 p ——平均降雨强度

τ_0 与汇水面性状、大小、坡度和降雨强度等因素有关, 根据对降雨的实测及分析, τ_0 的近似取值范围见表 1。

表 1 τ_0 的近似取值

Tab. 1 Approximate value of τ_0

平均降雨强度 (mm/min)	K	屋面 τ_0 (min)	路面 τ_0 (min)
0.01 ~ 0.05	0.007 ~ 0.04	2 ~ 5	7 ~ 13
0.05 ~ 0.4	0.02 ~ 0.1	0.5 ~ 2	5 ~ 7
> 0.4	0.08 ~ 0.2	0.5	1 ~ 3

2 影响面污染负荷的主要因素

2.1 径流初始浓度

面污染负荷随径流初始浓度 C_0 的增加呈直线上升, 且上升幅度也与降雨强度有关。当降雨条件一定时 C_0 主要取决于汇水面的清洁程度, 因而减轻汇水面的污染程度对控制径流污染具有重要意义, 如改善空气质量和采用无污染的环保型材料可大幅度减少屋面径流带来的污染量, 而及时清扫、加强管理和控制各种泄漏、保持路面清洁是显著减少路面污染负荷的主要措施。

2.2 降雨历时或降雨量

从降雨冲刷规律看, C 值随 t 或 h 的增加而降低, 但下降的幅度逐渐减缓^[4]。假设降雨径流的初始 COD 浓度为 1 000 mg/L、总降雨历时为 100 min, 则不同降雨强度下的面污染负荷率(t 时刻产生的 Y_{COD} 与整场降雨 Y_{COD} 的比值)随 t 的变化如图 1 所

示, Y_{COD} 的增加幅度随 t (或 h) 的增加而减缓, 减缓的幅度和速度则取决于污染程度、降雨和汇水面等条件。如在 $p = 0.1$ mm/min 的条件下, 前 20 min 的 Y_{COD} 占整场雨径流污染量的 42%, 而后 20 min 的只占 10%。笔者根据降雨实测数据对面污染负荷进行了计算, 结果显示降雨前 20 min 的 Y_{COD} 占整场雨的 20% ~ 80%, 这说明控制初期雨水非常重要。

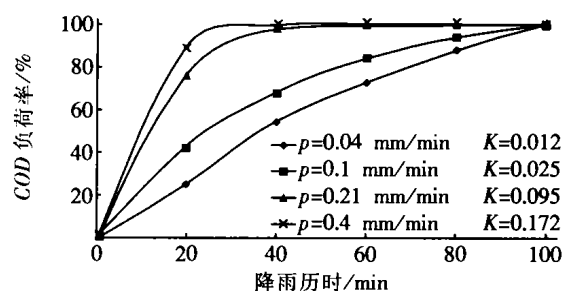


图 1 降雨历时对 COD 负荷率的影响

Fig. 1 Effect of rainfall duration on loading rate of COD

2.3 降雨强度

p 对 $C(t)$ 具有双重影响, 强度大则冲刷动能亦大, 会增大径流中污染物的浓度, 但强度大也意味着单位时间内的降雨量多, 对径流污染物的稀释作用强, 使污染物浓度下降。在降雨强度较小、降雨的初期或汇水面污染物多、颗粒大的情况下, 对污染物的冲刷作用占主导, 表现为浓度随降雨强度的增大而增大; 随着降雨历时的增加或汇水面愈清洁则冲刷的污染物减少, 稀释作用转为主导。总而言之 p 对 C_0 和 $C(t)$ 的影响十分复杂, p 对 Y_{COD} 的影响如图 2 所示(降雨历时为 100 min)。

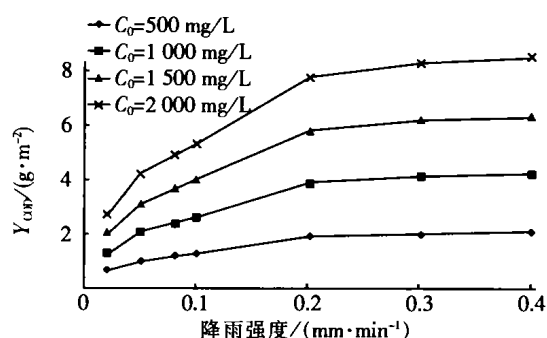


图 2 降雨强度对 COD 负荷的影响

Fig. 2 Effect of rainfall intensity on loading rate of COD

从图 2 可知, 当 p 较小时对 Y_{COD} 的影响比较大, 随着 p 值的增大则它对 Y_{COD} 的影响逐渐减小。

3 面污染负荷模型的应用

3.1 城市径流面源污染的量化分析

依据面污染负荷计算模型和径流实测数据, 可

容易地计算出各种条件下每场雨带来的城市径流面污染负荷。图3给出了北京城区2001年和2002年 Y_{COD} 的计算值(Y_{SS} 、 Y_{TP} 、 Y_{TN} 等也可依此计算出)。

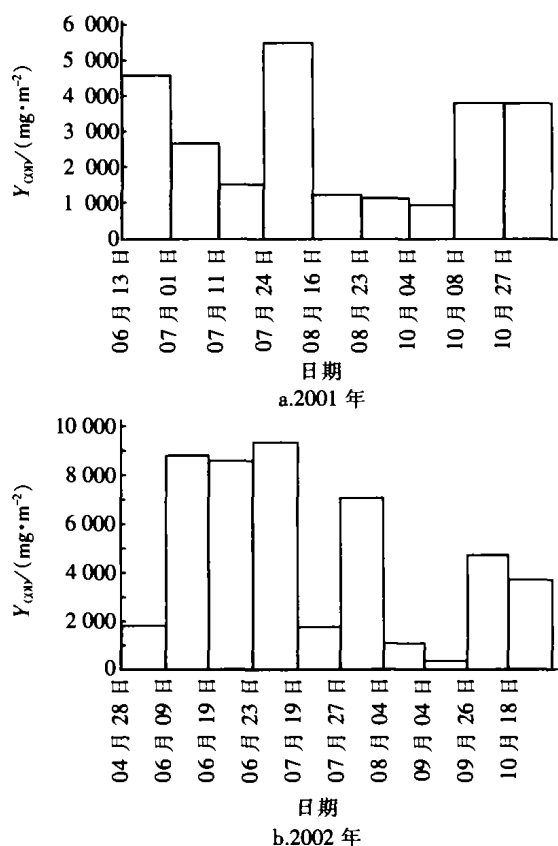


图3 2001年与2002年的COD负荷

Fig. 3 Load of COD in 2001 and 2002

由图3可知, Y 值差别较大,它除了受 C_0 、 T 、 h 的直接影响外,还与汇水面条件、降雨的间隔、气温等因素有关,这也是通常研究和控制径流污染十分困难的原因之一。统计结果显示,这两年路面径流的 Y_{COD} 均值为 $2\,700 \sim 3\,700 \text{ mg/m}^2$ (最高可达 $9\,000 \text{ mg/m}^2$),油毡屋面的 Y_{COD} 均值为 $800 \sim 900 \text{ mg/m}^2$,个别甚至高达 $3\,000 \text{ mg/m}^2$ 。综上所述,依据该计算和统计分析结果可全面、定量地评价城市雨水径流非点源污染状况,并能估算出主要污染物总量,这为城市非点源污染控制对策的制定奠定了基础。

3.2 初期径流的合理控制

研究表明,城市径流存在明显的初期冲刷作用,因而控制初期雨水是有效控制城市径流污染的重要措施之一,但初期径流控制量的确定是个难题。

将与某一较低且稳定的雨水径流污染物浓度所对应的降雨量定义为初期冲刷降雨量 H_0 (或称初期

弃流量),并用 $L = Y_h/Y$ 表示面污染负荷率,利用数学模型分别计算出每场降雨的 Y 值和不同降雨量时的 Y_h ,进而可得到每场降雨的 L 与 h 的关系。笔者根据几场典型的降雨路面径流测定数据计算得到了 L 值,结果显示,在降雨初期随 h 的增加则 L 值快速增加;当 h 达到 H_0 后 L 的增加速度减慢。对屋面径流的计算结果与此类似。

对大量实测数据的计算分析还表明,就同一场降雨而言,路面的 H_0 值是屋面的3倍以上;控制屋面的 H_0 在 $1 \sim 3 \text{ mm}$ 即可控制整场雨面污染负荷的60%以上,控制量超过 3 mm 后则效果增加很少。路面的情况较为复杂,数据变化幅度大,但一般控制 H_0 在 $6 \sim 8 \text{ mm}$ 也可控制60%~80%的污染量,超过 10 mm 则可增加的控制量很少。

因此,控制屋面和路面初期径流量分别为2和 $6 \sim 8 \text{ mm}$ 便可有效地控制雨水径流带来的城市面源污染。笔者依此原理设计了一种自动弃流装置并应用其控制某油毡屋面的污染负荷量,对2001年—2002年20多场降雨的实测结果表明,平均面污染负荷控制率达76%以上,证明了模型的实用性和上述分析的有效性。

4 结论

① 依据雨水管渠设计流量推理公式的推导思想和冲刷规律推导出的计算模型具有参数少、因果关系直接清楚、简单等特点,便于应用和指导实践。

② 在降雨过程中,汇水面污染物径流初始浓度、降雨历时与降雨量、降雨强度等都不同程度地交叉影响污染负荷,因此很难对城市径流非点源污染做精确的数值分析,重要的是揭示一般规律、总的趋势和因果关系,并求解统计结果,进行总量估算和评价,依此来实施有效的总量控制。

③ 控制屋面及路面的初期弃流量分别为2和 $6 \sim 8 \text{ mm}$ 就可有效控制由雨水径流带来的城市面源污染。

参考文献:

- [1] 车武,刘红,汪慧贞,等.北京市屋面雨水污染及利用研究[J].中国给水排水,2001,17(6):57-61.

E-mail: chewu812@sina.com

收稿日期:2003-12-18