

# 城市面源污染物雨水径流冲刷模型与分析

车伍, 刘燕, 李俊奇

(北京建筑工程学院, 北京 100044)

在点源污染逐步得到控制后, 非点源(以下统称面源)污染成为水体污染的主要矛盾, 在美国, 面源污染已经成为环境污染的第一因素, 60%的水污染是由面源污染所致<sup>[1]</sup>。在我国, 面源污染问题也十分严重, 如太湖、滇池等重要湖泊, 面源污染是水质恶化的主因之一<sup>[2]</sup>; 整治清理后的北京城区河湖又淤积大量沉淀物, 且近年来都发生严重的“水华”现象, 主要原因之一也是降雨冲刷带来的面源污染。因此, 研究城市雨水径流对面源污染物的冲刷规律, 对预报城市径流污染负荷, 正确评价面源污染对水环境的影响, 开发高效的污染物控制技术和径流污染控制管理措施有重要的理论和实际意义。

研究雨水径流对污染物的冲刷、输送和聚集过程, 国外已建立一些模型, 如 SWMM、STORM、MOUSE、WWAQP4、SLAMM、LOAD 等模型, 有统计模型和机理模型, 以及由子模型构成的框架模式。但面源污染具有的随机性、非连续性、广泛性、滞后性、潜伏性等特点, 使得它的机理非常复杂, 加上地域差别, 导致一些描述机理的精细公式和功能庞大的模型准确度和应用性大大降低, 加大了对面源污染定量分析和有效控制的难度。

根据我国和北京市的实际情况, 并基于 1999~2002 年四个雨季的降雨径流监测数据, 得出降雨径流污染物的冲刷模型和规律, 并给出相应的参数。

## 1 典型的冲刷规律模型

目前, 应用最广泛的冲刷模型是被 SWMM 模型和 STORM 模型采用的“一阶负荷模型”<sup>[3]</sup>, 该模型反映任一时间段内径流污染负荷与该时间段上的径流强度以及停留在地面上的污染量有关, 即:

$$\frac{dp}{dt} = -krp \quad (1)$$

式中:  $k$ —冲洗效率,  $\text{mm}^{-1}$ ;

$r$ —径流强度,  $\text{mm/h}$ ;

$p$ —地面上污染物遗留量,  $\text{kg}$ ;

$t$ —时间,  $\text{h}$ 。

由(1)式积分得

$$P_t = p_0 e^{-kr(t-t_0)} \quad (2)$$

式中:  $P_0$ —计算开始时刻地面污染量;

$P_t$ —计算时刻  $t$  时地面污染量。

对北京市城区的天然雨水、屋面、路面的降雨径流污染物(COD、SS、TN、TP 等)浓度随时间变化的大量实测曲线统计分析, 得出以下指数形式:

$$C_t = C_0 e^{-Kt} \quad (3)$$

式中:  $C_0$ —径流开始时径流中的污染物浓度,  $\text{mg/L}$ ;

$C_t$ —径流过程中  $t$  时刻的污染物浓度, mg/L;

$K$ —综合冲刷系数(经验值), 表征降雨强度、汇水面性质和污染物性状等综合影响因素,  $\text{min}^{-1}$ ;

$t$ —形成径流后的降雨持续时间, min。

式(3)比式(2)更简捷直观, 也便于测定和控制应用。

以2002年6月9日降雨为例, 图1为不同汇水面降雨径流COD及SS曲线、图2为TN、TP曲线, 表1、表2的数据反映拟合方程的拟合度均很好。

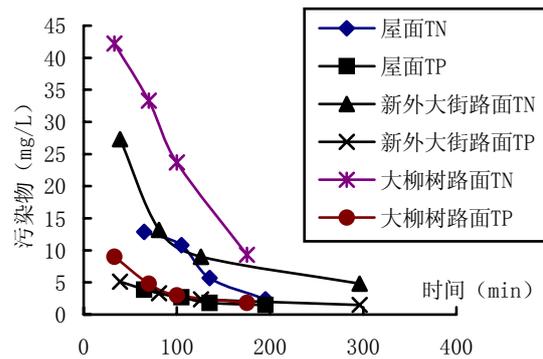
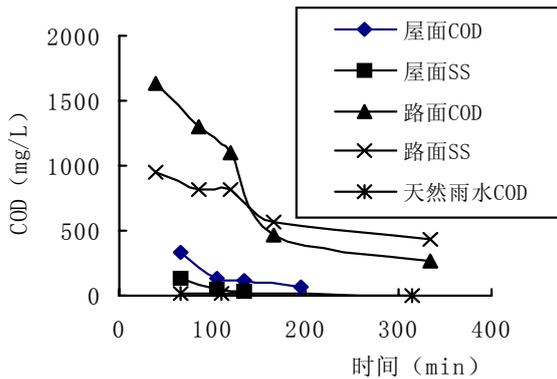


图1 不同汇水面降雨径流COD及SS曲线

图2 不同汇水面降雨径流TN、TP曲线

表1 降雨径流对COD、SS的冲刷曲线拟合

汇水面 拟合	屋面 COD	屋面 SS	路面 COD	路面 SS	天然雨水 COD
拟合方程	$Y=584.64e^{-0.0116x}$	$Y=401.99e^{-0.0182x}$	$Y=2022.6e^{-0.0084x}$	$Y=1032.3e^{-0.0028x}$	$Y=23.522e^{-0.0041x}$
拟合度	$R^2=0.914$	$R^2=0.88$	$R^2=0.9063$	$R^2=0.9271$	$R^2=0.9572$

表2 降雨径流对TN和TP的冲刷曲线拟合

汇水面 拟合	屋面-TN	屋面-TP	路1-TN	路1-TP	路2-TN	路2-TP
拟合方程	$Y=36.14e^{-0.0136x}$	$Y=5.88e^{-0.0075x}$	$Y=41.95e^{-0.0127x}$	$Y=6.97e^{-0.0086x}$	$Y=66.30e^{-0.011x}$	$Y=11.08e^{-0.011x}$
拟合度	$R^2=0.9577$	$R^2=0.9185$	$R^2=0.8656$	$R^2=0.8984$	$R^2=0.9842$	$R^2=0.9413$

## 2 冲刷模型的主要影响因素

降雨径流实测数据的回归分析表明, 不同降雨和汇水面的径流规律曲线形状不同。结合模型的概念特征, 主要是由于不同汇水面径流的初始浓度和降雨冲刷强度不同造成的。径流冲刷强度主要由模型中的  $K$  值反映。

### 2.1 径流污染物初始浓度的影响

对1999~2002年不同月份屋面和路面径流水质的数据分析, 得出屋面和路面雨水初期径流的COD平均范围为300~3000 mg/L, 为了研究初期径流浓度对冲刷规律的影响, 先假定以相同的径流冲刷强度, 即  $K$  值相同(图3中  $K=0.025$ )的情况。

由图3看出, 冲刷强度一定, 初期浓度越大, 经历相同的降雨时间, 末期浓度越大; 初期浓度越大, 要达到相同的末期浓度, 所需要的时间越长; 但降雨时间越长, 由不同初期浓度所引起的末

期浓度的差别越小。

对屋面来说, 沥青屋面较瓦屋面的初期 COD 浓度高<sup>[4]</sup>, 因此在同一场雨中, 稳定后的浓度也相对高; 同是沥青屋面, 高温日晒后的初期 COD 浓度大, 经历相同的时间达到的末期浓度也高。对路面而言, 污染程度和清扫状况直接影响径流的初期浓度, 从而影响路面径流对污染物的冲刷规律。

### 2.2 冲刷强度的影响

对大量数据的统计分析和模型比较发现, 当汇水面上的污染物状况一定, 降雨强度和汇水面性质是影响 K 值的主要因素。图 4 为初始浓度一定的情况下 ( $C_0=1000$ ), 冲刷强度变化, 即不同的 K 值所对应的径流冲刷曲线。

从图中看出, 降雨时间相同, 不同降雨冲刷强度下的径流污染物浓度相差很大, 降雨强度越大, 达到某一末期浓度所需的时间越短。

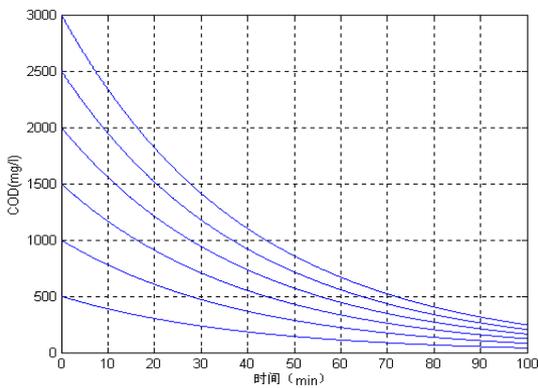


图 3 不同径流初始浓度下的冲刷规律

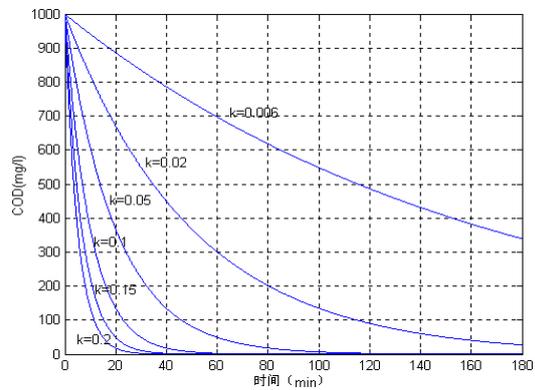


图 4 径流冲刷强度对冲刷规律的影响

在实际降雨过程中, 屋面主要以溶解性或小颗粒污染物为主, 冲刷过程波动很小; 而路面的颗粒较大, 汇水面不均匀, 有滞留作用, 并且受来往车辆和雨前路况清扫等复杂因素的综合影响, 冲刷过程时有波动。如图 5 是 2001 年 7 月 10 日降雨量变化曲线, 图 6 是对应的污染物浓度变化曲线, 在 18:30 分时, 降雨强度开始增大, 冲刷动能增大, 将更多的地面污染物冲起, 对应污染物浓度增大, 出现一个峰值。

冲刷规律的波动一般由某些随机因素引起, 尤其易出现在降雨强度波动大、污染物颗粒较大、路面不平整或污染物分布明显不均和降雨后期等条件下的冲刷, 应属于特例, 而大多数的降雨冲刷均符合一般规律<sup>[5][6][7]</sup>。有研究者因特例而质疑甚至否定降雨对污染物的初期冲刷规律<sup>[8][6]</sup>是不合理的。为便于研究, 本文中对这些复杂的随机因素做了简化假定。

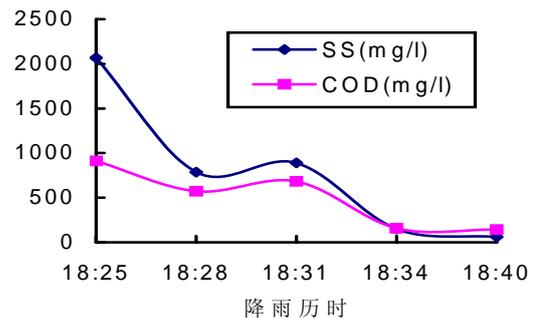
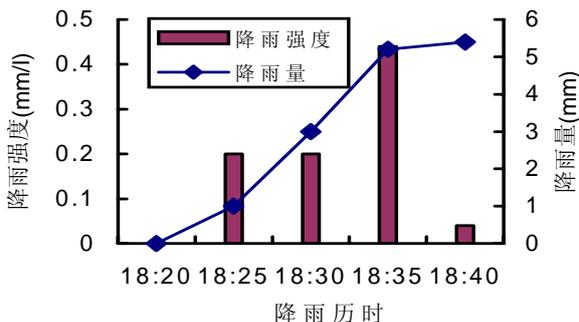


图 5 降雨强度和降雨量曲线

图 6 路面径流污染物变化曲线

### 2.3 初始浓度和冲刷强度的综合影响

实际条件下，降雨径流对面源污染物的冲刷规律是由各种因素交叉作用，综合影响机制复杂，如冲刷强度会影响初期浓度，初期浓度也影响冲刷强度（K 值）。图 7 给出两者共同作用的极限情况，大多数的冲刷过程包括在这两者之间。

根据近年北京降雨径流统计数据，得出模型中的 K 值的变化范围为 0.0067 ~ 0.2303，多数降雨 K 值在 0.007 ~ 0.2 之间，表 3 给出 K 的经验值。

表 3 K 的经验值

平均降雨强度 (mm/min)	K
0.01-0.05	0.007 ~ 0.04
0.05-0.4	0.04 ~ 0.1
>0.4	0.08 ~ 0.2

在同一场雨中，屋面的 k 值一般比路面的大。

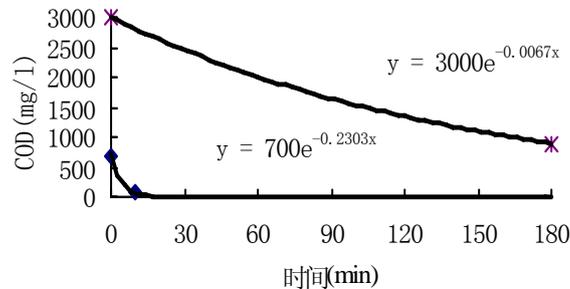


图 7 降雨径流对污染物冲刷的两种极限情况

## 3 降雨径流冲刷模型的应用

依据降雨径流冲刷模型可以定量计算城市面源污染负荷，评价其对水环境的影响，合理设计径流污染物控制设施和装置，实施污染物总量控制。限于篇幅，以下主要分析利用冲刷模型合理确定降雨径流的初期弃流控制量。

大量降雨径流全过程水质分析结果表明，城市初期径流雨水污染非常严重，SS、COD、石油类、表面活性剂和营养物等污染物浓度较高。如何有效地控制初期雨水是实施城市面源污染控制的一个重要的技术问题。对此，一些研究者尚有争议<sup>[9]</sup>。国外有研究提出“半英寸”原则，认为 90% 以上的污染物是含在初期约 12 mm 的雨水中。

### 3.1 以降雨量表述的冲刷模型

大量的降雨过程，降雨量随时间的变化近似线性关系。为便于研究和应用，以平均降雨强度计：

$$\frac{H}{t} = P \quad (4)$$

将 (4) 式带入式 (3) 得：

$$C_t = C_0 e^{-Kt} = C_0 e^{-K \frac{H}{P}} \quad (5)$$

或

$$C_h = C_0 e^{-K_h H} \quad (6)$$

式中： $K_h$ —以降雨量为变量时的综合冲刷系数（经验值）， $K_h=K/P$ ， $\text{mm}^{-1}$ ；

$H$ —径流开始  $t$  分钟时的累积降雨量， $\text{mm}$ ；

$t$ —形成径流后的降雨持续时间， $\text{min}$ ；

$P$ —平均降雨强度， $\text{mm}/\text{min}$ 。

式（6）即为以降雨量表述的冲刷模型。根据  $K$  值的变化范围，得出  $K_h$  值的变化范围约为 0.05 ~ 5，结合实际统计数据，多数降雨的  $K_h$  值在 0.15 ~ 4 范围。

### 3.2 降雨径流初期弃流控制量的确定

以主要污染物 COD 为例分析。根据（6）式和实际测定的  $C_0$  值范围，设  $C_0$  为 500、1000、1500、2000，及对应不同的  $K_h$  值 0.15、0.5、1、3，可得一组典型的径流冲刷曲线（如图 8）。

只要控制一定量的初期雨水，就可有效地控制径流带来的面源污染物。但对不同的降雨冲刷曲线，达到较低的雨水径流污染物浓度所对应的降雨量不同。因此，需要做进一步的分析。

先定义达到某一较低且稳定的雨水径流污染物浓度所对应的降雨量为初期冲刷降雨量  $H_0$ （或称初期弃流量）。根据大量的实测数据，一般情况下，同一场雨的屋面雨水初始浓度较路面低，并且路面对应的  $K_h$  值小于屋面的  $K_h$  值。即屋面对应的  $H_0$  比路面的小， $C_h$  达到的稳定值也较小。如图 9 所示为一场典型的降雨强度较小的冲刷曲线（2002.6.9），不同路面的  $C_0$  值都比屋面高，而  $K_h$  值则小于屋面。屋面达到稳定浓度（约 100  $\text{mg}/\text{L}$ ）时所对应的降雨量约为 3  $\text{mm}$ ，路面达到相应稳定浓度的降雨量约为 12 ~ 14  $\text{mm}$ ，即路面降雨冲刷的  $H_0$  是屋面的 3 倍以上。

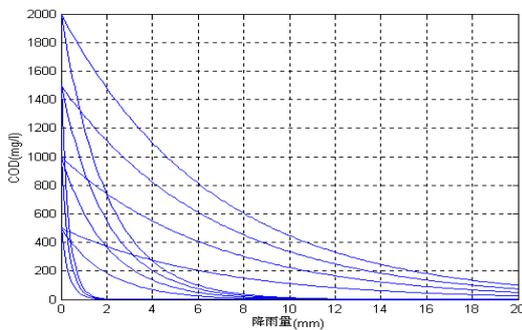


图 8 典型的降雨径流对 COD 的冲刷曲线

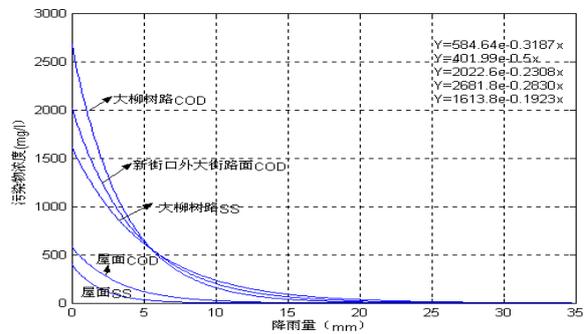


图 9 典型屋面与路面降雨径流冲刷曲线比较

根据大量路面和屋面径流的实测数据和理论分析，多数情况下，屋面径流在  $H$  为 1 ~ 3  $\text{mm}$  时  $C_h$  趋于平缓（对平顶油毡屋面可取上限，坡顶屋面取下限）；路面径流多在  $H$  为 6 ~ 8  $\text{mm}$  左右， $C_h$  趋于平缓的较低浓度。

利用数学模型可分别计算出每场降雨单位面积汇水面产生的污染物负荷（ $M$ ）和对应不同降雨量时产生的污染物负荷（ $M_h$ ）。定义  $L=M_h/M$  为汇水面污染物面负荷率，则可得到每场降雨的  $L$  与  $H$  的关系。图 10 和 11 是对选择的几种不同降雨强度和  $C_0$  的降雨径流的计算结果，路面所对应的降雨强度是 0.0364、0.4、0.2047、0.039；屋面对应的降雨强度为 0.0364、0.0164、0.0484、0.2157。在降雨初期，随  $H$  的增加，对应的  $L$  值增加很快，到  $H$  趋于  $H_0$  时（ $C_h$  趋于稳定值）， $L$  的增加速度减慢。

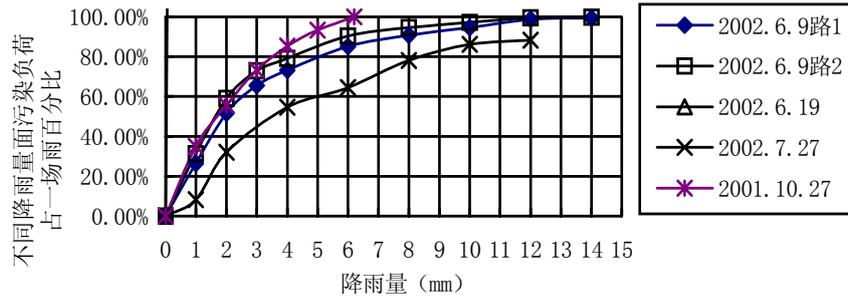


图 10 典型的路面径流面污染负荷率随降雨量的变化

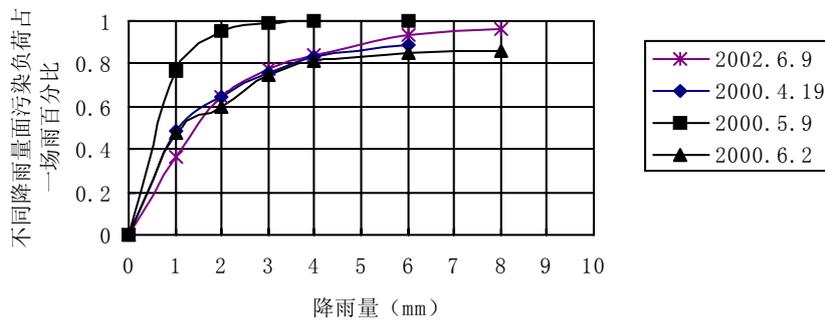


图 11 典型的屋面径流面污染负荷率随降雨量的变化

根据图示和上述分析,屋面的  $H_0$  控制在 2 mm 即可控制大约整场雨 60% 以上的面污染负荷,控制量超过 3 mm,效果增加很少。路面  $H_0$  控制 6 mm 可控制约 60% 的污染量,控制 8 mm 则可控制约 80% 的污染量,超过 10 mm 可增加的污染物控制量很少。

因此,屋面控制 2 mm 初期弃流量,路面控制 6~8 mm 的初期弃流量即可有效地控制雨水径流带来的城市面源污染负荷。

#### 4 结论

① 降雨径流对城市面源污染物存在明显的初期冲刷作用,对北京市区的大气、屋面、路面的主要污染物冲刷规律均符合  $C_t = C_0 e^{-Kt}$  或  $C_h = C_0 e^{-Kh}$ 。

② 冲刷模型中  $K$  值主要受降雨径流初始浓度、降雨强度、汇水面性质和污染物性状等因素的影响。汇水面表面平整、坡度大,污染物颗粒小,初期浓度高,降雨强度大,都会使  $K$  值较大;在同一场雨中屋面的  $K$  值一般大于路面的  $K$  值。

③ 控制降雨径流的初期弃流量 ( $H_0$ ) 可有效地控制雨水径流带来的城市面源污染负荷。屋面控制  $H_0$  为 2~3 mm,路面控制  $H_0$  为 6~8 mm,即可控制整场降雨面污染负荷的 60%~80% 以上。

#### 参考文献

- [1] US EPA. National water quality inventory, Report to Congress Executive Summary, Washington DC; USEPA, 1995: 497.
- [2] 胡学涛,等. 非点源污染模型研究[J]. 环境科学, 2002, Vol.23.
- [3] Sartor, J D and Boyel, G B. Water pollution aspects of street surface contaminants. US Environmental Protection Agency [M]. Municipal Control Branch, EPA-R2-72-081, 30-65.

- [4] 车武, 等. 北京城区屋面雨水污染及利用研究[J]. 中国给水排水, 2001, 17(6): 57-61.
- [5] Millar R.G., Analytical determination of pollutant wash-off parameters, J.of Envir. Engrg, ASCE 1999, 125(10): 989-992.
- [6] Charbeneau R.J. and Barrett M.E., Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads, Water Environment Research, 1998, Vol. 70(7): 1295-1302.
- [7] Barrett M.E. and Jr. Irish L.B. et al Characteristics of highway runoff in Austin, Texas, area, J. of Envir. Engrg. ASCE 1998,124(2): 131-137.
- [8] Deletic A.B. and Maksimovic C.T., Evaluation of methods tor estimating stormwater pollutant loads, Water Environment Research, 1998, Vol 70(7): 1295-1302.
- [9] 车伍, 等. 北京城区雨水径流水质及其主要影响因素[J]. 环境污染治理技术与装备, 2002, 3(1): 33-37.
- [10] Mary Catherine Hager. Evaluating First Flush Runoff [J]. Stormwater, 2001, Vol. 2(6): 1-10.