

潘国庆, 车伍, 李海燕, 等. 2009 雨水管道沉积物对径流初期冲刷的影响 [J]. 环境科学学报, 29(4): 771– 776
Pan G Q, CheW, LiH Y, *et al.* 2009. Effect of storm sewer sediment on first flush [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(4): 771– 776

雨水管道沉积物对径流初期冲刷的影响

潘国庆², 车伍^{1*}, 李海燕¹, 李俊奇¹

1 北京建筑工程学院环境与能源工程学院, 北京 100044
2 中建(北京)国际设计顾问有限公司机电事业部(北京区域), 北京 100013

收稿日期: 2008-04-30 修回日期: 2008-08-07 录用日期: 2009-01-20

摘要: 为了避免汇水面源头以及分流制雨水管道系统中沉积的大量污染物在降雨时随雨水径流被冲刷进入水体, 从而控制径流对水环境构成的冲击性污染, 从理论和试验 2 方面分析了管道径流污染物(汇水面和管道沉积物 2 个来源)的流失规律. 结果表明, 汇水面源头污染物流失较符合源头冲刷的指数衰减模型, 管道内沉积物流失可用流量曲线模型计算; 管道内沉积物占管道径流污染物的比例越大, 管道径流的初期冲刷现象越不明显. 为了提高径流污染控制设施的效率, 宜在源头进行分散控制, 并加强雨水管网系统清洁维护, 避免污染物的积累.
关键词: 管道沉积物; 初期冲刷; 指数衰减模型; 流量曲线模型; 径流污染控制

文章编号: 0253-2468(2009)04-771-06 中图分类号: X522 文献标识码: A

Effect of storm sewer sediment on first flush

PAN Guoqing², CHE Wu^{1*}, LI Haiyan¹, LI Junqi¹

1 School of Environment and Energy Engineering Beijing University of Civil Engineering and Architecture Beijing 100044
2 M & E Division (Beijing Regional), China Construction (Beijing) Design International Beijing 100013

Received 30 April 2008 **received in revised form** 7 August 2008 **accepted** 20 January 2009

Abstract It is important to control runoff pollution flushed to the water-system, and avoid large amounts of pollutants from catchments and pollutants settled and accumulated in storm sewers from being washed out to receiving waters in wet weather. A discharge law of different source pollutants (from catchments and sewer) was analyzed by theory and experiment. It was shown that the pollutant discharge law from catchments accords with an exponential washoff model, but sediment pollutants in the sewer fit a rating curve washoff model. Therefore the sediments, the weaker the first flush effects would be. To ensure high running efficiency of runoff control facilities, source pollution control is important, and effective storm sewer system maintenance is a significant measure to avoid accumulation of contaminants.
Keywords storm sewer sediment; first flush; exponential washoff; rating curve washoff; stormwater pollution control

1 引言 (Introduction)

近几年雨水径流污染逐渐被人们重视. 尽管为避免污水溢流而尽力将雨水管线同污水管线分离, 但降雨及面源污染物分布的随机性和管道系统的复杂性仍导致径流过程、径流总量以及径流污染物输送的变化规律具有随机性, 因而, 增加了对城市雨水管道系统径流污染进行控制的难度. 通常情况下, 由于建设成本的问题难以对所有径流雨水进行净化处理, 因此, 一些处理设施对小雨可实现径流

完全处理, 而对大雨或暴雨仅能处理部分径流, 使得径流污染不能完全避免. 事实上, 某些条件下雨水径流中污染物的初期冲刷作用很明显, 只要对初期径流雨水实施控制或处理就能实现较高的污染控制效率; 而在另一些条件下污染物的初期冲刷作用消失, 难以靠控制初期径流实现高的污染物控制效率(车伍等, 2007). 因此, 研究不同条件下径流污染物的冲刷排放规律是对径流污染物排放实施有效控制的关键.

径流雨水中污染物的变化一般用污染物浓度

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50808009); 国家科技支撑计划课题 (No. 2006BAJ08B04); 北京市教委科技计划项目 (No. KM200810016012)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50808009), the National Science and Technology Support Plan Topic (No. 2006BAJ08B04) and the Beijing Education Committee Science and Technology Plan Project (No. KM200810016012)
作者简介: 潘国庆 (1982—), 男; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: chewu812@163.com
Biography: PAN Guoqing (1982—), male; * **Corresponding author** E-mail: chewu812@163.com
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

随径流时间的变化来表示. 国内外众多研究者发现, 多数情况下存在径流初期污染物的输送速率大于径流量输送速率的现象, 即初期冲刷效应. 由于污染物的排放速率与径流量有关, 浓度过程曲线不能直观地反映污染物初期冲刷效应是否存在, 而采用无量纲累积曲线则可以直观表示初期冲刷现象. 污染物质量定义的初期冲刷可以用式 (1) (Jun *et al.*, 2000; John *et al.*, 2004)表示:

$$\frac{\int_0^t M(t) dt / \int_0^T M(t) dt}{\int_0^t Q(t) dt / \int_0^T Q(t) dt} > 1 \tag{1}$$

式中, $M(t)$ 为单位时间内排放污染物的质量 ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$); $Q(t)$ 为径流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); T 为降雨过程总历时 (s).

对每一降雨事件的每一种污染物, 用 t 时刻的累积污染量占整个降雨事件总污染量的比值同 t 时刻的累积径流量占整个降雨事件总径流量的比值建立无量纲累积曲线来判断是否有初期冲刷现象. 用累积污染量除以整个降雨事件中总的污染量为纵坐标, 累积径流量除以整个降雨事件中总的径流量为横坐标作图, 即可以形成图 1 所示曲线. 图中的对角线表示整个降雨过程中径流污染物均衡迁移, 曲线位于对角线上方时, 污染物排放率大于径流排放率; 曲线位于对角线下方时, 污染物排放率小于径流排放率.

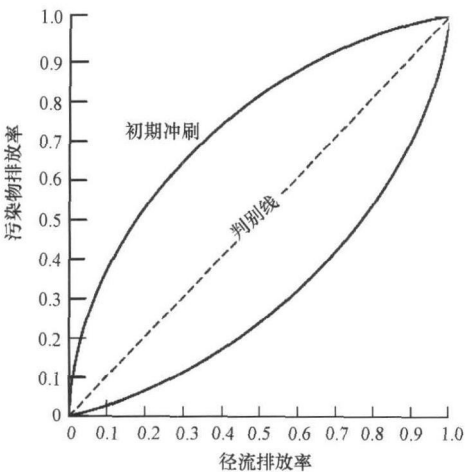


图 1 初期冲刷定义示意图 (John *et al.*, 2004)

Fig 1 Definition of first flush

不同的学者对初始冲刷的量化定义不一样, Wan *et al.* 认为, 若占总径流量 25% 的初期径流,

冲刷掉占总径流排污量的 50% 的污染物时, 则存在初始冲刷现象; Stahre 等定义为当占总径流量 20% 的初期径流, 冲刷掉了占总径流排污量 80% 的污染物时, 即认为发生了初始冲刷现象 (王和意等, 2006). 笔者认为, 考虑到降雨、汇水区域和径流污染物冲刷排放规律的随机性、多变性和复杂性, 可以从相对意义上来定义或理解初始冲刷现象: 当污染物排放率-径流排放率曲线前段部分高于对角线时, 即可认为有初期冲刷现象; 曲线的前段斜率越大, 初期冲刷现象越明显; 反之亦然 (图 1).

初始冲刷现象明显时, 处理初期部分的雨水即可控制大量的污染物, 使处理设施具有较高的效率, 在同样的控制标准情况下则可以减小设施规模, 减少投资, 因此, 研究径流的初始冲刷现象对径流的污染控制具有重要的现实意义.

雨水管网是城市径流雨水收集、输送、排放的主要设施, 因此, 往往成为径流污染控制装置及构筑物安装、建设的位置. 雨水管道径流输送的过程决定了后续设施对污染物的控制效果, 本文主要研究雨水管道径流排放的规律, 以期优化雨水污染控制设施的设置提供参考.

2 管道径流污染物排放规律 (Storm sewer pollutant discharge law)

通过雨水管道排放的污染物有汇水面和管道沉积物 2 个来源. 汇水面上的污染物主要通过雨水溶解、悬浮、漂浮作用进入管道系统; 而管道内的沉积物的流失需要较大的径流冲刷剪力, 两类污染物必然有不同的流失规律, 下面分别论述.

2.1 汇水面污染物排放的规律

目前用于模拟计算径流水质的模型主要有 3 种, 一阶浓度指数模型、指数冲刷模型和流量曲线模型. 这 3 种模型被广泛应用到径流水质的模拟计算中, 但多数研究者仅用 1 种模型来表述汇水区域出口的径流水质, 没有单独考虑管网系统沉积物存在对排放过程的影响, 这实际上是通过拟合曲线将沉积物等因素的影响综合起来用几个参数来表示, 这就使得拟合结果的通用性较差, 也导致多种模型的出现.

2.1.1 一阶浓度指数模型 指数模型是源于试验的经验模型, 如式 (2). 该模型较简单, 参数少, 通过 2 个参数即可表达水质变化的过程. C_0 、 k_2 两个参数包含了汇水面、降雨过程以及污染物的特性, 因此, 不同的汇水面所需参数不同, 这也使得模型的适用

性受到一定的限制, 该模型适用于条件相似的区域。

$$C(t) = C_0 e^{-kt} \quad (2)$$

式中, k 为冲刷系数 (s^{-1}); C_0 为径流的初始污染物浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); t 为径流历时 (s)。

一般对于小而平整的汇水面 (如屋面和道路), 其径流冲刷都较好地符合了上述规律, 如图 2 所示的实测屋面雨水水质资料。但是, 对于大而复杂的汇水面及管道系统, 雨水径流输送过程中污染物的浓度变化规律存在较大不确定性。有研究表明, 有时径流污染物的浓度过程曲线类似流量过程线 (Jun *et al.*, 2000), 浓度峰值出现在降雨历时某一时刻而不是初期, 与该模型不符。

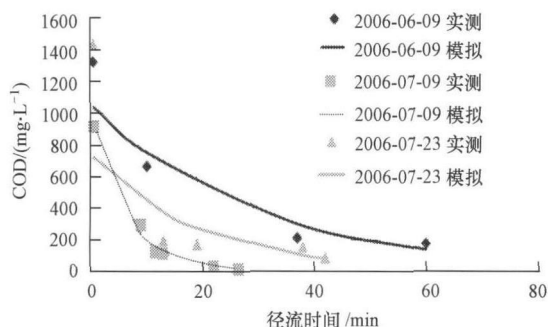


图 2 屋面雨水水质变化过程 (潘国庆, 2007)

Fig. 2 Roof rainwater quality graph

大的汇水面由于涉及到管网的汇流过程, 并且汇水面上不同区域的污染程度不同, 同时汇流后到达检测断面的时间也各不相同, 这些都有可能导致径流水质变化的随机性。因此, 对大面积的汇水面可以通过将其划分为多个子汇水面, 然后通过汇流叠加得到干管径流的变化过程。车伍等 (2004) 通过该模型验证了污染物浓度峰值出现在不同时刻的可能性, 认为汇流雨水口越多 (即汇水面越大) 污染物浓度下降的速率越小, 如果汇水面污染负荷均匀, 无论雨水口数目多少, 雨水干管中污染物浓度随降雨时间的延长呈下降趋势; 当汇水面上各点污染量不同时, 以及管道内存在沉积物时, 可能出现污染物浓度峰值的后移及多个峰值现象。

2.1.2 指数冲刷模型 指数冲刷模型是地表径流污染物排放过程数学模拟中的最常见模型, 由 M et al. Eddy 等于 1971 年提出, 并应用于美国暴雨管理模型 (Storm Water Management Model/SWMM) 中, 该模型假设污染物的流失速率与污染量、单位面积上的径流量成正比 (M illar *et al.*, 1999), 即:

$$\frac{dB}{dt} = -kqB \quad (3)$$

式中, B 为单位面积污染量 ($kg \cdot hm^{-2}$); t 为径流历时 (s); k 为系数 (mm^{-1}); q 为单位面积上的径流量 ($mm \cdot s^{-1}$), q 为时间 t 的函数。

目前, 研究者对式 (3) 进行了改进, 提出污染物的流失速率与污染量、单位面积上的径流量的 k_2 次方成正比, 见式 (4):

$$\frac{dB}{dt} = -kq^{k_2}B \quad (4)$$

对式 (4) 积分可得:

$$B = B_0 \exp\left[-k \int_0^t q^{k_2} dt\right] = B_0 e^{-kvt} \quad (5)$$

式中, B_0 为初始时刻单位面积污染量 ($kg \cdot hm^{-2}$); $v(t)$ 为单位面积上的径流量的 k_2 次方对时间的积分值, 是 t 的函数。

由式 (5) 可见, 汇水面上污染物剩余量随径流量的增加呈指数衰减。

当 $k_2 = 1$ 时, $v(t)$ 为单位面积上的径流量的体积; 若同时假设汇水面上任意点污染物及径流到达出口的时间相等 (不考虑汇流时间差的影响), 将整个汇水面看作一个结点处理, 可得到另一种表示形式 (6) (车伍, 2004a):

$$C = C_0 e^{-kv(t)} \quad (6)$$

式 (6) 表明, 出口径流污染物浓度随单位面积上径流体积的增加按指数规律衰减。由于径流体积是 t 的单增函数, 因此, 该式说明径流污染物浓度随时间 t 按指数规律衰减。

特别的, 当径流体积随时间均匀增加时, $v(t) = qt$, 由式 (6) 可得:

$$C = C_0 e^{-kqt} = C_0 e^{-k't} \quad (7)$$

上式即通过试验数据得到的城市雨水径流污染物冲刷规律的“一阶”冲刷模型 (式 (2)), 可见该模型存在一定的理论合理性。在此需要指出, 得出式 (7) 的前提是: 各点污染物及径流的输送时间相等, 也就是说该公式没有考虑径流汇流、污染物输送过程对水质变化造成的影响; 公式用于描述流域出口的污染物浓度, 将汇水面抽象为一“均质”污染源, 即认为各点污染负荷相同。因此, 对于较小汇水面, 污染物分布较均匀、汇流时间短, 公式的预测模拟效果会好一些; 对于大汇水面积, 由于汇流输送过程的影响以及各点污染物负荷存在差异, 径流污染物排放过程难以直接用该模型模拟。

2.1.3 流量曲线模型 有研究者认为, 污染物的流失速率与径流量的 k 次方成正比, 即式 (8) (Lew is *et al.*, 2007; 车伍等, 2004b)。

$$\frac{dB}{dt} = -k_1 Q^{k_2} \quad (8)$$

式中, B 为单位面积污染量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); k_1 、 k_2 为冲刷系数 (k_2 为 1, k_1 由 k_2 决定); Q 为径流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

该模型中的污染物流失速率主要由流量决定, 因此, 污染物的浓度变化与径流量的变化过程相似, 故该方法被称为流量曲线模型. 模型说明污染流失所需冲刷拖曳力较大, 适用于描述难冲刷污染物的流失规律, 例如可用于计算合流制管网内沉积物的排放 (Adrian *et al.*, 2003).

2.2 管道沉积物的排放

雨水管道内沉积的污染物质理论上应源于流域地表以及雨水口进入的垃圾, 在正常情况下, 周期性的清扫管理可以去除地面和雨水入口处的垃圾等污染物质, 进入管道系统的应该是能够被地表汇流所携带的悬移质污染物, 质量较大的不均匀固体类推移质的存在是偶然现象, 不具有普遍意义, 故略去推移质而只考虑悬移质污染物.

悬移质在水流中的含量是由流体和悬移质的特性决定的, 在水力学中用水流携沙力来表示水流携带悬移质的能力, 水流携沙力用式 (9) 表示 (张瑞瑾等, 1998):

$$S = k \left(\frac{U^3}{gR\omega} \right)^m \quad (9)$$

式中, S 为悬移质水流携沙力 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); k 为系数, 取值 $0 \sim 4\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; U 为水流平均流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); g 为重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); R 为水力半径 (m); ω 为悬移质颗粒沉速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); m 为参数, 取 $0.2 \sim 1.5$.

对于管道系统, 断面比较小, 因此, 可以按一维流动考虑, 断面流速相同.

$$Q = U \cdot A \quad (10)$$

式中, U 为流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); A 为过流断面面积 (m^2).

将式 (10) 代入式 (9), 可得:

$$S = \frac{k}{g^m} \frac{1}{\omega^m} \frac{1}{A^{3m}} R^m Q^{3m} \quad (11)$$

另外, 由于雨水管道按满流设计, 因此, A 即管道断面, R 为管径的 $1/4$ 均为定值. 悬移质颗粒的沉速的变化也有限, 因此, 式 (11) 主要应该由流量 Q 决定, 即可得到式 (12).

$$S = k_1 Q^{k_x} \quad (12)$$

式中, $k_1 = \frac{k}{g^m} \frac{1}{\omega^m} \frac{1}{A^{3m}} R^m$, $k_x = 3m$.

雨水排放过程中, 管道虽然不是一直处于满流

状态, 但均可用式 (12) 的形式来表示. 此外, 还有其它通过经验方法获得的携沙力公式, 如式 (13)、式 (14), 也都可以写成式 (12) 的形式.

$$S = 10.7 \frac{U^{2.25}}{R^{0.74} \omega^{0.77}} \quad (13)$$

$$S = 2.34 \frac{U^4}{R^2 \omega} \quad (14)$$

由式 (9) 可知, 携沙力 S 的单位为 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 因此, 可以认为是雨水径流的 TSS 即悬浮物的浓度值, 则得式 (15):

$$S = C = \frac{-dM}{dV} = \frac{-dM/dt}{dV/dt} = \frac{-dM/dt}{Q} \quad (15)$$

将式 (12) 代入式 (15) 得:

$$\frac{dM}{dt} = -k_1 Q^{k_x+1} = -k_1 Q^{k_2} \quad (16)$$

式中, $k_2 = k_x + 1$

容易看出式 (16) 即式 (8), 因此, 污染物冲刷排放的流量过程模型同样也存在其理论依据, 管道内沉积物的冲刷可以采用该式计算.

3 管道沉积物对初期冲刷效应的影响 (Effect of Storm Sewer Sediment on First Flush)

雨水管道径流污染物来源于 2 个部分, 即汇水面源头污染物和管道沉积物; 源头污染物流失较符合源头冲刷的指数衰减模型 (式 (7)), 管道内沉积物流失可用流量过程模型计算 (式 (8)), 因此, 在径流水质模拟过程中应该联合利用 2 种公式分别计算 2 种来源的污染物, 然后求得水质浓度变化过程.

小汇水面 (这里指屋面、广场、局部道路等) 上污染物主要来源于汇水面, 管道内沉积物的影响可以忽略, 径流过程基本符合冲刷模型或指数模型的变化规律; 涉及到管网汇流的区域雨水系统, 管道内沉积物的影响可能增大, 因此, 需要采用流量曲线模型计算管道内沉积污染物的排放量, 最后通过两者叠加确定干管雨水污染物浓度变化过程.

美国 EPA 的 SWMM 软件内部集成了雨水水力计算模块, 同时能够进行汇水面径流水质计算, 因此以 SWMM 为计算工具来进行分析, 汇水面污染物流失采用指数冲刷模型. 设计降雨采用北京 1 年一遇的 2h 降雨, 汇水面上的 COD 流失量为 $1.23 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ (具体方法及过程参见 (潘国庆, 2007)), 在此不做赘述. 设管道内的沉积物引起的 COD 排放量为汇水面 COD 流失量的 K 倍, 根据径流过程确定沉积物冲刷的参数见表 1. 参数 k_1 确定原理与方法

如下:

管道沉积物引起的污染物浓度为:

$$C = k_1 Q^{2.25} \tag{17}$$

污染物的排放速率为:

$$\frac{dM}{dt} = C \cdot Q = k_1 Q^{3.25} \tag{18}$$

污染物排放总量:

$$M = \int_0^T k_1 Q^{3.25} dt = k_1 \sum_{i=1}^n Q_i^{3.25} \Delta t \tag{19}$$

式中, Q 为第 i 时段内的平均流量; $i = 1, 2, 3 \dots n$; 其它参数同前.

单位面积的污染物流失量:

$$B = \frac{M}{F} \tag{20}$$

式中, F 为汇水面的面积 (hm^2); M 为污染物质量 (kg); B 单位面积污染物流量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).

当 K 值确定后, 由 $B/1.23 = K$ 可求得 B 值; 故根据式 (20) 可得 M 值; 径流过程已知, 根据式 (19) 通过数值计算, 可以得到 k_1 值.

表 1 管道沉积物排放模型参数

Table 1 Parameter for sewer sediment discharge model			
k_1	K	管道内沉积物 COD 所占比率	
14.65	100	99%	
1.465	10	91%	
0.2931	2	67%	
0.1465	1	50%	
0.07327	0.5	33%	
0.01465	0.1	9%	

分别用 2 种模型计算不同来源的污染物对水质的贡献浓度, 2 组数值叠加为管道径流的水质浓度. 图 3 是通过模拟计算得到一场降雨下不同 K 值时的径流过程. 由图 3 可知, 当沉积物引起的 COD 流失量与来自汇水面的 COD 量大致相当时 ($K = 1$), 干管的浓度出现了 2 个峰值 (图 3a); 当沉积物引起的 COD 流失量为汇水面的 10 倍时 ($K = 10$), 虽同样存在 2 个浓度峰值, 但管道沉积物的影响成为主要的影响因素 (图 3b). 由于汇水面和管道内实际沉积物的不同, 不同研究者得到的结果不同, 有类似源头冲刷的, 或者图 3a 中叠加后的双峰值型 (或多峰值) 以及图 3b 中叠加的单峰值径流水质变化过程 (Jun *et al.*, 2000; 车伍等, 2004a). 图 4 为对某道路雨水干管水质实测的变化过程, 径流初期水质浓度较高, 随后又有多个峰值出现 (潘国庆, 2007).

根据流量过程曲线、浓度过程曲线, 分别计算

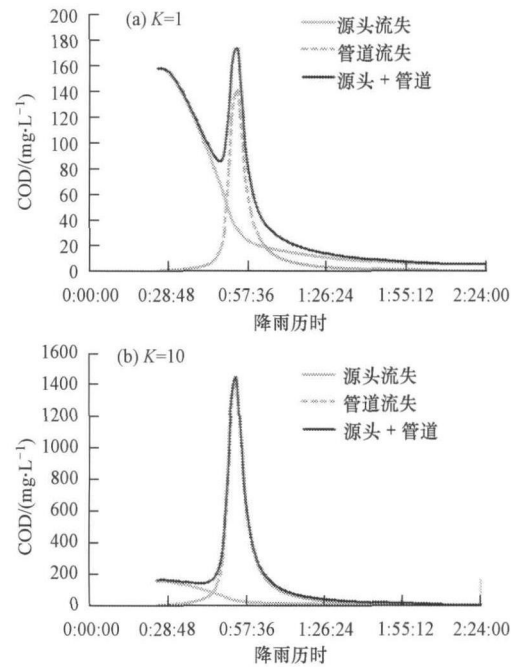


图 3 管道沉积物对浓度变化过程的影响

Fig. 3 Sewer sediment effect on stormwater quality graph

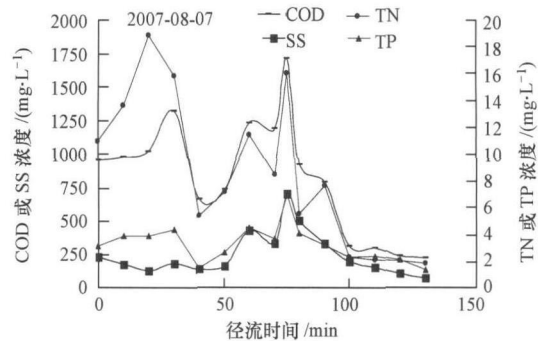


图 4 某道路雨水干管次降雨水质变化过程

Fig. 4 Stormwater quality graph of a road sewer

对应时刻累计 COD 排放量占本次降雨总排放量的比例和累计径流排放量占总径流量的比例, 并作图, 不同 K 时的结果如图 5 所示. 显然, 管道沉积物所占比例越大, 初期冲刷现象越不明显; 当 $K > 2$ 时, 即管道污染占总污染的 67% 以上时, 几乎已不存在初期冲刷现象.

图 5 只是在特定降雨及污染物负荷量条件下的计算结果, 虽然城市实际汇水面及管道系统情况复杂且差别较大, 再加上不同降雨事件径流条件的随机变化, 每一种情况下的初期冲刷效应都会有所不同, 但图 5 所反映的基本规律具有重要的指导意义.

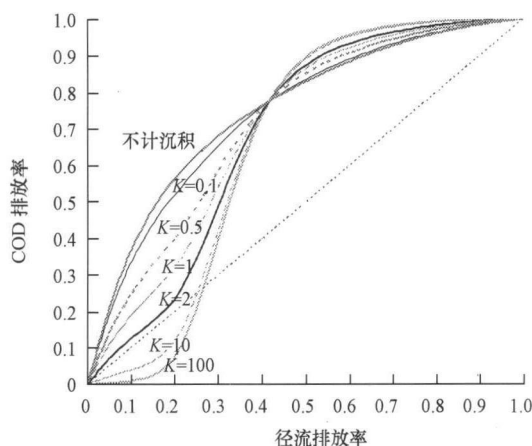


图 5 管道沉积物对初期冲刷效应的影响

Fig 5 Sewer sediment effect on the first flush effect

4 结论 (Conclusions)

1)管道沉积物的流失同径流量密切相关,可用流量过程模型描述.在管道内存在有沉积物时,径流水质的浓度将由汇水面冲刷和管道内沉积物 2 部分污染物组成.管道内沉积物的贡献越大,初期现象越不明显.

2)我国城市雨水管道系统内存积大量污染现象普遍,而且管道的日常清洗等管理措施也十分落后.因此,根据本文理论分析和一些研究者的实测结果,一旦雨水径流进入城市管道系统,其初期冲刷作用将被削弱甚至消失,增大了实施控制的难度.排水系统越庞大,水质变化越复杂.为了提高径流污染控制设施的效率,宜在源头进行分散控制.

责任作者简介:车伍(1955—),北京建筑工程学院教授,环境工程学科带头人.目前从事环境工程学科的教学、研究与工程设计咨询工作,主要研究方向水环境保护与修复、城市雨洪控制利用、排水工程与污水处理等.在国内外核心期刊及国际会议发表论文百余篇,完成专著《城市雨水利用技术与管理》和译著《污水处理能耗与能效》.负责国家“十一五”科技支撑计划子课题、北京市科委科技计划重大项目、建设部科技计划项目、北京市节约用水管理中心科研计划等 20 余项科研项目.完成“天津东丽湖雨水利用与水环境方案”、“北京市政府雨水利用工程”等 30 余项工程设计.研究成果获北京市科技奖及华夏科技奖各 1 项,国家发明和实用新型专利各 1 项.

参考文献 (References):

- 车伍,刘翠云,陈和平,等. 2004a 雨水干管污染物输送规律研究 [J]. 给水排水, 30(8): 30—35
- Che W, Liu C Y, Chen H P, *et al* 2004a Research on pollutant transportation of storm-water sewer [J]. Water and Wastewater Engineering 30(8): 30—35 (in Chinese)
- 车伍,刘燕,欧岚. 2004b 城市雨水径流面污染负荷的计算模型 [J]. 中国给水排水, 20(7): 56—58
- Che W, Liu Y, Ou L, *et al* 2004b Calculation model for area source pollution load of urban rain water runoff [J]. China Water and Wastewater 20(7): 56—58 (in Chinese)
- 车伍,张伟,李俊奇,等. 2007 城市雨水径流污染的初期弃流控制 [J]. 中国给水排水, 23(6): 1—4
- Che W, Zhang W, Li J Q, *et al* 2007 Initial split-flow control of urban rainwater runoff pollution [J]. China Water and Wastewater 23(6): 1—4 (in Chinese)
- John J, Chad M C 2004 First Flush Concepts for Suspended and Dissolved Solids in Small Impervious Watersheds [J]. Journal of Environmental Engineering ASCE, 130(11): 1301—1314
- Lee J H, Bang K W. 2000. Characterization of urban stormwater runoff [J]. Water Research 34(6): 1773—1780
- Miller R G. 1999. Analytical determination of pollutant wash off parameters [J]. Journal of Environmental Engineering ASCE, 125(10): 989—992
- 潘国庆. 2007 不同排水体制的污染负荷及控制措施研究 [D]. 北京: 北京建筑工程学院, 10—61
- Pan G Q. 2007 Study on Pollution Load and Control Measures for Different Drainage System [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture 10—61
- Rossman L A. 2007. Storm water management model user's manual version 5.0 [M]. Cincinnati: Water supply and water resources division, National risk management research laboratory, U. S. EPA, 1—265
- Sansalone J J, Cristina C M. 2004 First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds [J]. Journal of Environmental Engineering ASCE, 130(11): 1301—1314
- Saul A J, Skippworth P J, Tait S J, *et al* 2003. Movement of total suspended solids in combined sewers [J]. Journal of Hydraul Engineering ASCE, 129(4): 298—307
- 王和意,刘敏,刘巧梅. 2006 城市暴雨径流初始冲刷效应和径流污染管理 [J]. 水科学进展, 17(2): 181—185
- Wang H Y, Liu M, Liu Q M. 2006 First flush effect of urban stormwater runoff and management of runoff pollutant [J]. Advances in Water Science 17(2): 181—185 (in Chinese)
- 张瑞瑾. 1998 河流泥沙动力学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 183—184
- Zhang R J 1998 Kinetics of river bedload [M]. Beijing: China WaterPower Press 183—184 (in Chinese)