

城市初期雨水和初期冲刷问题剖析

车 伍, 张 伟, 李俊奇

(北京建筑工程学院 城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室,
北京 100044)

摘 要: 初期雨水和初期冲刷是城市雨水径流污染控制中两个不同的重要问题,然而,目前国内对这两个问题的认识还普遍存在明显的局限性。基于 1999 年以来对城市雨水径流污染规律的研究,并结合国内外学者的研究成果,对初期冲刷现象及其描述方法、污染物积累输送规律等进行分析;明确提出,研究、讨论初期冲刷问题首先应区分两种不同的典型条件;归纳了初期冲刷的主要影响因素,并进一步对国内外一些学者讨论初期雨水和初期冲刷问题时存在的矛盾与困惑进行剖析,澄清初期雨水与初期冲刷的不同概念,为把握其基本规律、深入研究城市径流污染规律、有针对性地制定有效控制措施提供理论和科学依据。

关键词: 初期雨水; 初期冲刷; 冲刷规律; 影响因素; 径流污染控制

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2011)14

Analysis of Urban Initial Rainwater and First Flush

CHE Wu, ZHANG Wei, LI Jun-qi

(Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>,
Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Initial rainwater and first flush are two important issues in urban stormwater runoff pollution control. However, clear limitations exist in awareness of the two issues in China. Based on the monitored data and investigations in Beijing since 1999, as well as investigations by many researchers around the world, first flush concept, its descriptive methods and regularity of pollutant accumulation and transportation are analyzed. It is pointed out that two representative conditions should be distinguished separately in the discussion on first flush. The major influential factors on first flush and the main reasons for controversy on initial rainwater and first flush are discussed. The different concepts of initial rainwater and first flush are clarified to provide a theoretical and scientific basis for grasping their basic regularities, research on urban runoff pollution and development of pertinent control measures.

Key words: initial rainwater; first flush; flush regularity; influential factors; runoff pollution control

初期雨水和初期冲刷是城市径流污染控制研究中两个不同的重要问题。然而,国外一些研究对初期冲刷问题一直存有争议,国内学术界和工程界对

初期雨水和初期冲刷现象的认识则普遍存在明显的盲目性和局限性,如一些人一提到城市径流污染及其控制就以为主要是初期雨水的问题,或简单地认

为初期冲刷的普适性,或否认初期冲刷现象等。这会对全面、清晰把握城市雨水径流污染规律和实施有效控制造成很大的影响或误导。因此,有必要对初期雨水和初期冲刷现象及其问题做进一步的剖析。

1 初期冲刷现象及其描述方法

20世纪80年代末,国外学者在城市雨水径流污染控制研究中提出了初期冲刷(First Flush)的概念,并针对初期冲刷的定义、成因、影响因素以及初期冲刷过程中的污染物迁移规律进行研究^[1~4]。在我国,就如何准确描述初期冲刷现象、径流污染物输送规律、如何利用初期冲刷现象指导工程实践等方面,一些国内学者也进行了探索^[5~12]。

1.1 浓度初期冲刷

早期对初期冲刷的认识主要基于雨水径流的污染物浓度随时间的变化规律,研究发现雨水径流中污染物的浓度峰值常常出现在径流初期,认为当初期径流中污染物浓度明显高于后期径流时,即存在初期冲刷。这种基于浓度过程曲线的初期冲刷现象又称为浓度初期冲刷(Concentration First Flush)^[1]。这种描述方法的优点是直观而简单,但也有明显的局限性:仅考虑污染物浓度随时间的变化,并未涉及雨水径流量的变化和污染物总量及其在径流过程中的分配。在很多情况下,初期雨水的污染物浓度虽然很高,但降雨初期的径流量较小,所挟带的污染物与次降雨径流污染物总量的比例不一定高。因而,仅采用浓度过程曲线难以准确描述初期冲刷现象。

1.2 质量初期冲刷及其判别

由于浓度初期冲刷定义的局限性,以及随着国内外学者研究的深入,又提出质量初期冲刷(Mass First Flush)的概念^[1]。当雨水径流初期污染物的累积输送速率大于径流量累积输送速率时,即降雨初期占径流总量较小比例的雨水径流中挟带了占次降雨污染负荷较大比例的污染物时,认为存在初期冲刷,可以用下式表示^[3,4]:

$$\frac{M(t)}{V(t)} = \frac{\int_0^t Q(t)C(t)dt / \int_0^T Q(t)C(t)dt}{\int_0^t Q(t)dt / \int_0^T Q(t)dt} \approx \frac{\sum_{i=0}^k \bar{Q}(t_i) \bar{C}(t_i) \Delta t / \sum_{i=0}^n \bar{Q}(t_i) \bar{C}(t_i) \Delta t}{\sum_{i=0}^k \bar{Q}(t_i) \Delta t / \sum_{i=0}^n \bar{Q}(t_i) \Delta t} > 1 \quad (1)$$

式中 $M(t)$ —— t 时刻的污染物输送速率

$V(t)$ —— t 时刻的径流量输送速率

$Q(t)$ —— t 时刻的径流流量

$C(t)$ —— t 时刻雨水径流中污染物浓度

t ——降雨历时

T ——次降雨的降雨总历时

$\bar{Q}(t)$ ——连续测样的平均流量

$\bar{C}(t)$ ——连续测样的污染物平均浓度

Δt ——连续测样的时间增量

当 t 处于降雨历时 T 的初期且 $M(t)/V(t) > 1$ 时,代表初期冲刷现象发生。在实际研究中,很难得到径流量 $Q(t)$ 和径流污染物浓度 $C(t)$ 的连续变化关系。因而,为便于试验研究,可以进行如式(1)中的近似变化。

1.3 典型的冲刷曲线及初期冲刷现象的量化

根据质量初期冲刷的定义,对于次降雨事件的任一种污染物,绘制无量纲累积曲线来判断是否有初期冲刷现象发生。以 $M(t)$ 为纵坐标, $V(t)$ 为横坐标做图,可得次降雨污染物无量纲累积曲线,图1给出了几种代表性的曲线形式来描述不同的冲刷规律。

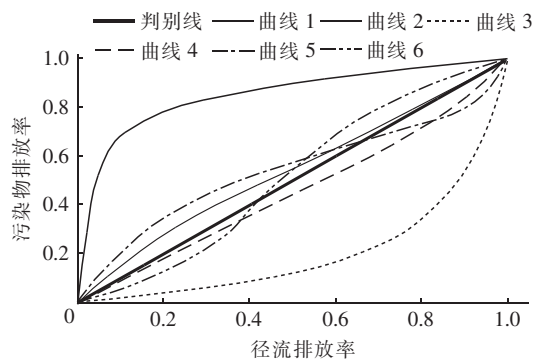


图1 几种典型的冲刷规律曲线

Fig. 1 Curve of typical flush regularity

图1中的对角线表示整个降雨过程中径流污染物的均衡迁移,即污染物排放速率在次降雨事件中不变, $M(t)/V(t) = 1$,将其作为初期冲刷存在与否的判别线。当曲线前段位于对角线上方时,初期径流中污染物排放率大于径流排放率,存在初期冲刷现象(曲线1、2和5),且曲线前段越高,初期冲刷现象越明显、越强烈;反之曲线前段位于对角线下方时,污染物排放率小于径流排放率,初期冲刷现象不存在(曲线3、4和6)。

一些研究者试图进一步量化分析质量初期冲刷

规律,表 1 总结了部分国外学者对初期冲刷的量化描述。

表 1 部分国外学者提出界定初期冲刷现象的量化比例

项 目	初期径流的 体积所占比例 $p_1/\%$	初期径流中 污染物所占 总比例 $p_2/\%$	提出 时间
Stahre and Urbonas	20	> 80	1990 年
Wanielista and Yousef	25	> 50	1993 年
Hsaget 等	30	> 80	1995 年
Bertrand-Krajewski 等	30	> 80	1998 年
Deletic	20	> 40	1998 年

质量初期冲刷概念及量化描述方法似乎比浓度初期冲刷更科学合理。但随着研究的深入和大量试验数据的积累,一些研究者发现,符合上述界定的初期冲刷现象较少见,在有些研究中出现的概率甚至不足 1%^[2,3]。这说明在不同研究条件下,采用固定的比例来界定初期冲刷现象也有不足。

事实上,降雨、汇水区域、污染物的累计等条件会有很大的不同,径流污染物冲刷规律具有很大的随机性、多变性和复杂性,因此不能一概而论,必须对不同条件下的初期冲刷分别进行研究和讨论。为避免片面和绝对,应该从相对意义上来定义或理解初始冲刷现象:当无量纲累积曲线前段部分明显高于对角线时,即可认为有初期冲刷现象发生;曲线偏离判别线的不同距离代表初期冲刷强度的不同,曲线的前段越高于判别线,初期冲刷现象越明显。从量化的角度看,具有较小的 p_1 和较大的 p_2 时即存在初期冲刷现象,两者相差越大,初期冲刷越明显。

2 两种典型条件下的不同初期冲刷分析

需要特别指出,不同学者对初期冲刷的研究结果相差较大甚至有截然不同的结论^[2,3,8],除了表述差别和众多的随机影响因素外,一个十分重要的原因是研究的取样点的显著不同。更确切地说,根据冲刷发生和取样点的位置不同,对径流的初期冲刷研究和讨论首先应该区分小汇水面源头冲刷和管渠冲刷两种典型的条件。

用图 2 概化的降雨径流过程线说明两种典型条件下的初期冲刷现象。图中两条曲线分别为硬化的小汇水面(屋面、路面等)和雨水管道系统中的流量过程线,曲线上的径流水样为典型的道路和城市管道中有代表性的一次实际径流过程的水样。

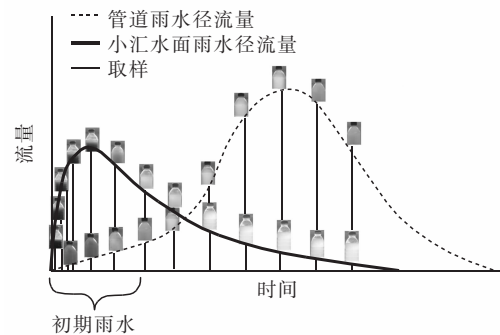


图 2 两类典型条件下的冲刷现象

Fig. 2 Flush phenomenon of two typical condition

2.1 小汇水面源头冲刷

小汇水面源头冲刷(以下简称为源头冲刷)主要指屋面、道路、停车场等很小的汇水面上的径流冲刷过程。源头冲刷中污染物主要来自大气污染物沉降、汽车泄漏和尾气排放、下垫面材料的污染、动植物废物(落叶、动物排泄物等)、杀虫剂及融雪剂残留、城市垃圾和土壤侵蚀等。

源头小汇水面径流一旦形成,其流量迅速增加并很快达到峰值(一般为 10 min,理论上即暴雨强度公式中的 t_1),而径流污染物浓度峰值一般也多出现在初期,即峰值流量区域通常与较高的污染物浓度重合(见图 2 实线的初期雨水部分)。因此,在屋面、路面、停车场等硬化小汇水面很容易观测到较明显的初期冲刷现象,并可用浓度初期冲刷和质量初期冲刷来描述。

2.2 管渠冲刷

相对于源头冲刷,管渠内的冲刷现象则更为复杂。随着汇水区域面积的增大,雨水径流通过雨水管渠汇集排放,根据雨水管网形态和雨水口的分布情况,可将汇水区域分成多个小汇水面。同一时刻不同小汇水面产生的雨水径流输送到管网出口(或监测点)的时间存在较大的差异,造成远端小汇水面的初期雨水与附近小汇水面的后期雨水在雨水管道内混合;此外,由于各小汇水面规模、污染程度不同,进入管道系统的雨水径流量和污染物浓度也存在差异,一定程度上掩盖了管道中(或监测点处)的初期冲刷现象。

另一方面,由于管道系统的流量峰值出现时间后延(见图 2 中的虚线峰值,理论上即暴雨强度公式中的 $t_1 + mt_2$),及多种复杂因素的影响导致污染物浓度及其峰值出现较大幅度波动和滞后,即更多

污染物质量输送后移,初期冲刷现象被弱化甚至消失。数学模型分析和实测结果证明,管道系统的大小和拓扑结构、流量峰值和浓度峰值的到达时间及峰值区域的相互叠加关系、管道沉积物等因素对雨水管道中污染物输送有较大影响^[7],也明显影响管道系统中初期冲刷现象存在与否及程度。

基于 SWMM 模型对小汇水面与管道中污染物输送规律进行模拟,可量化分析沉积物对管道径流污染物浓度变化的影响^[8]。源头汇水面冲刷模型和管道内沉积物排放模型的叠加,决定了雨水干管污染物浓度的变化规律。研究表明,当雨水源头冲刷和对管道沉积物冲刷作用引起的 COD 流失量大致相等($K=1$)时,干管浓度出现了两个峰值[见图 3(a)]。当管道沉积物冲刷引起的 COD 流失量是源头冲刷引起的 COD 流失量的 10 倍($K=10$)时,虽然也存在两个峰值,但第二个峰值明显高于第一个[见图 3(b)],此时管道沉积物成为影响管道污染物输送规律的重要因素。

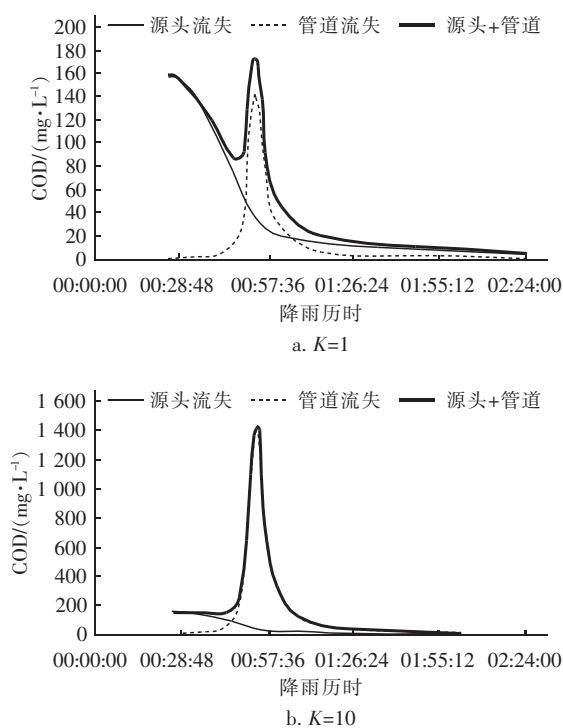


图3 源头冲刷和管道内沉积物冲刷对浓度变化过程的影响

Fig. 3 Influence of source flush and sediment to pollutant concentration

以 2009 年 7 月 4 日对北京某城区雨水管道系统末端径流的监测结果为例进行分析(图 4)。管道

1 和管道 2 是位于同一区域两套独立的雨水管道系统,即汇水面污染条件基本相同;监测数据是在同一降雨事件和同一时间段内取得的,即降雨条件完全相同。然而,这两套雨水管道系统中却呈现明显不同的污染物(尤其是 SS 浓度)输送规律,但都显示出类似于图 3 模拟的管道内的冲刷规律。需要注意,这时候虽然一些曲线还具有一定的浓度初期冲刷现象,但由于径流流量峰值的显著后移,测算出的质量初期冲刷可能不明显甚至消失。

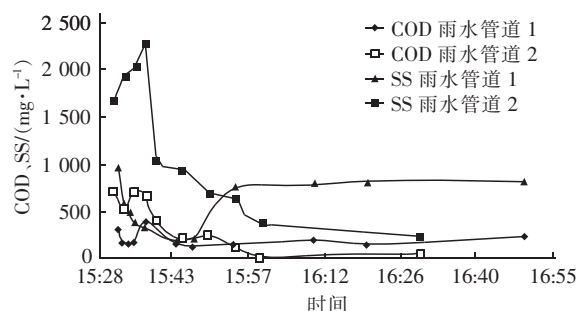


图4 雨水管道系统末端径流中污染物浓度变化

Fig. 4 Variation of pollutant in terminal runoff of rainwater pipeline

综上分析,管道沉积物状况及其冲刷作用、管网拓扑结构、汇流时间、各小汇水面污染物累积及源头冲刷作用、不同小汇水面径流在管道中的混合等诸多因素共同叠加,形成复杂的“管渠冲刷”现象。初期冲刷现象在较大汇水区域的管道汇流中常常被减弱,甚至完全被掩盖。一些研究者质疑初期冲刷的存在应该多属这种情况。

3 初期冲刷的其他一些影响因素

影响初期冲刷的因素较多,在国内外许多研究中均有分析。除了上述两种典型的条件外,其他一些主要影响因素有汇水区域特性、污染物特性、降雨特性、降雨时间间隔等。

汇水区域特性除上文提到的汇水区域规模和污染程度外,汇水区域的坡度、平整度、不透水面积比例、植被情况等也是重要的影响因素。在其他条件相同的情况下,坡度越大、不透水面积比例越高、表面越平整光滑,初期冲刷作用就越明显。

污染物特性主要指溶解性和非溶解性、颗粒大小和密度等。显然,溶解性或容易被径流冲刷携带的污染物越多,初期冲刷现象会越明显,反之亦然。

降雨特性主要指次降雨事件的降雨量、降雨强度和降雨历时等特性。对城市建筑屋面和道路雨水

多年的监测研究发现,降雨强度、降雨量和降雨历时对初期雨水水质影响较为显著^[10]。一般来说,针对小汇水面,降雨量和降雨强度愈大、降雨历时愈短,则初期冲刷现象愈明显。当然,具体还取决于降雨的时程分配。

两场降雨事件间隔时间也是影响初期冲刷的重要因素。在不考虑其他因素的情况下,降雨间隔时间越长,污染物积累越多,初期冲刷现象越明显。通常,每年雨季第一场降雨的初期冲刷现象较为明显。

4 导致初期冲刷困惑的其他原因

初期冲刷现象及其基本理论虽然已得到国内外学者的广泛认同。但除了上述定义和描述的差别、缺乏对两种典型条件的区分这两个导致关于初期冲刷困惑和争论的最主要原因外,以下一些人为因素也会造成困惑:不合理的人工取样、对降雨事件不恰当的取样时间、缺乏与水样匹配的降雨及径流资料、对某一降雨事件取样数量不足或者监测的降雨事件不足,尤其是由于降雨的随机和取样的困难没有取到最初期的径流水样,都难以获得可信的研究结果,甚至得到错误的信息和结论。还有些研究忽略了降雨、产流、汇流、排放等过程的复杂性和随机性,仅在一种条件下以一两场降雨事件的监测数据就推出结论,这种以偏概全、数据与结论的错误都会导致对初期冲刷的误解。

5 “初期雨水”概念问题

与城市雨水径流污染控制相关的另一个重要问题是初期雨水问题。目前,国内一些研究者认为城市径流污染控制主要是初期雨水的问题,但实际情况要复杂得多。

对初期雨水可以有多种理解,首先应明确“初期雨水”的概念。第一,每年雨季来临前的第一场或头几场降雨可称为整个雨季的初期雨水,这种雨水径流虽然较脏,但污染负荷占全年径流污染负荷的比例并不一定很大。第二,对每一场降雨事件的初期雨水径流是次降雨事件的初期雨水,在这个意义上与初期冲刷有关。有时还分为降雨的初期雨水(落到地面之前,淋洗、吸收大气中污染物较多的那部分初期降雨)、产流的初期雨水(下垫面上形成的初期径流)和汇流的初期雨水等。后者还会因观测或控制点位置的不同有很大的区别。

在城市雨水径流污染控制中,初期雨水通常是指第二种含义。基于对初期冲刷现象的分析,至少

应根据汇水区域的大小和输送系统的不同分为源头初期雨水和管道系统汇流的初期雨水。

由于小汇水面上的初期冲刷现象较明显,初期雨水可作为径流污染控制的重点。然而,随着汇水面的增大,尤其是进入城市庞大而复杂的管道系统后,初期雨水污染在次降雨事件总污染负荷中的权重显著减小。发达国家的 BMP、SUDS 等成熟的管理技术体系及广泛采用的水质控制容积都不是针对初期雨水的。因而,针对城市区域的雨水污染控制,笼统、简单地说“控制初期雨水”是不科学的,甚至会造成误导;仅靠控制管道系统中的初期雨水难以解决整个城市雨水径流污染问题,澄清这一点非常重要。

大范围控制城市雨水径流污染是一项复杂的系统工程,需要综合性的措施。源头控制(如 LID 体系)和“水质控制容积”方法^[11,12]为控制城市区域径流污染提供了有效的途径。

6 结论

① 雨水径流污染物的输送是极其复杂和随机的过程,影响初期冲刷的因素很多,从相对意义上理解或界定初期冲刷较为合理。按照质量初期冲刷的方法绘制出无量纲累积曲线(LV 曲线),当曲线前部(降雨初期)明显高于判别线时,认为有初期冲刷现象发生,曲线前部高于判别线越多,初期冲刷现象越明显。

② 雨水径流在源头汇水面和雨水管道系统中有明显不同的污染及冲刷输送规律,必须对汇水区域和输送系统特性进行分析,分别进行研究和讨论。把这两种显著不同的冲刷问题混为一谈是导致不必要争论与困惑的主要原因之一。对初期冲刷定义的不明确、取样准确性问题、数据的不足和研究中以偏概全等也是导致对初期冲刷误解的一些原因。

③ 在不同汇水区域或管渠系统,初期冲刷现象有明显的差异,制定城市雨水径流污染控制措施应更具针对性和系统性。在源头汇水面,初期冲刷现象明显,可采用各类源头措施高效率地控制初期雨水;大型城市管渠系统中的初期冲刷现象常常不明显甚至可能完全消失,仅控制初期雨水不足以有效控制径流污染;在较大范围内控制城市雨水径流污染,源头控制和水质控制容积方法都是较为有效的途径。

参考文献:

- [1] Michael K Stenstrom, Masoud Kayhanian. First flush phenomenon characterization [EB/OL]. http://www.dot.ca.gov/hq/env/stormwater/pdf/CTSW-RT-05-073-02-6_First_Flush_Final_9-30-05.pdf, 2009-10-21.
- [2] Lee J H, Bang K W, Ketchum L H, *et al.* First flush analysis of urban storm runoff [J]. *Sci Total Environ*, 2002, 293: 163-175.
- [3] Sansalone John J, Cristina Chad M. First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds [J]. *J Environ Eng*, 2004, 130(11): 1301-1304.
- [4] Lee Jun Ho, Bang KiWoong. Characterization of urban stormwater runoff [J]. *Water Res*, 2000, 34(6): 1773-1780.
- [5] 车伍, 刘燕, 欧岚. 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.
- [6] 车伍, 张炜, 李俊奇, 等. 城市雨水径流污染的初期弃流控制 [J]. *中国给水排水*, 2007, 23(6): 1-4.
- [7] 潘国庆, 车伍, 李海燕, 等. 雨水管道沉积物对径流初期冲刷的影响 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29(7): 771-776.
- [8] 谭琼, 李田, 高秋霞. 上海市排水系统雨天出流的初期效应分析 [J]. *中国给水排水*, 2005, 21(11): 26-30.
- [9] 王和意, 刘敏, 刘巧梅. 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*, 2006, 17(2): 181-185.
- [10] 车伍, 欧岚, 汪慧贞, 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设备*, 2002, 3(1): 33-37.
- [11] 王建龙, 车伍, 易红星. 低影响开发与绿色建筑的雨水控制利用 [J]. *中国给水排水*, 2009, 25(14): 6-9.
- [12] 潘国庆, 车伍, 李俊奇, 等. 中国城市径流污染控制量及其设计降雨量 [J]. *中国给水排水*, 2008, 24(22): 25-29.

E-mail: chew0812@126.com

收稿日期: 2010-10-21