

# 城市降雨径流污染初始冲刷效应对 BMPs 选择的启示

刘勇华, 高超, 王登峰, 汪磊

(南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210093)

**摘要** 指出城市降雨径流污染初始冲刷效应(FFE)在城市非点源污染的研究中占有重要地位。综述 FFE 的判定及大小量化方法、季节性 FFE 的概念和污染物的相态对 FFE 的影响。FFE 初中期雨水径流污染物浓度高的特性,为选择经济高效的**最佳管理措施(BMPs)**提供了理论依据和重要启示。结合 FFE 及冲刷过程中污染物的形态提出的工程 BMPs,能使资源配置和污染控制效果达到最优化,为城市公共管理部门的决策和实践提供建议。

**关键词** 城市降雨径流污染;初始冲刷效应;最佳管理措施;形态

中图分类号:X52 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2009)06-0029-04

## First flush effect of urban storm water runoff pollution on implications for BMPs selection

LIU Yong-hua, GAO Chao, WANG Deng-feng, WANG Lei

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract** The importance of the first flush effect (FFE) of urban storm water runoff in urban non-point pollution is described. The judgment, the quantification method, the seasonal FFE concept, and the phase state effect on FFE are reviewed comprehensively. The feature of a higher concentration of the pollutants during the initial period of storm water runoff supplied a theoretical basis and important implication for selecting economical and effective best management practices (BMPs). The proposed engineering BMPs considering the combination of the FFE and the patterns of flushed pollutants were useful approaches for optimizing resources allocation and pollution control, which can help guide the city public management sector in instituting effective policies and practices.

**Key words** urban storm water runoff pollution; first flush effect (FFE); best management practices (BMPs); pattern

水危机已成为目前世界上最引人注目的环境问题之一,水危机不仅表现在水量的不足,更反映在水质的恶化方面。点源污染易于识别和治理。随着点源污染控制能力的提高,非点源污染的严重性逐渐显现出来。在美国,非点源污染已经成为环境污染的第一因素,60%的水资源污染起源于非点源污染<sup>[1]</sup>。非点源污染,是指溶解的或固体的污染物从非特定的地点,在降水和径流冲刷作用下,通过径流过程而汇入受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等)引起的水体污染<sup>[2]</sup>。和点源污染相比,非点源污染的不确定性<sup>[3]</sup>使得对它的防治比较困难。目前如果盲目地对城市非点源污染进行处理,需要花费大量

的人力物力,处理效率低、困难大,因此引入初始冲刷效应(First Flush Effect, FFE)的概念,对初始径流重点处理,为其高效处理提供一条捷径。FFE 越来越受到研究者的重视<sup>[4-5]</sup>,特别是在城市非点源污染控制的**最佳管理措施(Best Management Practices, BMPs)**方面<sup>[6-9]</sup>,它能使 BMPs 更经济更有效。

### 1 城市降雨径流污染及 FFE

评价城市降雨径流污染状况一般采用降雨场次污染物平均浓度(Event Mean Concentration, EMC)<sup>[4]</sup>,即整场降雨过程中径流量的加权平均浓度,能大致反映径流中污染物的整体污染情况,但不能反映污

染物浓度或排放量的时间变化,而污染物的时间变化在 BMPs 却很重要。

城市降雨径流污染的排放具有显著的时间尺度特征。在短期内(场次降雨)城市径流污染过程与负荷过程随着降雨特征及城市地表污染物累积状况的不同而表现出随机的变化,这种变化使得在同一场降雨中,污染物浓度及排放速率亦随着降雨过程的变化而变化。通常城市降雨径流污染物浓度随着时间延长而降低,径流的初始阶段产生更多的污染物,即场次 FFE。在长期内(雨季)城市非点源污染物的排放表现为晴天积累、雨天排放的特征,会产生季节性 FFE。

### 1.1 FFE 的判定

在通常情况下,初期雨水径流的污染物浓度在整个径流过程中是最高的,这种现象被称为 FFE。FFE 使得初期径流携带大量污染物进入受纳水体,为了使降雨径流污染得到科学合理的管理控制,探讨 FFE 内在的控制机制,如何定量化表示初期冲刷就显得非常重要。对此,国外开展的大量研究多采用 Geiger<sup>[10]</sup>的定义,即以污染物的累积污染负荷与累积径流量的相关性为基础,以两者所形成无量纲累积曲线的发散来确定是否发生了 FFE。

如图 1 所示 45°线(对角线)表示在整个降雨径流过程中污染物排放速度不变,称为平衡线。如果污染物的无量纲累积曲线位于平衡线之上,则认为污染物排放大于径流输出,发生 FFE。相反当曲线位于平衡线以下,则表示无 FFE。累积曲线与平衡线的偏差比例代表 FFE 的强弱。

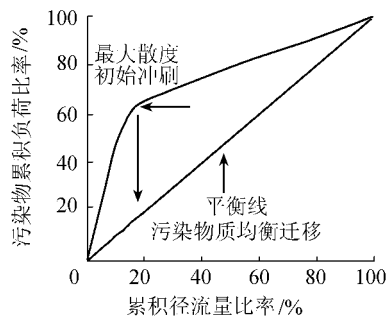


图 1 Geiger 对初始冲刷的定义

### 1.2 定量化 FFE 的大小

FFE 的大小可以用初始冲刷系数  $k_n$  来量化每次降雨及其每个水质指标<sup>[9]</sup>。 $k_n$  值描述降雨过程中产生的部分污染物,可以计算其任何点的污染物的量。计算公式如下:

$$k_n = \frac{\int_0^T c(t)q(t)dt}{M} \bigg/ \frac{\int_0^T q(t)dt}{V}$$

式中: $n$  是指径流量的百分数,范围从 0~100%; $M$  为污染物的总量; $V$  为总径流量; $c(t)$ 、 $q(t)$  分别为随时间变化的污染物浓度和径流流量。

按照该定义,当径流开始时, $k_n$  的值等于 0;当径流结束时, $k_n$  的值等于 1.0。径流过程当中的  $k_n$  值大于 1 预示着发生初始冲刷。例如, $k_{20\%}$  等于 3.0 即表示初期 20% 的径流量产生的污染物达到 60%。 $k_n$  值对定量初始冲刷的大小非常有效,并且被用来理解初始冲刷的衰退情况。

Bertrand-krajewski 等<sup>[11]</sup>对初始冲刷也做了定义,即在一次降水径流过程中占径流总量 30% 的初始径流至少排放 80% 的污染物称之为初始冲刷,又称 30/80 的初始冲刷。

### 1.3 季节性 FFE

Lee 等<sup>[6]</sup>在研究中指出美国加州的地中海气候(冬季和春季降雨,夏季干燥),漫长的夏季干燥期为污染物的积累提供条件,因此在雨季刚到来的初期会发生季节性的初始冲刷现象,污染物的浓度会很高。季节性 FFE 和一场降雨 FFE 一样,对 BMPs 有重要指示作用。发生季节性 FFE 主要是因为降雨期到来前有一个较长的干燥过程<sup>[7]</sup>,为季节性 FFE 污染物的形成过程提供了物质基础,因此 FFE 的大小主要受干燥期长短的影响。

同样,我国降雨四季分明,差异明显,有很强的季节性变化规律。我国大部分地区降雨受季风气候的影响,夏季和秋季降雨偏多,而冬季和春季偏少,冬春两季的干燥期会积累大量的污染物到雨季到来时释放,因此在雨季到来初期的雨水管理工作能起到很好的控污效果。

### 1.4 污染物的形态对 FFE 的影响

影响 FFE 大小的因素是多方面的,污染物的类型、汇水区面积、不透水面面积和降雨强度等<sup>[4]</sup>。笔者仅讨论与 BMPs 选择关系密切的污染物的形态及与之相关的降雨强度。

城市降雨径流污染主要分为两个过程:形成过程和冲刷过程<sup>[12-13]</sup>,其中污染物冲刷的大小主要受到降雨强度的影响,降雨强度大时,径流带动的颗粒物多,污染物的颗粒态占主要部分。但如果降雨强度小时,径流不足以带动微粒,溶解态污染物占大部分。研究表明<sup>[12]</sup>溶解态的重金属(如 Zn)比颗粒态 FFE 更强烈,是因为不透水地表的溶解态重金属更容易被侵蚀,随地表径流带走,其污染物浓度不太受降雨时间和降雨强度的限制。同样,溶解态物质比颗粒态物质(如 TSS、Pb)更容易发生季节性 FFE,可能也是由于受到降雨强度的影响。如果降雨强度很弱,径流不足以带动微粒,带走的悬浮颗粒很少,就

会减小季节性 FFE。相反,如果降雨初期的降雨强度很大,就有可能增大季节性 FFE<sup>[6]</sup>。

## 2 BMPs 简介

BMPs 是一种非点源污染控制体系,其核心是在污染物进入水体对水环境产生污染前,通过各种经济高效、满足生态环境要求的措施使其得到有效控制。美国环保局(USEPA)把 BMPs 定义为“任何能够减少或预防水资源污染的方法、措施或操作程序,包括工程、非工程措施的操作和维护程序<sup>[14]</sup>”。非工程 BMPs 是从源头上减少潜在污染物的产生和积累来提高水质的措施,如污染源管理措施<sup>[15-16]</sup>和城市土地规划管理措施等<sup>[17]</sup>。工程 BMPs 是指按照一定暴雨标准和污染物去除标准设计建造的各种工程设施。工程性 BMPs 以径流过程控制为核心,在削减或控制污染物的同时,通过滞留与渗透作用能显著减少径流量、延长径流过程,从而削减下游河道的洪峰流量。笔者主要介绍与 FFE 密切关联的 3 类工程 BMPs。

a. 滞留池。包括干式池和湿式池,因造价低、结构简单、施工方便而得到广泛应用。各种型式的滞留池本质上都是拦截雨水径流,经过一定时间的沉淀后再排放到市政管网或河道,沉淀过程中可去除径流中大部分固体悬浮物。滞留池的规模主要取决于径流量的大小,其容量大小计算公式如下<sup>[8]</sup>:

$$V_d = C I_r A T_d - \Omega T_d$$

式中: $V_d$  为滞留池的容量; $C$  为径流系数; $I_r$  为降雨强度; $A$  为流域面积; $T_d$  为降雨持续时间; $\Omega$  为径流泻出时流量。

b. 渗透沟/池。适合土壤渗透性较好且地下水水位相对较低的地区选用,对溶解性和颗粒性污染物有良好的去除能力。渗透沟底部为沙滤层,顶部保护层与周边地面齐平,中间填充碎石。渗透沟处理径流量的能力常常受到土壤渗透力的影响,因此集水区面积不宜太大,但为提高其滞水量,可设计成渗透池,以延长径流停留时间,提高去污能力。

c. 植被过滤带。主要通过生物净化和拦截、沉淀作用去除污染物。它由草、林及其他湿地植物组成,一般呈带状建造在潜在的污染源与受纳水体之间,通过沉积、过滤、吸附及化学反应能大大降低径流中磷、氮和固体悬浮物浓度等。去污能力主要取决于带状宽度,且随着宽度的增加去污能力会显著提高。杨勇等<sup>[18]</sup>的研究发现植被过滤带能够有效降低地表径流中约 50% 的 TSS,对 TP、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的去除率分别达到 52% 和 10%。

## 3 BMPs 的选择

### 3.1 FFE 对 BMPs 选择的启示

目前由于对城市非点源污染处理需要花费大量的人力物力,大面积的径流处理比较困难,因此引出了初始冲刷的概念,即在一次降雨事件中暴雨产生的初期径流携带了大量的污染物质,只要对初始的那部分降雨径流采取 BMPs 进行处理,就可以很好地保护受纳水体的水质,这样既经济又有效。

$k_n$  值为处理初始径流量提供一个定量的价值尺度,如前所述, $k_{20\%}$  为 3.0 即 20% 的初始径流量产生的污染物达到 60%,也意味着单位体积的初始径流量所含污染物是之后径流量污染物浓度的 3 倍。如果 BMPs 的价格与处理径流量的体积成正比,则  $k_n$  值越大越经济,效率越高。这个概念可以用来区分不同 BMPs 的优先次序。

Jung 等<sup>[19]</sup>提到韩国环境部在汉江流域实施的 BMPs 的实验证明:对发生 FFE 的地区,建设水动力设施,去污的效果显著。而没有发生 FFE 的地区,最好使用其他的 BMPs。Barco 等<sup>[9]</sup>认为渗透池是“FFE 有效型”BMPs 之一,是因为它能使初始径流比后期径流优先得到处理。渗透池初始阶段去污能力很高,当达到其最大容量时效率就会大大降低。以径流初始冲刷定量化的结果为基础建立的过滤沟、生物滞留池和沙地过滤池对初期径流的处理效果很好(表 1)<sup>[20-21]</sup>。

表 1 典型的污染物去除效率

污染物类型	去除率/%		
	过滤沟	生物滞留池	沙地过滤池
沉积物	90	90	90
TP	60	70~80	33
TN	60	68~80	21
重金属	90	93~98	45
细菌	90	90	
有机质	90	90	
BOD	70~80		70

### 3.2 污染物的形态对 BMPs 的影响

识别 FFE 中污染物的形态,也是选择 BMPs 的重要参考。污染物是以颗粒态还是溶解态的形式存在,BMPs 的去污效果会有很大的差异。物理式 BMP(如滞留池)对颗粒态污染物(如 TSS)去除效果显著,而对溶解态污染物(N、Zn)的处理率很低,需要采用生物式 BMP(如植被过滤带)。

区分污染物的颗粒态,一般采用比较污染物指标与 TSS 的相关性程度来确定<sup>[8,22]</sup>,如果某种污染物指标与 TSS 具有很强的相关性,就认为以颗粒态为主,采取一般的物理处理方法(如滞留池)能达到

很好的效果。也有研究<sup>[23-24]</sup>直接计算污染物颗粒态所占的百分比,从而确定其 BMPs。如文献<sup>[24]</sup>指出,颗粒态氮(PN)占 TN 的 61%,颗粒态磷占 TP 的 78%,显然用滞留池来处理效果显著。相反,Taylor 等<sup>[23]</sup>的研究着重分析了溶解态氮在 TN 中的比值,而且识别了有机氮中的溶解态部分,纠正了以往将有机氮等同于颗粒氮的错误,最终发现溶解态氮占 84%,此时溶解态氮占绝对优势,若使用滞留池来处理效率很低,就应改用其他的 BMPs。

FFE 及其污染物的形态是选择 BMPs 的两个最为重要的因素,为使其达到最佳还有其他一些现实条件。Jung 等<sup>[19]</sup>采用的标准是:可利用的土地、自然的排水系统和尽量少的维护,因此 BMPs 一般被安置在河岸地区、河床和国有土地上。高超等<sup>[25]</sup>提出了基于非点源污染控制的景观格局优化方法与原则,使得资源利用和非点污染控制效果达到最佳。

## 4 结 语

城市暴雨径流污染初始冲刷效应在 BMPs 选择中占有很重要的地位,特别是在设计工程性 BMPs 中的作用尤为突出。结合 FFE 设计的工程 BMPs 能否真正做到经济有效,还要在实践中进一步探索。而且由于城市非点源污染的复杂性,控制污染由单一的 BMP 难以实现,还必须采用多种 BMPs 相结合的方法。

## 参考文献:

[1] USEPA. National water quality inventory: report to congress executive summary[M]. Washington DC: USEPA, 1995.

[2] NOVOTNY V, OLEM H. Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1993.

[3] 余红, 沈珍瑶. 非点源污染不确定性研究进展[J]. 水资源保护, 2008, 24(1): 1-5.

[4] LEE J H, BANG K W, KETCHUM L H, et al. First flush analysis of urban storm runoff[J]. Science of the Total Environment, 2002, 293: 163-175.

[5] LI L Q, YIN C Q, HE Q C, et al. First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19: 295-299.

[6] LEE H J, LAU S L, KAYHANIAN M, et al. Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges[J]. Water Research, 2004, 38: 4153-4163.

[7] SOLLER J, STEPHENSON F, OLIVIERI K, et al. Evaluation of seasonal scale first flush pollutant loading and implications for urban runoff management[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 76: 309-318.

[8] KIM G, YUR J, KIM J. Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in Daejeon City, Korea[J]. Journal of

Environmental Management, 2007, 85: 9-16.

[9] BARCO J, PAPIRI S, STENSTOM M K. First flush in a combined sewer system[J]. Chemosphere, 2008, 71: 827-833.

[10] GEIGER W. Flushing effects in combined sewer systems[J]. Urban Storm Drainage, 1987, 4: 40-46.

[11] BERTRAND-KRAJEWSKI J L, CHEBBO G, SAGET A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon[J]. Water Research, 1998, 32(8): 2341-2356.

[12] VAZE J, CHIEW F S. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface[J]. Urban Water, 2002, 4: 379-389.

[13] GNECCO I, BERRETTA C, LANZA L G, et al. Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy[J]. Atmospheric Research, 2005, 77: 60-73.

[14] BINGHAM D, BOCUCHER W, BOUCHER P, et al. Urban runoff pollution prevention and control planning[M]. Washington DC: USEPA, 1993.

[15] 朱继业, 袁贻俭. 城市水环境非点源污染总量控制研究与应用[J]. 环境科学学报, 1999, 19(4): 415-420.

[16] MARTIN C, RUPERD Y, LEGRET M. Urban stormwater drainage management: the development of a multicriteria decision aid approach for best management practices[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 181: 338-349.

[17] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响[J]. 环境科学, 2004, 25(6): 32-39.

[18] 杨勇, 操家顺. BMPs 在苏州市非点源污染控制中的应用[J]. 水资源保护, 2007, 23(6): 60-63.

[19] JUNG Y J, STENTROM M K, JUNG D I, et al. National pilot projects for management of diffuse pollution in Korea[J]. Desalination, 2008, 226: 97-105.

[20] SCHUELER T R. A current assessment of urban best management practices[R]. Washington DC: Metropolitan Washington council of governments, 1992.

[21] GALLI J. Peat sand filters: a proposed stormwater management practice for urbanized areas[R]. Washington DC: Metropolitan Washington council of governments, 1990.

[22] GOONETILLEKE A, THOMAS E, GINN S, et al. Understanding the role of land use in urban stormwater quality management[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 74: 31-42.

[23] TAYLOR G D, FLETCHER T D, WONG T H F, et al. Nitrogen composition in urban runoff implications for stormwater management[J]. Water Research, 2005, 39: 1982-1989.

[24] ZHAO J W, SHAN B Q, YING C Q. Pollutant loads of surface runoff in Wuhan City Zoo, an urban tourist area[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19: 464-468.

[25] 高超, 朱继业, 袁贻俭, 等. 基于非点污染控制的景观格局优化方法与原则[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 109-116.

(收稿日期: 2009-02-18 编辑: 徐娟)