

文章编号: 1004-8227(2009)10-0992-05

城市地表污染物累积和降雨径流冲刷过程研究进展

陈 桥^{1,2}, 胡维平^{1*}, 章建宁³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 常州市环境监测中心站, 江苏 常州 213014)

摘 要: 城市地表污染物是城市降雨径流污染的主要来源, 其累积和降雨冲刷过程分别是沉降—悬浮—再沉降以及悬浮—沉淀—再悬浮的动态过程。描述累积过程的模型主要有线性、指数、对数等形式, 其中以指数及一些变形形式发展相对成熟并得到了广泛的应用。这些模型都将雨前干期天数(ADWP)作为主要的影响因子。而描述冲刷过程的模型主要基于一级反应动力学假设, 这类模型已被人们广泛接受。为使冲刷模型更接近实际, 人们进一步在其中引入了雨天排污因素, 并取得较好的成效。虽然城市地表径流的研究取得了较大的进步, 但是目前的模型基本属于经验型或基于大量监测数据的统计学模型, 尚缺对污染物输移过程的机理性描述。因此, 从城市地表污染物输移过程的机理出发, 建立城市地表污染物累积和降雨冲刷过程的物理模型是今后城市降雨径流污染研究工作中一个亟待解决的问题。

关键词: 城市; 地表污染物; 累积; 降雨径流; 冲刷

文献标识码: A

城市地表污染物是城市地表径流面源污染的主要污染来源^[1]。随着人们对点源及面源认识程度的提高及相应治理措施的实施, 面源污染对地表水污染的分担率已经发生了很大的改变。在面源污染中, 城市地表径流是仅次于农业面污染源的第二大污染源^[2]。城市地表径流包含很多有毒有害的污染物, 如固体废物碎屑、车辆排放物、空气沉降等, 其SS浓度明显大于城市污水的值, 碳氢化合物及重金属与未处理的城市污水基本处于同一个数量级等^[3,4]。累积(Build-up)和冲刷(Wash-off)是城市地表径流污染的主要过程, 研究其特征、影响因子、规律及定量化表示方法, 对了解路面径流雨水的污染状况及水质特征, 探讨路面径流中污染物排放规律, 研究开发可行的路面径流污染控制技术对策, 可为城市面源污染的控制管理决策提供科学依据。

1 累积与冲刷过程

城市区域是人类活动最为剧烈的社会区域, 形成了以不透水硬质下垫面为主要类型的城市用地状

况, 污染物类型多样、量较大、分布随机等特点, 导致了其特有的污染源汇特征。

城市地表污染物表现为晴天累积于地表, 雨天被冲刷进入排水系统, 汇集后排入水体的特征。人类活动产生的各种颗粒态污染物基本上首先存在于城市大气环境, 在各种外界因素的影响下, 部分将逐步沉降至不透水下垫面并积聚, 这个沉降的过程即城市地表污染物的累积过程。据研究^[5], 累积过程并非于污染物沉降于地面而终止, 而是一个沉降—悬浮—再沉降的动态过程。颗粒物在重力的作用下沉降, 较大颗粒首先沉降, 较小颗粒物悬浮于空气中在风等外力作用下发生碰撞并聚集直至无法克服重力作用沉降于地表, 而已经沉降的颗粒物因路面碾压使粒径变小, 在自然风和交通风等作用下可能悬浮再次进入大气环境。因此, 城市地表污染物处于沉降—悬浮—再沉降的动态过程, 直至达到平衡状态, 此时区域代表积聚的污染量为区域最大累积量(P_m)。从污染物开始累积至达到最大累积量的过程是一个理想的完整的累积过程。在实际情况中, 往往不能完成这样的完整过程, 人为清扫或降雨

收稿日期: 2008-09-03; 修回日期: 2008-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(30670351); 常州市科技局项目

作者简介: 陈 桥(1983~), 男, 江苏省盐城人, 硕士研究生, 主要从事水污染控制研究。E-mail: qiaoc1007@163.com

* 通讯作者

冲刷等因素使沉降于地表的污染物质减少, 沉降—悬浮过程受到干扰, 只是重复性地向累积值发展。

冲刷过程即在一场降雨过程中, 依据降雨强度及历时, 积累于地表的污染物质一部分或者全部被冲刷进入径流的过程。由于受到雨滴的侵蚀力及降雨径流的溶蚀作用, 沉积于地表的污染物进入径流, 其中一部分溶解其中, 一部分是处于悬浮状态的悬移质, 另一部分则是较大颗粒的推移质。悬浮颗粒物在随径流输移过程中同时受到重力和径流剪切力的作用, 临界剪切力相对应于径流的临界流速(即颗粒物的起动流速), 当实际流速大于临界流速时, 地表累积物即随径流输移, 当实际流速降低小于临界流速时, 悬浮物将再次沉淀于地表^[6]。因此, 冲刷过程也是悬浮—沉淀—再悬浮的动态过程(图 1)。

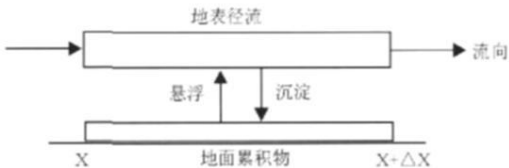


图 1 城市地表径流冲刷过程概念模式
Fig. 1 Conceptual Model of Wash-off

2 累积与冲刷过程定量化研究

影响城市地表污染物累积和冲刷过程的因素较多且随机性较大。通常认为, 累积过程取决于土地使用类型、气候状况、交通状况等因素; 冲刷过程则取决于降雨量、降雨强度、地表剪切应力等因素。国内外已经对此进行了大量的研究, 但是由于其过程的复杂性, 大多数定量描述累积与冲刷过程的数学模型都是基于经验型或大量监测数据所得的统计模式。

2.1 地表污染物累积模型

2.1.1 类型分析

根据目前国内外研究成果^[2,7~9], 城市地表污染物晴天累积过程可以表示为雨前干期天数(ADWP)的线性、对数、幂指数等函数形式(表 1)。线性模型将累积量用等效的晴天累积天数与日负荷量来计算, 其中等效累积天数由晴天数、路面清扫情况决定。该模型结构简单, 便于理解, 但是随着晴天数的增长, 累积量将呈现无上限增长, 并且该模型没有考虑污染物的晴天累积速率问题, 因此, 它的使用受到一定的限制。Sartor, Boycl (1972) 及 Roesner (1982) 认为累积速率在降雨之后的最初几天最快,

之后则逐渐减小^[7], Michaelis-Menton 模型即基于此认识。其中, P_m 、 k_s 的值与土地使用类型、气象条件、交通状况等因素有关, 但在实际应用中通常看作是固定参数, 忽略了其物理意义及其时空随机性。Deletic(1998)^[12]等人的研究发现, 累积过程还可以表示成晴天数的幂指数形式。表 1 中①式表示累积初期地表累积物残留量为零, 即一场降雨过程将地表冲刷干净; ②式表示存在初期污染负荷, 地表残留量不为零情况。可以看出污染物的累积速率随初期残留负荷而相应减小。对数模型是 Andreas Krein^[9]等人对公路路面累积过程研究所得出的统计关系, 并且发现存在较好的拟合度, Pb 和 PAH 的拟合度均达 0.98。上述研究显示在污染物累积速率较快的初期, 线性模型与指数模型存在一定程度的相似关系。Michaelis-Menton 模型与对数模型都可以认为是指数模型的简化和变形。根据污染物累积速率随时间增加而逐渐减小, 累积量趋近于极大值的假设, 累积模型可以表示成一个指数方程。

表 1 城市地表污染物累积模型的几种形式

Tab. 1 Build-up Models of Urban Surface Pollutants

分类	表达式
线性模型	$P_t = t_e \cdot Y(s)_u$; $t_e = (t - t_s)(1 - \varepsilon_s) + t_s$
Michaelis-Menton 模型	$P_t = P_s + P_m t / (k_s + t)$
幂指数模型	① $P_t = P_m (1 - e^{-k_1 t})$; ② $P_t = P_s + (P_m - P_s)(1 - e^{-k_1 t})$
对数模型(P_b ; PAH)	$P_t = a \cdot \ln t + b$

注: P_t 为上次降雨后经过 t d 晴天时集水区内的污染物累积量, kg; P_m 为集水区最大可累积污染物质, kg; $Y(s)_u$ 为集水区下垫面固体日负荷量, kg/d; t_e 为等效晴天累积天数, d; t 为最近一次降雨事件后所经历的天数, d; t_s 为最近一次清扫街道后所经历的天数, d; ε_s 为街道清扫频率; k_s 为半饱和常数即 $P_t = 1/2 P_m$ 时所经历的时间, d; k_1 为累积系数, d^{-1} ; a 、 b 为常数; 下同。

2.1.2 ADWP 对污染物累积的影响

城市地表径流污染具有晴天累积, 雨天排放的特征。因此, ADWP 常用来反映污染物的累积程度, 与降雨径流污染存在一定关系。表 1 中所述累积模型虽然形式不尽相同, 但都认为污染物的累积是 ADWP 的函数。值得注意的是, 因不同地区人类活动的方式和强度、大气污染状况以及风速风向等的不同, 地表污染物的累积特征不同^[10]。另外, 城市地表卫生管理, 清扫频率、效率等对地表污染物的累积具有重要的影响, 使得 ADWP 与污染物的累积关系不明确, 加之受到降雨特征对地表径流污染的影响, 因此, ADWP 与地表径流污染之间的关系更显复杂。以 SWMM 为代表的一些模型将 ADWP 作为主要的参数^[11]。李立清^[12]等人在对汉阳地区降

雨径流污染研究中发现 ADWP 对该地区径流污染具有显著影响,而英国的 MOSQUITO 模型则认为 ADWP 对径流污染没有明显的影响,认为降雨量是影响地表径流污染的主要因素^[2]。可见,由于影响因素较多,且随机性较大,累积模型的使用存在一定的地域性。当对一个研究空白区域进行污染物累积估算时,不能简单地运用其他区域的估算模式,需要在对该区域详细调查的基础上对其进行修正。

2.1.3 其他形式的累积模型

除上述以 ADWP 为主要变量的模型外,也有相对较复杂的累积模型,即街道地表污染物边坎累积模型^[13],如式(1):

$$P_t = A[1 - \exp(-Et)]/E$$
$$A = \frac{1}{2}W(C_1 + L) + C_2 \times F \times R$$
$$E = 0.0116(V_1 + V_2) \exp(0.088h) \tag{1}$$

式中: A 为单位边坎长度污染物累积速率, g/(m·d); E 为交通风和自然风引起的散失系数, 1/d; t 为街道清扫间隔时间, d; W 为街道宽度, m; C₁ 为大气降尘率, g/m²·d; L 为地表污染物在单位面积上的聚集速率, g/m²·d; C₂ 为交通车辆污染物散发率, g/m²·辆; F 为交通流量, 千辆/d; R 为道路状况系数; V₁、V₂ 分别为交通及自然风速, km/d; h 为道路边坎高度, cm。

该模型适用于具有边坎的城市街道,考虑的影响因素较多,包括清扫时间及频率,自然风,交通风,车流量等 9 个参数,并且在国内外都得到了较为成功的应用。施为光^[14]对成都市街道地表污染物累积量的计算结果与环卫部门统计的街道垃圾日清扫量相符合。

常静^[15]对上海市区主要交通区及校园地表重金属的累积过程进行了研究,发现基本上符合“S”型增长曲线,呈现出较好的拟合效果。但是,由于样点微环境影响较大,给出的拟合曲线仅在于探讨累积过程,并不具有普遍意义。

2.2 地表污染物冲刷模型

2.2.1 理论分析

降雨径流冲刷量与降雨强度,降雨历时等因素有关。Metcalf 和 Eddy Inc 等人认为城市地表降雨径流冲刷量可以用简单的一级动力学方程反映^[16]。具体表达式如式(2):

$$\frac{dQ}{d\tau} = -kQ; k = k_2r \tag{2}$$

积分后得:

$$Q_{\tau} = P_0 e^{-k_2 R_{\tau}} \tag{3}$$

式中: Q 为不透水地表可冲刷的污染物质, kg; Q_τ 为降雨径流开始 τ 时后地表上残留的污染物质, kg; τ 为降雨径流开始后的时间, s; R_τ 为降雨开始 τ 时后的累计径流量, mm; k 为衰减系数, s⁻¹; k₂ 为冲刷系数, mm⁻¹; r 为径流量, mm/s。

则一场降雨冲刷排放的城市地表污染物质为:

$$Q' = P_0(1 - e^{-k_2 R_r}) \tag{4}$$

式中 R_r 为次降雨总径流量, mm。

假设集水区面积为 A,则径流过程中污染物浓度 C_τ 可表示为:

$$C_{\tau} = -\frac{1}{A} \frac{dQ_{\tau}}{dR_{\tau}} = \frac{k_2 P_0}{A} e^{-k_2 R_{\tau}} \tag{5}$$

因此,径流开始时污染物浓度可以表示为:

$$C_0 = \frac{k_2 P_0}{A} \tag{6}$$

从(2)~(5)式可以看出,该冲刷模型的建立基于一定的理论基础,城市地表污染物的冲刷过程符合指数关系。通过参数之间的定量传递,将地表污染物累积量和冲刷效率联系起来,即可构建累积过程与冲刷过程的关系。Haster 和 Barrett 等人在对美国休斯敦市某小型集水区及奥斯汀市 Mopac 公路降雨径流过程研究中发现,污染物浓度符合指数衰减规律^[16~18]。国内在上海^[19]、北京^[20]等城市也都得到广泛应用,调查结果符合类似规律。但是,以上冲刷模型中污染物浓度存在这样的关系: C_{τ_nΔτ} > C_{τ_{(n+1)Δτ}},即(5)式仅适用于存在初期冲刷效应(FFT)的地表径流过程。然而,据研究^[21~23],初期冲刷效应并不普遍存在。因此,冲刷模型的使用范围受到了限制。

2.2.2 计入雨天排污的冲刷模型

在以上讨论的城市地表污染物累积和冲刷过程中,仅仅考虑晴天累积,雨天无累积的情况,但是雨天排污往往不容忽视^[3]。Sansalone^[24]等人对美国辛辛那提市城市路面径流特性的研究发现,低强度、时间跨度大的降雨过程中,冲刷掉的污染物总量与交通排放的污染物数量呈平衡状态。Wu^[25]等人的研究也表明,TSS 负荷与降雨过程中交通流量呈较显著的正相关关系。

考虑雨天排污因素的冲刷模型,同时伴随着累积和冲刷,模拟其连续过程有一定的困难。因此,将次降雨过程分为 n 个时段: Δτ₁, Δτ₂, Δτ₃, Δτ_{n-1}, Δτ_n, 对应时段累计径流量为 R₁, R₂, R₃, R_{n-1}, R_n, 单位时间污染物源强记为 P', 假设

$\Delta \tau_i$ 时段内排放的污染物全部沉降于路面并且于 τ_{i-1} 时刻开始被雨水冲刷, 因此, τ_n 时刻地表径流污染物浓度为:

$$C_{\tau_n} = \frac{k_2 P_0}{A} e^{-k_2 R_n} + \frac{k_2 P'}{A} \sum_{i=1}^n e^{-k_2 (R_n - R_{i-1})} \Delta \tau_i \quad (7)$$

然而, (7) 式中一些参数的确定尚需进一步探讨, 如时间间隔 $\Delta \tau$ 的选择, 太大的间隔将使计算结果失去精度, 不能反映真实的污染物浓度变化过程, 太小则对数据要求较高, 工作量较大。另一个关键因素是污染源强类型的确定, (7) 式中将其定义为恒定瞬时污染源, 这与实际情况有一定的差距。因此, 在以后城市地表径流污染研究工作中需对这些问题加以深入详细的研究, 以期找到合适的方法更好地模拟径流污染过程。

3 研究展望

随着城市化进程的加快, 城市用地比例逐渐升高, 城市地表水环境问题也倍受关注^[26, 27]。结合国内外研究成果及我国目前城市地表径流污染现状, 提出以下几点建议。

(1) 经过国内外学者多年的研究, 提出了很多地表径流污染模型。比如 Sartor^[7] 等人提出了第一个城市地表污染物冲刷模型, 他认为颗粒物的冲刷率与地表污染物累积量直接相关。一些著名的城市暴雨模型如 SWMM, HSPF 都是基于这一理论^[28]。这些模型在国内外得到了广泛的应用, 对城市地表径流污染的研究起到了显著的促进作用, 获得了大量的研究成果。但该类模型大部分基于经验获得, 尚未充分反映污染物输移过程。并且自被提出之后, 一直是争议的焦点, 许多测试的结果甚至出现了相互矛盾的现象。因此, 以后的工作需以探索污染物累积及冲刷机理为方向和重点, 构建能够反映污染物输移过程的物理模型;

(2) 由于污染物质产生及降雨的时空分布随机性大, 所以给样品的收集工作带来了一定的难度。科学的样品收集方法, 可靠的分析方法是获得准确有效数据的前提条件, 是研究城市地表径流污染的基础。因此, 需要对研究方法加以统一, 制定出一套有效、可行的监测方法, 推动城市地表径流常规监测方法的制定;

(3) 与国外的研究工作相比, 国内的城市地表径流污染研究主要集中在污染物调查及排放特征分

析之上, 对污染物排放规律的模拟及污染负荷估算方面则是以应用国外较成熟的模型为主。但是, 我国城市化水平和城市特征等诸多因素都与国外有所差别, 直接引用将带来较大的系统误差。在今后的研究工作中, 需要探索出适合我国城市特征的径流模型, 真实地反映城市地表径流面源污染情况。从另一方面看, 我国在该方面的研究工作起步较晚, 可以汲取国外研究的大量经验, 避免重复性工作, 少走弯路;

(4) 研究城市地表径流污染的目的是了解污染物的产生、输移过程及其特征, 最终找出行之有效的控制方法, 减轻对环境的危害, 为政府决策提供科学依据。因此, 在科学研究的同时, 需要加大对城市水环境的管理力度, 完善相应的法规政策, 为城市水环境的改善提供政策性保障。

参考文献:

- [1] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 城市降水径流的污染来源与排放特征研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 17(2): 288~ 295.
- [2] DELETIC A B, MAKSIMOVIC C T. Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1998, 124(9): 869~ 879.
- [3] 赵剑强. 城市地表径流污染与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [4] 韩 冰, 王效科, 欧阳志云. 城市面源污染特征的分析[J]. 水资源保护, 2005, 21(2): 1~ 4.
- [5] ALLEY W M, SMITH P E. Estimation of accumulation parameters for urban runoff quality modeling[J]. Water Resource Research, 1981, 17(6): 1 657~ 1 663.
- [6] STEPHEN B S, WALTER M T, TAMMO S S. A physical model of particulate wash-off from rough impervious surfaces[J]. Journal of Hydrology, 2006, 327: 618~ 626.
- [7] AKAN A O. Urban stormwater hydrology[M]. USA: Technomic Publishing Company Inc, 1993.
- [8] CHARBENEAU R J, BARRETT M E. Evaluation of methods for estimating stormwater pollution loads[J]. Water Environment Research, 1998, 70(7): 1 295~ 1 302.
- [9] KREIN A, SCHORER M. Road runoff pollution by poly cyclic aromatic hydrocarbons and it's river sediments[J]. Water Research, 2000, 34(16): 4 110~ 4 115.
- [10] BALL J E, JENKS R, AUBOURG D. An assessment of the availability of pollutant constituents on road surfaces[J]. Science of the Total Environment, 1998, 209(223): 243~ 254.
- [11] TSIHRINTZIS V A, HAMID R. Modeling and management of urban stormwater runoff quality: a review[J]. Water Resources Management, 1997, 11(2): 136~ 164.
- [12] 李立青, 尹澄清, 孔玲莉, 等. 2 次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2 287~ 2 293.
- [13] NOVOTNY V, CHESTERS G. Handbook of nonpoint pollu-

- tion, Sources and management[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1981: 313~ 347.
- [14] 施为光. 成都市径流污染的概念性模型[J]. 四川环境, 1994, 13(2): 65~ 70.
- [15] 常 静. 城市地表灰尘 降雨径流系统污染物迁移过程与环境效应[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [16] MILLAR R G. Analytical determination of pollutant wash-off parameters[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1999, 125(10): 989~ 992.
- [17] BARRETT M E, IRISH L B, MALINA J F, et al. Characteristics of highway runoff in Austin, Texas Area[J]. Journal of Environmental Engineering-ASCE, 1998, 124(2): 131~ 137.
- [18] CHARBENEAU R J, BARRETT M E. Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads[J]. Water Environment Research, 1998, 70(7): 1 295~ 1 302.
- [19] 林莉峰, 李 田, 李 贺. 上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1 430~ 1 434.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Deletic A. The first flush load of urban surface runoff[J]. Water Research, 1998, 32(8): 2 462~ 2 470.
- [23] LI L Q, YIN C Q, HE Q C, et al. First flush of storm runoff pollutant from an urban catchment in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19: 295~ 299.
- [24] SANSALONE J J, KORAN J M. Physical characteristics of urban roadway solids transported during rain events[J]. Journal of Environmental Engineering-ASCE, 1998, 124(5): 427~ 440.
- [25] WU J S, ALLAN C J. Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff[J]. Journal of Environmental Engineering-ASCE, 1998, 124(7): 584~ 592.
- [26] 赵翠薇, 濮励杰. 城市化进程中的土地利用问题研究——以江苏省为例[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(2): 169~ 173.
- [27] 战金艳, 江 南, 李仁东, 等. 无锡市城镇化进程中土地利用变化及其环境效应[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(6): 515~ 521.
- [28] TSIRINTZIS V A, HAMID R. Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM[J]. Hydrological Processes, 1998: 311~ 329.

ADVANCES IN RESEARCH ON THE BUILD-UP AND RAINFALL RUNOFF WASH-OFF OF URBAN SURFACE POLLUTANTS

CHEN Qiao^{1,2}, HU Weiping¹, ZHANG Jian-ning³

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Changzhou Environmental Monitoring Center, Changzhou 213014, China)

Abstract: Urban surface pollutants are the major source of urban rainfall runoff pollution. The build-up and rainfall runoff wash-off of urban surface pollutants and the related models are reviewed. Particles settled on the impervious surface can be suspended in the air by external force, for example, wind, and then resettled again in build-up process. Also when it rains, they can enter the surface runoff by raindrop-induced ejection and then precipitate again in wash-off process. The rest of process may be deduced by analogy. There are many kinds of the models describing the build-up process in the previous research, such as the linear model, the exponential model and the logarithmic model etc. The exponential and its related forms are more authentic comparatively among these models. Antecedent Dry Weather Period (ADWP) is considered as the major impact factor among these models. The wash-off model based on the first order reaction kinetics assumption has been setup and been widely used. In order to improve accuracy of wash-off model, the wet weather pollutants have been taken into consideration. At present, much progress has made in the research on urban surface runoff pollution, however, most models rely on experience or extensive calibration by a number of monitoring data which do not clearly represent the physical mechanisms of particles detachment and transportation. As recent emphasis on reducing non-point source pollution has increased interest in implementing pollution management practices in urban areas in China, reasonable and predictive models is urgent needed. Greater insight into the underlying physical mechanisms of urban rainfall runoff pollution can provide a better understanding of the movement of pollutants in the urban area and more scientifically justifiable management practices for urban runoff pollution control.

Key words: urban; surface pollutants; build-up; rainfall runoff; wash-off