

前期晴天时间对城市降雨径流污染水质的影响

边博

(江苏省环境科学研究院, 南京 210036)

摘要: 识别影响城市降雨径流污染的主要因子是城市降雨径流污染治理和管理的前提和基础。为此, 从 2006 年 5 月开始, 选择镇江具有代表性的土地使用类型监测城市地表径流水质, 分析前期晴天时间对城市地表降雨径流污染物的影响。结果表明, 随着前期晴天时间的增加, 径流中粒径 < 40 μm 的颗粒物粒径体积分数增加; 径流中主要水质参数(TN、TP、Zn、Pb、Cu、TSS 和 COD)与前期晴天时间呈显著正相关, 初期地表径流中溶解态污染物增加, 说明前期晴天时间是影响城市径流污染浓度和形态的主要因子, 从而为城市降雨径流污染的控制和治理提供科学依据。

关键词: 城市降雨径流; 前期晴天时间; 显著正相关; 主要因子

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)12-3522-05

Effect of Antecedent Dry Period on Water Quality of Urban Storm Runoff Pollution

BIAN Bo

(Jiangsu Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China)

Abstract: Identified the main factor influencing urban rainfall runoff pollution provides a scientific basis for urban rainfall-runoff pollution control and management. Therefore, starting in May 2006, a study was conducted to characterize water quality from representative land uses types in Zhenjiang to analyse the effect of antecedent dry period on stormwater runoff quality. The results show that the beginning of rainfall, with the increase of antecedent dry periods, the percentages of less than 40 μm is increased, the correlation of the water quality parameters (TN, TP, Zn, Pb, Cu, TSS and COD) and antecedent dry period shows a significant positive correlation, dissolved pollutants in the initial period surface runoff is increased. These findings show that facilitating the recognition of antecedent dry periods is the main factor influencing the change in concentration and partitioning of pollutants to provide the scientific basis for non-point source pollution control and management.

Key words: urban stormwater runoff; antecedent dry period; significant positive correlation; main factor

城市降雨径流污染已成为城市水质恶化的主要原因之一^[1], 在整个径流过程中会受到诸多因素的影响, 包括大气的污染状况、前期晴天时间天数、降雨特征、城市土地利用类型、大气污染状况、地表清扫状况等, 这些因子对于径流城市地表污染物的变化特征产生重要的影响。

城市径流污染具有晴天累积、雨天排放的特征, 随着晴天累积天数的增加, 城市地表可被降雨径流冲刷的污染物增加, 增加了降雨径流的污染潜力, 因此, 前期晴天时间反映地表污染物的累积程度, 同降雨径流污染存在一定的关系^[2-4]。降雨量、强度、流域大小与地面坡度特征以及前期晴天时间等因素是影响污染物负荷的重要变量^[5]。Muliss 等^[6]发现多数营养盐和重金属与最大降雨强度均有一定的关系。美国著名的 SWMM 模型认为前期晴天时间对污染物的 EMC 影响显著, 但其他模型诸如 MOSQUITO 则没有考虑此因素的影响^[7,8]。Jarvis^[9]研究表明, 位于美国路易斯安那州新奥尔良地区城市高速公路流域重金属污染负荷在低径流降雨事件中随着干期时间的增加, 污染物浓度呈上升趋势。可见, 前期晴天

时间是影响城市降雨径流污染水质变化特征的一个重要水文变量, 但是, 不同地区的气候特征、大气污染状况、风速以及人类活动的方式和强度的不同, 使得前期晴天时间对于晴时地表污染物的累积和雨时径流水质变化特征的影响较为复杂^[10], 在不同的气候区晴天累积与降雨特征对径流污染的耦合作用不同^[11], 有待于进一步研究。因此, 本研究中在采集镇江地表径流水样的基础上, 分析前期晴天时间对于径流中颗粒物的粒径分布、污染物浓度, 以及污染物形态变化的影响规律, 从而为城市降雨径流污染的管理和管理技术的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

镇江位于长江三角洲顶端, 长江和京杭大运河在此交汇。市区人口 58 万, 年平均温度 15.5 $^{\circ}\text{C}$, 多年

收稿日期: 2009-04-05; 修订日期: 2009-02-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-002); 江苏省科技厅太湖专项(BK2007744)

作者简介: 边博(1977~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市降雨径流污染。E-mail: bianbo1@163.com

平均降水量在 1 070 mm 左右. 目前, 已形成商业区、居民区、河滨公园、交通主干道等土地功能区布局 (见图 1). 商业区位于市中心, 旁边有交通干道; 居民区为老住宅区, 区内道路为临时停车场; 河滨公园处于老城区, 毗邻城市交通要道; 选取市区重要的主干道: 解放路、中华路和电力路作为交通繁忙区, 研究分布图及环境特征如图 1 和表 1 所示.

1.2 研究期监测降雨的基本特征

2006 年试验期间, 共收集 20 场降雨, 所选土地利用类型完整的样品数量只有 12 场, 这主要是由于降雨发生的随机性影响, 很多时候由于条件的限制, 采集的样品都不符合试验的要求, 表 2 是试验期间典型降雨的基本特征, 是主要降雨特征的统计结果, 根据对降雨基本特征的统计分析, 试验期间的降雨可以反映镇江市区的降雨量分布和 2 次降雨间隔时间的分布特征, 城市水文过程的这些特征决定了其对于城市地表的冲刷强度大, 携带污染物的能力强, 是城市降雨径流污染形成的主要水文条件.

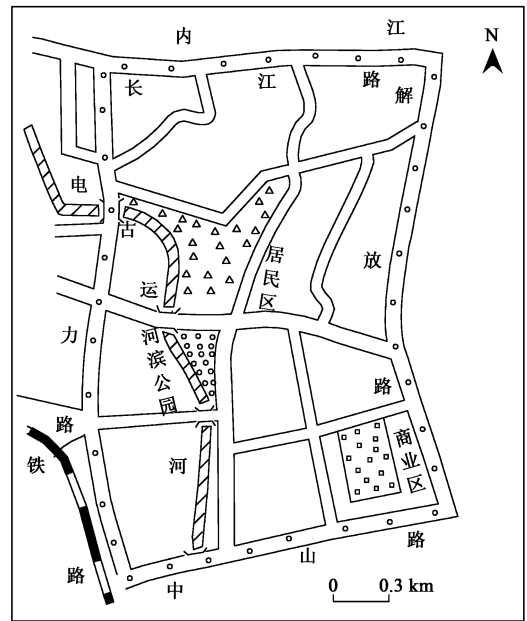


图 1 研究区分布示意

Fig. 1 Map of study areas and sampling locations

表 1 降雨径流研究区位置及环境特征

Table 1 Sampling sites in different function areas of central Zhenjiang City

功能区	位置	区域面积/hm ²	环境特征
交通繁忙区	电力路、解放路	0.23	平均车流量 1 438 辆/h, 大型车辆所占比例 18.6%
居民区	西柴院	0.36	人流量 651 人/h, 平均交通流量汽车 121 辆/h, 摩托车 306 辆/h
河滨公园	古运河	0.39	平均人流量 386 人/h
商业区	斜桥街	0.30	平均人流量 2 561 人/h

表 2 典型降雨的基本特征

Table 2 Characteristics of rainfall events sampled

降雨日期	降雨量 P/min	降雨历时 t/h	平均雨强 $I/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	最大雨强 $I_{\text{max}}/\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	前期晴天时间 (A DD)/d	样品数
2006-05-09	20.2	2.5	8.3	14.2	10	18
2006-05-12	18.21	3.1	6.8	18.6	3	18
2006-05-21	26.3	2.6	13.5	35.3	9	18
2006-06-03	30.2	2.7	12.1	32.9	12	18
2006-06-28	15.1	2.8	6.2	16.1	25	18
2006-07-06	20.8	3.3	8.2	20.3	8	17
2006-07-19	26.7	3.5	9.6	23.1	13	18
2006-07-25	34.2	2.7	12.5	30.2	6	16
2006-08-06	26.6	4.2	7.8	25.5	11	15
2006-08-19	41.2	3.8	10.3	20.31	9	18
2006-08-22	45.9	2.3	19.1	53.6	3	21
2006-09-02	46.8	3.1	15.2	46.6	2	12

1.3 研究期前期晴天时间分布特征

2 次降雨的间隔时间(前期晴天时间)是影响城市径流污染物负荷的重要变量. 可通过前期晴天时间同径流污染的关系反映城市中人类活动对于地表径流污染程度的影响. 由于只有一定的降雨量才能

产生地表径流, 从而形成有效冲刷, 径流污染物随径流的携带而迁移, 因此对于形成一定径流的降雨量之间的间隔时间才能是有效的降雨间隔时间, 本研究定义 2 次降雨间隔时间为降雨量 > 8.0 mm 降雨间隔的时间, 以天数来表示. 根据镇江市 2006 年降

雨统计资料表明,该年中 2 次降雨间隔时间的分布特征见表 3,可以看出镇江市 79% 的径流污染物发生前的道路地表沉积物的晴天积累时间在 10 d 以下。

表 3 镇江市两次降雨间隔的频率分布特征

Table 3 Frequency distribution of interval rainfall in Zhenjiang

两次降雨间隔时间/d	发生频率/%	降雨次数/d·a ⁻¹
1~2	20	8
2~5	32	13
5~8	16	7
8~10	11	5
10~15	10	4
15~25	6	3
>25	5	2
合计	100	42

1.4 样品采集和分析

2006 年 5 月降雨时在镇江所选功能区进行地表径流的采样。降雨时采用自制的取样工具用聚乙烯瓶在集水井处收集径流样品,按如下时间点 1、5、10、15、20、30、50、80 和 120 min 分别采样,各场降雨的特征如表 1 所示。样品采集后,贴上标签,编好号码,并且记录采样地点、日期、采样起止时间等,以备实验分析。地表径流中固体悬浮物的粒径采用河海大学 NSY-2 型宽域粒度分析仪进行分析。水样一部分直接用于测定总氮(TN)、总磷(TP)和重金属,另一部分经 0.45 μm 滤膜过滤分析可溶性氮(DN)、可溶性磷(DP)和可溶性重金属(DZn、DCu 和 DPb),以上指标均按标准方法测定^[12]。

2 结果与讨论

2.1 前期晴天时间对径流中颗粒物粒径分布的影响

地表径流中颗粒物的粒径分布特征是影响地表径流污染物含量的重要因素,前期晴天时间是影响径流中污染特征的重要水文变量,因此,前期晴天时间对于径流中颗粒粒径分布的影响是研究城市降雨径流污染的重要方面。图 2 为不同前期晴天时间与径流中颗粒物不同粒径的变化。从中可知,径流中的主要粒径范围 < 40 μm 的颗粒物粒径随着前期晴天时间的增加,该粒径范围的体积分数逐渐增加,其中 < 5 μm 的粒径段在前期晴天 10 d 后体积分数增加平缓。> 40 μm 的颗粒物随着前期晴天时间的增加,体积分数减少,这种差别主要因为刚降雨径流过程主要是 < 40 μm 颗粒物随径流迁移,降雨后该粒径段颗粒物残留于地表的量最少,随着晴天数的增加,

该部分粒径颗粒物在地表沉积过程中重新得到补充,晴天数增加,该部分粒径补充越充分。同时,地表沉积过程也是细颗粒 < 40 μm 随着晴天天数的累积,细颗粒物受交通行为和风力扰动影响较大,通过再悬浮方式进入大气,二次降雨的发生,该部分粒径随降雨的淋洗重新进入径流,从而使得径流中 < 40 μm 颗粒物体积分数逐步增加,> 40 μm 的颗粒物在径流中随前期晴天时间的变化规律与上述情况相反。

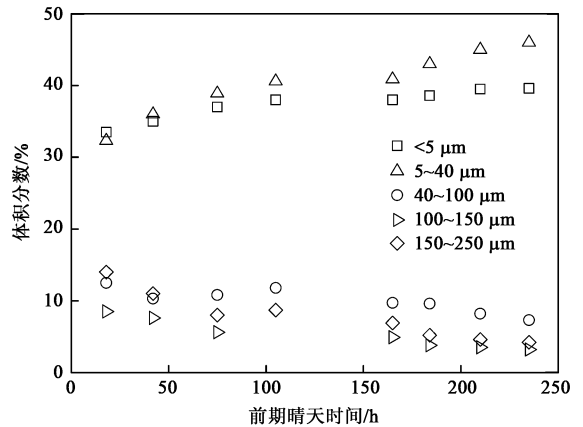


图 2 前期晴天时间对径流中颗粒物粒径分布影响变化图
Fig. 2 Influence of antecedent dry period on particle size distribution in runoff

2.2 前期晴天时间对于径流污染物浓度的影响

前期晴天时间是影响城市降雨径流水质的主要因素,决定晴天污染物累积的重要参数,SWMM 模型将晴天天数作为重要的因素考虑,对于降雨径流污染负荷具有重要的影响^[6]。对镇江城市降雨径流水质与前期晴天时间进行相关分析,结果见图 3~ 5,城市降雨径流水质参数与前期晴天时间呈显著正相关,说明前期晴天时间是影响城市径流污染浓度的重要水文参数。降雨场次不同,降雨前期天气情况和降雨特征不同。对镇江城市降雨径流水质参数与前期晴天时间和最大降雨强度均呈显著正相关,说明最大降雨强度是影响城市径流污染浓度的重要水文参数。

图 2~ 4 反映了前期晴天时间与初期径流中污染物浓度的变化。从中可知,初期径流污染物浓度与前期晴天时间呈显著相关。因为前期晴天时间是影响晴天污染物积聚的重要参数,不透水性区域的污染负荷主要取决于晴天垃圾的积聚,大气的干、湿降尘以及机动车辆产生的污染,由于地表沉积物的截留、吸附作用,充当了污染物的存贮器,经过一个较

长时间的污染物积聚过程, 最后受降雨的冲刷, 地表储存的污染物释放进入地表径流. Vermette 等^[13]研究表明, 前期晴天时间影响着可冲刷地表颗粒物的量并影响着重金属的积累, 随着晴天数的增加, 下次降雨径流中污染物浓度相应增加. 低径流降雨事件随着干期天数的增加, 污染物浓度也呈上升趋势. 因此, 降雨径流污染在较长时间尺度表现为晴天累积、雨天排放的特征, 径流中携带的污染物随着晴天累积天数的线性增加而直线增加, 说明前期晴天时间可用来指示城市地表污染物的累积程度, 并预测初期径流中的污染负荷^[9].

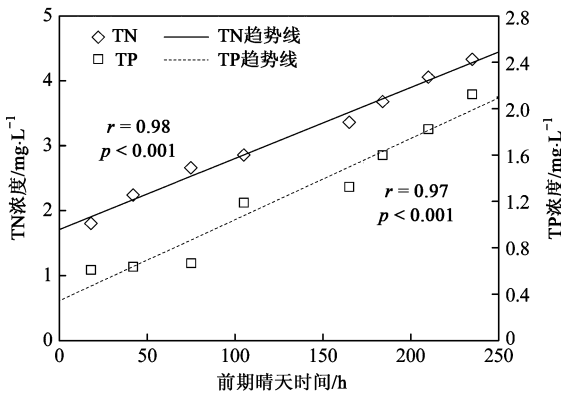


图3 地表径流中营养盐浓度与前期晴天时间的关系

Fig. 3 Nutrients concentrations in runoff and antecedent dry periods

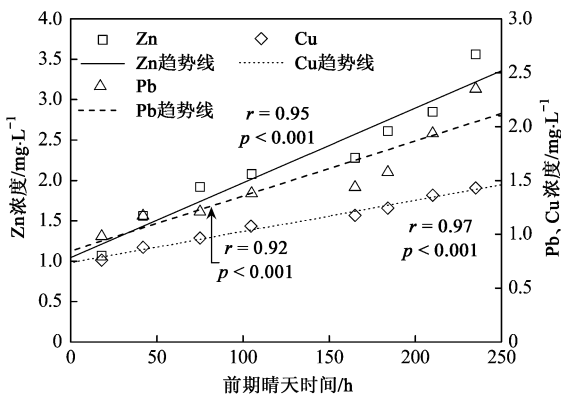


图4 地表径流中重金属浓度与前期晴天时间的关系

Fig. 4 Metal concentrations in runoff and antecedent dry periods

2.3 前期晴天时间对于污染物形态影响

城市地表径流污染物浓度和形态取决于水文参数, 降雨特征, 前期晴天时间是影响城市降雨径流污染物的量, 也影响着污染物的形态, 前期晴天时间是决定污染物溶解态含量的重要因素. 图6~7为前期晴天时间对于初期地表径流污染物溶解态比例的影响, 前期晴天时间增加, 径流中的TDN和TDP分别

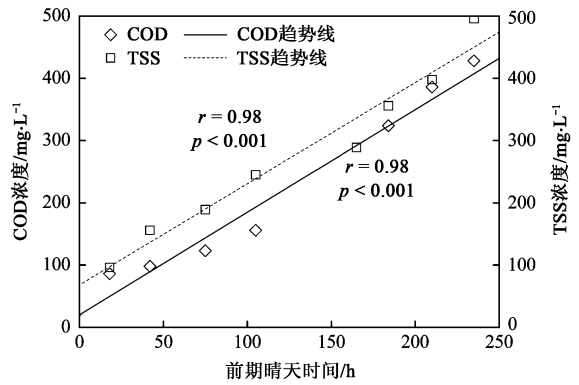


图5 地表径流中COD和TSS浓度与前期晴天时间的关系

Fig. 5 COD and TSS concentrations in runoff and antecedent dry periods

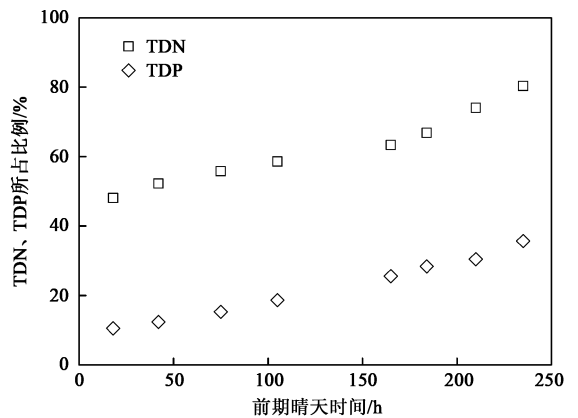


图6 径流中溶解态营养盐与前期晴天时间的关系

Fig. 6 Nutrients partitioning and antecedent dry periods

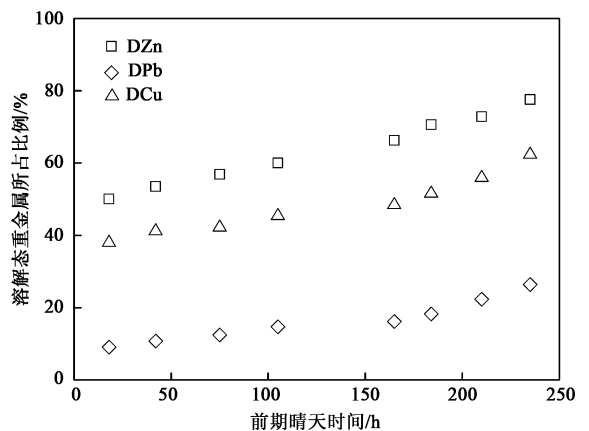


图7 径流中溶解态重金属与前期晴天时间的关系

Fig. 7 Heavy metal partitioning and antecedent dry periods

由48%和10%增加到80%和36%;径流中的DZn、DPb和DCu分别由50%、38%和9%增加到78%。

62% 和 26%, 径流中污染物溶解态的比例差异与径流中污染物的形态分布密切相关。

前期晴天时间对污染物形态影响与其他参数具有很强的联系, 决定污染物积聚过程, 是污染物的存储过程, 在固液界面过程变化时, 发生的物理化学过程对于污染物存在形态的改变, 有利于污染物溶解态的释放。许多因素均影响径流中污染物形态的比例, 包括污染物总量、污染物种类、溶解氧、碱度、硬度、pH 和有机质的含量等^[14-16]。随着 pH 的变化, 颗粒态污染物含量会发生变化, 若是 $\text{pH} < 7$, 颗粒态和溶解态直接发生转化, 颗粒态污染物由颗粒释放出自由离子, 转化成为一部分溶解态污染物^[17]。镇江城市地表沉积物中 $\text{pH} > 7$, 径流中 $\text{pH} < 7$, 污染物积聚和冲刷时 pH 值的变化, 为径流中污染物的形态转化提供了充分的条件。酸雨、溶解氧变化或者径流的充分稀释, 都会发生颗粒态污染物的解析作用, 从而影响径流中颗粒态和溶解态污染物的转化^[18]。径流中污染的形态变化与颗粒的总表面积, 而不是颗粒的量有密切关系。TSS 仅仅是颗粒物的总量, 其并不能准确反映颗粒物充当污染物载体的真正潜能。随前期晴天时间的增加, 地表细颗粒的增加, 细颗粒大的表面积成为污染物的载体, 影响着径流中污染物形态的转化, 因此前期晴天时间决定着污染物的积聚过程, 这一过程为径流中污染物形态的转化, 蓄积提供重要的水化学介质条件。

3 结论

(1) 随着前期晴天时间增加, 城市地表径流中 $< 40 \mu\text{m}$ 的颗粒体积分数增加, $> 40 \mu\text{m}$ 的颗粒体积分数减少, 颗粒迁移特征是颗粒本身的特性、道路表面结构、天气特征等因素共同作用的结果。

(2) 初期径流污染物浓度与前期晴天时间呈显著相关, 前期晴天时间是影响污染物浓度的主要因子, 可用来指示城市地表污染物的累积程度, 预测城市初期径流中污染负荷。

(3) 前期晴天时间是影响初期地表径流污染物溶解态污染物的重要因素影响, 前期晴天时间越长, 初期地表径流中的溶解态污染物会增加, 前期晴天时间决定着污染物的累积过程, 这一过程为径流中污染物形态的转化, 蓄积提供重要的水化学介质条件。

参考文献:

[1] Brezonik P L, Stadelmann H T. Analysis and predictive models of

stormwater runoff volumes, loads, and pollution concentration from watersheds in the Twins Cities metropolitan area, Minnesota, USA [J]. Water Research, 2002, **36**: 1743-1757.

- [2] Vaze J, Chiew F H S. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface [J]. Urban Water, 2002, **4** (4): 379-389.
- [3] Kim L H, Kayhanian M, Zoh K D, *et al.* Modeling of highway stormwater runoff [J]. Science of the Total Environment, 2005, **293**: 163-175.
- [4] 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.
- [5] Yuan Y, Hall K, Oldham C. A preliminary model for predicting heavy metal contaminant loading from an urban catchment [J]. Science of the Total Environment, 2000, **266**: 299-307.
- [6] Mullis R M, Revitt D M, Shutes R B. The impacts of urban discharges on the hydrology and water quality of an urban watercourse [J]. Science of the Total Environment, 1996, **189**: 385-390.
- [7] Tshrintzis V A, Hamid R. Modeling and management of urban stormwater runoff quality: a review [J]. Water Resources Management, 1997, **11**(2): 136-164.
- [8] Deletic A B, Maksimovic C T. Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas [J]. Journal of Environment Engineering, ASCE, 1998, **124**(9): 869-879.
- [9] Jarvis B. Investigation of Stormwater Runoff from Highway Catchment [D]. Nedlands: University of Western Australia, 1992.
- [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] 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): 2287-2293.
- [12] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 67-72.
- [13] Venette S J, Irvine K N, Drake J J. Temporal variability of the elemental composition in urban street dust [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1991, **18**: 69-77.
- [14] Morrison G M, Revitt D M, Ellis J B. Metal speciation in separate stormwater systems [J]. Water Science and Technology, 1990, **22** (10): 53-60.
- [15] Dempsey B A, Tai Y L, Harrison S G. Mobilization and removal of contaminants associated with urban dust and dirt [J]. Water Science and Technology, 1993, **28**: 3-5.
- [16] Morrison G M. Heavy metal partitioning between the dissolved and suspended solid phases of stormwater runoff from a residential area [J]. Science of the Total Environment, 1983, **33**: 237-246.
- [17] Sansalone J J, Buchberger S G. Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater [J]. Water Science and Technology, 1997, **36**(8): 155-160.
- [18] Stone M, Marsalek J. Trace metal composition and speciation in street sediment: Sault Ste. Marie, Canada [J]. Water Air Soil Pollution, 1996, **87**(1): 149-169.