

北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析

任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085)

摘要: 城市硬化地表的迅速增加使得降雨径流量增加,屋面和路面等下垫面上污染物的大量累积并随径流进入城市排水系统,对城市水环境造成威胁。为了解径流污染过程和给径流污染控制提供科学依据,于 2004~2006 年选取典型屋面和路面对径流污染过程进行了监测和分析,计算了两种径流的次降雨平均浓度(EMC)水平,发现两类径流的 COD 和 TN 污染较为严重;屋面径流的化学需氧量(COD)、总氮(TN)分别超标(地表水环境质量标准 GB 3838-2002 V 类)3.64 和 4.80 倍;路面径流的 COD、TN 分别超标 3.73 和 1.07 倍。利用 $M(V)$ 曲线判断径流量同径流污染负荷的关系,发现屋面径流污染物总悬浮颗粒物(TSS)、COD、TN 和总磷(TP)发生了不同程度的初始冲刷现象;路面初始冲刷现象主要表现为 TSS 和 TP,总体上初始冲刷效应不明显。汇水面性质、降雨强度、污染物累积状况等都是影响屋面和路面径流污染物排放特征的重要影响因素。

关键词: 城市下垫面;地表径流;屋面;路面;初始冲刷效应

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0373-06

Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City

REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, HOU Pei-qiang

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Rapid increase of the urban impervious underlying surfaces causes a great increase of urban runoff and the accumulation of pollutants on the roof and road surfaces brings many pollutants into the drainage system with the runoff, and it thus becomes a great threat to the urban water environment. To know the runoff pollution process and to build scientific basis for pollutant control, runoff processes from the roof and road surfaces were monitored and analyzed from 2004 to 2006, and the runoff EMC (Event Mean Concentration) was calculated. It was found that two types of runoff were seriously polluted by COD and TN. The COD and TN of roof runoff exceeded the fifth level of the surface water environmental quality standard (GB 3838-2002) by 3.64 and 4.80 times, respectively, and the COD and TN of road runoff exceeded by 3.73 and 1.07 times, respectively. $M(V)$ curve was used to determine the relation between runoff volume and runoff pollution load. Various degrees of the first flush phenomenon were found for TSS, COD, TN and TP in roof runoff. But this phenomenon occurred only for TSS and TP of the road runoff, and on the whole it was not obvious. Properties of the underlying surfaces, rainfall intensity, and pollutant accumulation are all important factors affecting the roof and road runoff pollutant emission characteristics.

Key words: urban underlying surfaces; surface runoff; roof; road; first flush effect

非点源污染是指溶解的或固体污染物从非特定的地点,通过径流过程而汇入受纳水体,引起的水体污染^[1-2]。城市化的快速发展使得城市不透水面所占比例持续增加,导致城市非点源污染问题日益严峻,这已成为制约城市水环境质量的重要影响因素之一。污染物到地表水体的转移过程经过污染物在干期的累积、降雨的冲刷以及污染向水体的输送这 3 个阶段^[3]。针对暴雨冲刷阶段,研究城市暴雨径流污染过程的变化规律,分析主要下垫面的径流污染的冲刷特征,了解污染物随径流量的变化对城市地表径流污染物的控制和雨水资源有效利用具有重要意义。

1990 年美国 EPA 公布的不同污染物对河流污染的贡献比中,城市雨水占到了 9%^[4],1993 年美国

EPA 已经把城市地表径流列为导致全美河流和湖泊污染的第三大污染源^[5]。据估计我国非点源负荷通常能够达到总负荷的 35%~55%,甚至更高达 65%~75% 以上^[6-8]。Lee 等^[9]对韩国 Taejon 和 Chongju 的 9 个不同类型径流进行监测,发现各污染物初始冲刷效应强度各异。Kim 等^[10]对合流制城市集水区的研究表明降雨径流中 TSS、TN、TP 及 COD 均具有明显初始冲刷效应, Lee 等^[11]对 2 个居民区和 1 个工业区的 13 个集水区进行的监测结果与 Kim 等^[10]一致。暴雨径流及其污染特征与降雨

收稿日期: 2012-04-24; 修订日期: 2012-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41030744, 41230633, 40901265)

作者简介: 任玉芬(1978~),女,博士,助理研究员,主要研究方向为城市非点源污染, E-mail: yfren@rcees.ac.cn

量、最大降雨强度、降雨历时、雨前晴天数(ADWP)、区域气候、污染源特征、土地利用方式、排水系统等因素密切相关^[12~14]。近几年国内学者对城市降雨径流污染问题的研究也较为普遍,涉及了各种类型的下垫面及污染物^[15~18]。在漳河镇^[19]、武汉^[20~26]、澳门^[27]的研究结果均发现暴雨径流前期各污染物均有一定程度的初始冲刷效应发生。在前人研究的基础上,本研究选取特大城市北京典型屋面和路面等下垫面作为对象,进行径流污染初始冲刷效应的分析,探讨屋面和路面径流污染物的冲刷规律,以期在城市水环境污染防治和污染物控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

屋面径流的采集地点是中国科学院生态环境研究中心院内环化楼,屋面材料是沥青油毡,采样位置是屋面的雨水下水管道,主要污染物来源是屋面材料和屋面沉积物。降雨过程中每 10 min 采样一次,并记录流量数据,共收集 6 场降雨,得到径流 102 个样品。路面径流的采集地点是北京中国科学院生态环境研究中心院内停车场,路面材料是水泥混凝土,主要污染物来源是路面灰尘、垃圾、交通车辆及行人丢弃的废弃物等。采样位置是路面上的雨水下水井,利用 ISCO 采样器同时完成径流样品的采集和流量的测量,采样间隔为 10 min,路面径流共收集 6 场降雨,得到径流样品 144 个。样品采集后立即进行分析。

1.2 样品分析

径流监测指标包括 TSS、COD、TN、TP。样品分析方法为:COD(重铬酸钾法,GB 11894-89)、TN(过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,GB 11894-89)、TP(钼酸铵分光光度法,GB 11893-89)、SS^[28](0.45 μm 滤膜过滤 103~105℃ 烘干称重,GB 11901-89)均为国家标准规定的样品测定方法。多次降雨各种污染物的平均浓度分别与地表水环境质量标准(GB 3838-2002)对比得出其污染水平。

1.3 数据分析

所有数据的整理与统计均采用 Excel 和 SPSS 软件。

1.4 次降雨平均浓度计算

任意一场降雨所引起地表径流中排放的某污染物的质量除以总的径流体积。

1.5 次降雨污染负荷计算方法

某种污染物的径流污染负荷可用地表径流量与该污染物浓度的乘积来表示。

1.6 地表径流初始冲刷效应判别方法

对每一降雨事件的每一种污染物,用累积污染负荷占整个降雨事件总污染负荷的比值除以累积径流占整个降雨事件总径流量的比值,建立量纲-累积曲线^[13,29],即 $M(V)$ 曲线,从这条曲线可以了解累积污染物与总的污染物之比相对于累积径流量与总的径流量之比的变化情况(图 1)。对角线表示整个降雨过程径流中污染物均衡迁移。当 $M(V)$ 曲线高于对角线且最大离散度 > 20 时,即发生了初始冲刷。通常用携带 80% 污染物所实际发生的径流量来判断比较直观^[29],所需的径流量越小,发生的初始冲刷效应越强烈。

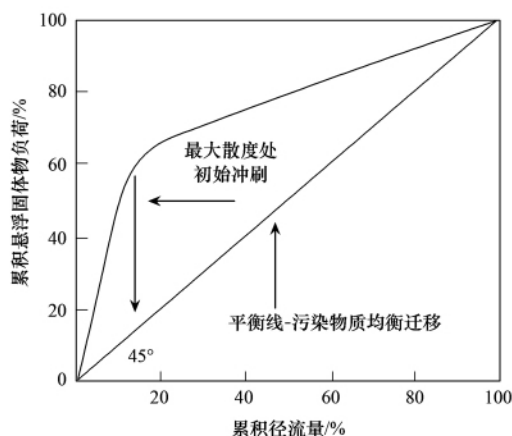


图 1 $M(V)$ 曲线示意

Fig. 1 Sketch of $M(V)$ curve

2 结果与分析

2.1 屋面和路面径流污染 EMC

屋面和路面是城市生态系统下垫面最重要的结构组分,代表了北京市绝大部分的不透水下垫面类型。在这些下垫面上进行的径流污染监测具有代表性。通过对屋面和路面径流监测,并计算,得到各种径流的次降雨 EMC 范围以及平均值(表 1),发现各种污染指标 EMC 的变化范围均较大,而且污染指标之间也有较大差异。两类径流的 COD 和 TN 污染较为严重;屋面径流的 COD、TN 分别超标(地表水环境质量标准 GB 3838-2002 V 类) 3.64 和 4.8 倍;路面径流的 COD、TN 分别超标 3.73 和 1.07 倍。

2.2 屋面径流污染初始冲刷效应

屋面降雨污染累积负荷随着降雨过程累积流量的变化如图 2 所示。利用地表径流初始冲刷效应判别方法进行判别,发现在所监测的 6 场降雨中,各污

表 1 屋面和路面径流的 EMC
Table 1 EMC of roof and road runoff

径流类型	指标	EMC 范围/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
屋面径流 ($n=102$)	TSS	0.59 ~ 187.02	37.85
	COD	0.37 ~ 650.26	185.76
	TN	0.08 ~ 24.10	11.60
	TP	0.000 2 ~ 2.38	0.43
路面径流 ($n=144$)	TSS	5.43 ~ 451.93	189.05
	COD	22.26 ~ 310.61	114.97
	TN	2.26 ~ 8.19	4.14
	TP	0.15 ~ 0.28	0.18

染物发生了不同程度的初始冲刷现象. 对于 2004 年 6 月 16 日, 径流对 COD、TN 和 TP 发生了初始冲刷效应, 分别有 48%、45% 和 57% 的径流量携带了各自 80% 的污染负荷; TSS 没有发生初始冲

刷效应. 2004 年 6 月 30 日, COD 和 TN 发生了初始冲刷效应, 携带 80% 的污染负荷, 发生的径流量占总流量的比例分别是 52% 和 48%. 2004 年 7 月 10 日和 7 月 29 日所有污染物均发生了初始冲刷现象, 对于 7 月 10 日携带 80% 的 TSS、COD、TN 和 TP 负荷, 所发生的径流量分别是总流量的 54%、39%、50% 和 58%. 对于 7 月 29 日携带 80% 的 TSS、COD、TN 和 TP 负荷, 发生的径流量分别是总流量的 28%、61%、56% 和 51%. 2004 年 8 月 12 日, 只有 TSS 发生明显初始冲刷效应, 16% 的径流量就携带了 80% 的 TSS 总负荷. 对于 8 月 27 日, TSS、COD 和 TP 有初始冲刷效应出现, 携带 80% 的污染负荷发生的径流量分别是 53%、58% 和 58%.

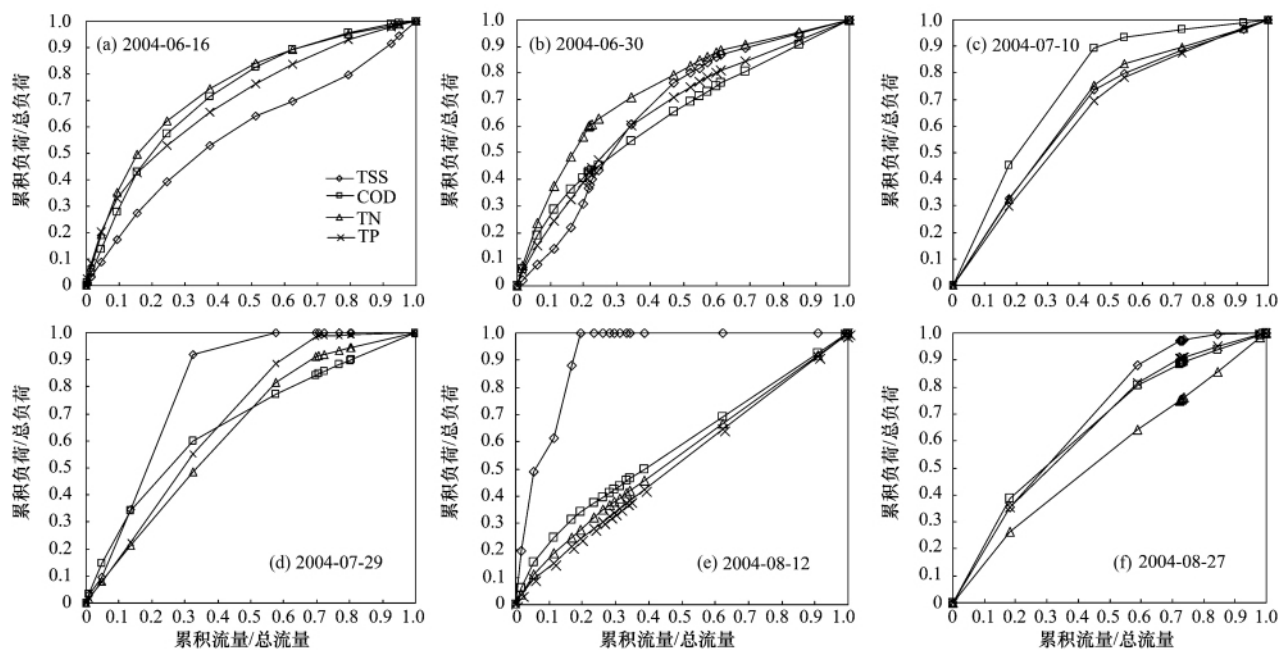


图 2 屋面径流初始冲刷

Fig. 2 First flush of roof runoff

研究结果显示, 同一场降雨中, 各个指标发生初始冲刷效应的强度不同, 而同一个指标在不同的降雨时间也表现出不同强度的初始冲刷效应. 究其原因, 一是屋面降雨径流的形成和污染物的形成受降雨时间和降雨量的影响, 径流携带污染物的能力就会有较大差异; 二是在不同类型的降雨条件下, 即使是同一取样点, 其汇水面积也不尽相同, 因此径流中初期污染物的量也不同; 另外降雨前的晴天数、当地的大气污染状况和采样点周围的人类活动情况可能也会影响到径流中污染物的累积过程. 相对于开放的汇水面来说, 屋面是一个面积比较固定的区域, 一般不会有大量外界物质的瞬时大量输入, 只要

其上污染物在晴天时有累积, 在降雨发生时较易发生初始冲刷现象.

2.3 路面径流的初始冲刷效应

路面径流的初始冲刷效应如图 3 所示. 2005 年 8 月 16 日的降雨, 分别有 10% 和 12% 的径流携带了 80% 的 TSS 和 TP, 初始冲刷效应非常强烈; 该场降雨在 4 h 内降雨近 100 mm, 在该场降雨的前一日发生了一场降雨, 且已经将大部分的路面沉积物携带走. 2005 年 8 月 16 日的降雨在降雨发生初期就将剩余的污染物携带走. 2006 年 7 月 23 日, 分别有 70% 和 73% 的径流携带了 80% 的 TSS 和 TP; 其余时间的其他指标均没有明显的初始冲刷效应出现.

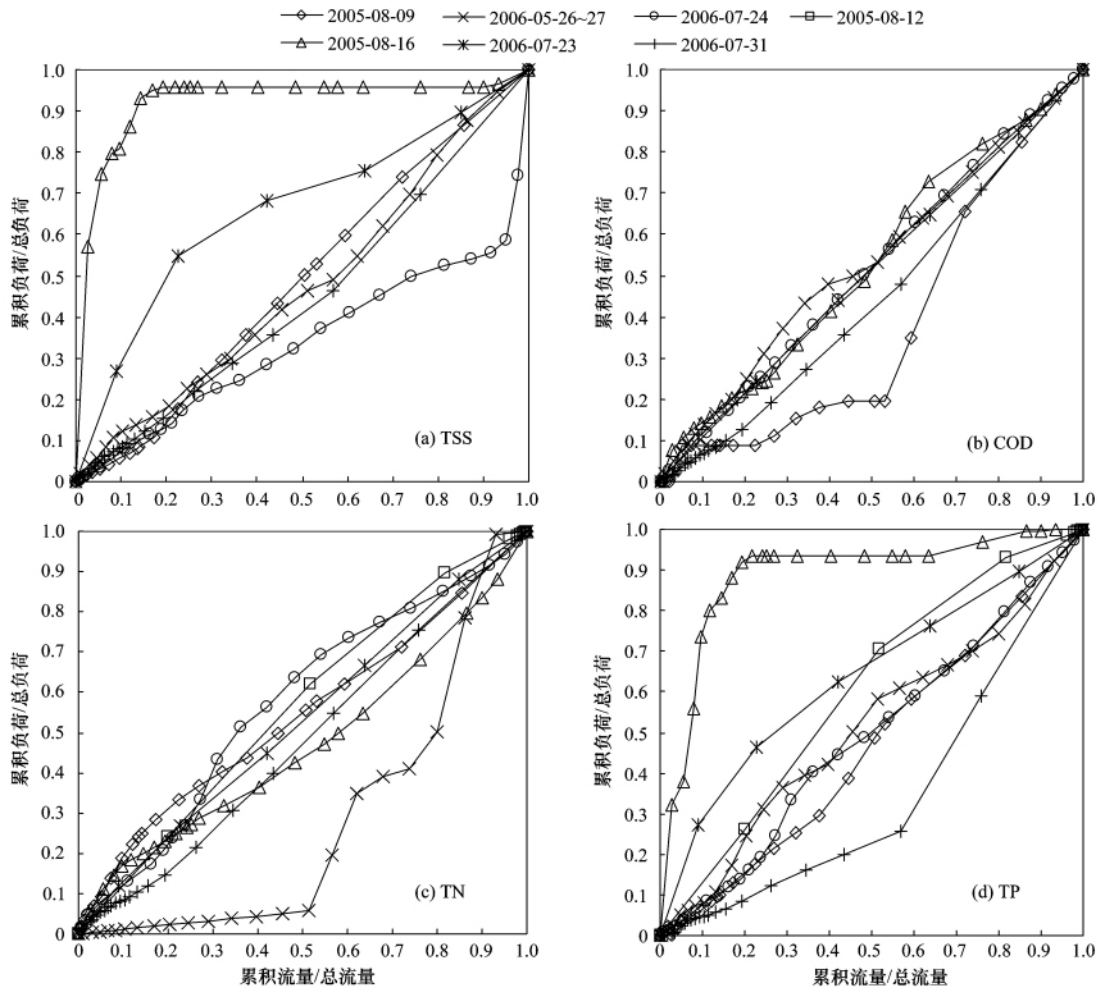


图3 路面径流初始冲刷

Fig. 3 First flush of road runoff

相对于屋面径流,路面是一个较为开放的区域,在不同的降雨量和降雨历时情况下,同一监测点汇集的汇水区域是不同的,在降雨初期径流会携带其下垫面上的污染物迁移,但随着降雨时间的延长,汇水面周围的污染物也会随着径流汇入监测点,使得初始冲刷效应的效果不明显。

3 讨论

3.1 初始冲刷效应的界定

Gupta 等^[13]对初始冲刷效应的界定是认为降雨初期阶段的污染物浓度高于后期阶段的浓度,如果 $M(V)$ 曲线位于对角线之上,即认为发生了初始冲刷效应,若 $M(V)$ 曲线位于对角线之下,则认为径流只是对污染物的稀释^[13,30],而没有初始冲刷现象发生。Lee 等^[9]用初始冲刷系数是否大于 1 来判断,若初始冲刷系数小于 1,则发生了初始冲刷现象,若大于 1 则没有。Bertrand-Krajewski 等^[31]用的评判方法

则更为严格,即本研究中所用的 30% 以内的径流携带至少 80% 的负荷。Vorreiter 和 Wanielista^[32,33]等建议使用 25% 径流携带 80% 的污染负荷来界定。国内研究人员根据研究需要,也有不同的界定方法。

3.2 屋面和路面径流初始冲刷效应的差异

路面径流污染物的冲刷过程跟屋面径流存在明显的区别,路面 TSS 和 TP 在同一场降雨同时发生了强烈的初始冲刷效应,而且变化趋势一致,说明路面径流的 TP 和 TSS 具有很强的相关性,径流中 TP 主要是依附颗粒态存在。Deletic^[34]在 Miljakovac 这类封闭区域的研究表明,只要下垫面上有足够多的颗粒沉积物,若水量足够大,就可以产生初始冲刷现象;而对于像 Lund 地区这样的开放区域,边界不明显,周围的草地等下垫面上的污染物在降雨过程中会源源不断地汇入,即使降雨时间再长也很难将污染物冲刷完全,只有在雨强很大或者流速很快时,初始冲刷现象才会发生。Ballo 等^[35]在上海市的研究

也表明,对于屋面大部分测试指标都发生了不同程度的初始冲刷效应,老旧的屋面材料表现更为突出;而对于路面径流污染这种效应比较弱,对很多监测指标都没有该现象发生,研究结论与本研究结果类似。出现这种情况的原因有很多,包括监测地点的差别、降雨状况的差别等。与上海的研究类似,本研究中,屋面径流的研究时间和路面径流的研究时间略有差别,也是导致该现象产生的因素之一。

3.3 初始冲刷效应强度大小的影响因素

降雨对城市下垫面上的污染物具有冲刷、稀释和溶解等多重作用,污染物浓度的大小受多种因素影响,包括降雨强度、降雨量、两次降雨之间的时间间隔等,污染物浓度是各个影响因素的复杂函数。雨强(即单位时间的降雨量)越大,雨水对地表的冲刷作用就越强,携带的污染物就越多,同样降雨有对污染物稀释的作用,在相同的污染物累积量条件下,降雨量越大,雨水对污染物的稀释作用越强,径流中污染物的浓度就会降低,降雨量与污染物平均浓度呈现负相关关系^[15,36]。

Lee 等^[9]对于初始冲刷效应的研究发现,初始冲刷效应强度大小与汇水面的大小和降雨强度有关,汇水面越小降雨越大,初始冲刷效应就越明显。城市下垫面沉积环境受人为活动影响较大,人类日常的生产、生活活动有意或无意地向环境中排放了大量的有毒有害物质,造成城市降雨径流中污染物的种类繁多,来源广泛,几乎涵盖了现今水质监测的污染物的所有方面,据悉 129 种重点污染物中约有 50% 在城市径流中被检出^[37]。由于受人类活动影响较小,其上的颗粒物含量少,但是由于屋面材料经过雨水浸泡使其上附着及材料内部的污染物质在降雨过程中被释放出来,随径流进入雨水管道。由于行人活动、车辆来往以及地表垃圾和灰尘等的累积使得路面径流受人为因素影响比屋面要剧烈,因此表现出很高的颗粒物含量。

4 结论

(1) 通过对屋面和路面径流监测并计算,得到两种径流的次降雨 EMC 范围以及平均值,发现两类径流的 COD 和 TN 污染较为严重;屋面径流的 COD 和 TN 分别超标 3.64 和 4.8 倍;路面径流的 COD 和 TN 分别超标 3.73 和 1.07 倍。

(2) 利用 $M(V)$ 曲线判断径流量同污染负荷的关系,发现屋面径流污染物 TSS、COD、TN 和 TP 发生了不同程度的初始冲刷现象;路面初始冲刷现象

主要表现为 TSS 和 TP,总体不明显。汇水面性质、降雨强度、污染物累积状况等都是影响屋面和路面径流污染物排放特征的影响因素。

参考文献:

- [1] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶.非点源污染的管理及控制[J].环境科学,1998,19(5):87-91.
- [2] 陈利顶,傅伯杰.农田生态系统管理与非点源污染控制[J].环境科学,2000,21(2):98-100.
- [3] 王宝山,黄廷林,聂小保,等.不透水表面雨水径流污染物冲刷规律研究[J].环境工程学报,2010,4(9):1950-1954.
- [4] US EPA. Meeting the Environment Challenge[R]. Washington DC: US EPA,1990.46.
- [5] 王和意,刘敏,刘巧梅,等.城市降雨径流非点源污染分析与研究进展[J].城市环境与城市生态,2003,16(6):283-285.
- [6] 陆雍森.环境评价[M].(第二版).上海:同济大学出版社,1999.
- [7] 程波,张泽,陈凌,等.太湖水体富营养化与流域农业面源污染的控制[J].农业环境科学学报,2005,24(21):118-124.
- [8] 程红光,岳勇,杨胜天,等.黄河流域非点源污染负荷估算与分析[J].环境科学学报,2006,26(3):384-391.
- [9] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff[J]. Water Research, 2000,34(6):1773-1780.
- [10] Kim G, Yur J, Kim J. Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in Daejeon city, Korea[J]. Journal of Environmental Management, 2007,85(1):9-16.
- [11] 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(1-3):163-175.
- [12] Brezonik P L, Sadelmann T H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA[J]. Water Research, 2002,36(6):1743-1757.
- [13] Gupta K, Saul A J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows[J]. Water Research, 1996,30(5):1244-1252.
- [14] Gnecco I, Berretta C, Lanza L G, et al. Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy[J]. Atmospheric Research, 2005,77(1-4):60-73.
- [15] 任玉芬,王效科,韩冰,等.城市不同下垫面的降雨径流污染[J].生态学报,2005,25(12):3225-3230.
- [16] 常静,刘敏,许世远,等.上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应[J].地理研究,2006,25(6):994-1002.
- [17] 常静,刘敏,李先华,等.城市地表灰尘-降雨径流系统重金属生物有效性研究[J].环境科学,2009,30(8):2241-2247.
- [18] 边博,朱伟,黄峰,等.镇江市城市降雨径流营养盐污染特征研究[J].环境科学,2008,29(1):19-25.
- [19] 李国斌,王焰新,程胜高.基于暴雨径流过程监测的非点源污染负荷定量研究[J].环境保护,2002,(5):46-48.
- [20] 李立青,尹澄清,何庆慈,等.武汉市城区降雨径流污染负

- 荷对受纳水体的贡献[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(3): 312-316.
- [21] 李立青, 尹澄清. 雨、污合流制城区降雨径流污染的迁移转化过程与来源研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 368-375.
- [22] 何庆慈, 李立青, 孔玲莉, 等. 武汉市汉阳区的暴雨径流污染特征[J]. 中国给水排水, 2005, **21**(2): 101-103.
- [23] 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, 2006, **17**(2): 288-294.
- [24] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 武汉汉阳地区城市集水区尺度降雨径流污染过程与排放特征[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(7): 1057-1061.
- [25] 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**(3): 295-299.
- [26] 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.
- [27] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市小流域地表径流污染特征分析[J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1753-1759.
- [28] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 103, 108-110, 278-283, 354-356, 362-366.
- [29] Geiger W F. Flushing effects in combined sewer systems [A]. In: Yen B C (Ed.). Proceedings of the 4th international conference on urban storm drainage [C]. Lausanne, Switzerland, 1987. 40-46.
- [30] Ashley R M, Wotherspoon D J J, Coghlan B P, *et al.* The erosion and movement of sediments and associated pollutants in combined sewers [J]. Water Science and Technology, 1992, **25**(8): 101-114.
- [31] 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.
- [32] Vorreiter L, Hickey C. Incidence of the first flush phenomenon in catchments of the Sydney region [A]. In: Australia: National Conference Publication, Institution of Engineers, 1994. 359-364.
- [33] Wanielista M P, Yousef Y A. Stormwater management [M]. New York, USA: John Wiley and Sons, 1993.
- [34] Deletic A. The first load of urban surface runoff [J]. Water Research, 1998, **32**(8): 2462-2470.
- [35] Ballo S, Liu M, Hou L J, *et al.* Pollutants in stormwater runoff in Shanghai (China): implications for management of urban runoff pollution [J]. Progress in Natural Science, 2009, **19**(7): 873-880.
- [36] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等. 沥青油毡屋面降雨径流污染物浓度历时变化研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(4): 601-606.
- [37] 聂发辉. 上海城市景观绿地削减地表径流及其污染负荷的可行性研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.