

# 杭州市城区不同土地利用类型降雨径流污染特征

李松波,向美洲,陈前虎

(浙江工业大学 建筑工程学院,杭州 310014)

**摘要:** 城市土地利用方式是影响城区流域水质的主要因素,与水体水质之间存在相关关系,这种关系受到土地利用类型及其空间分布的影响。以杭州市为例,对不同土地利用类型的地表径流水质进行了监测,并对地表雨水径流污染物的出流规律,污染物的事件平均质量浓度(EMC),以及污染物负荷量进行了探讨。研究结果表明,在径流初期 5~20 min,地表径流污染物质量浓度大多达到较高值,随着降雨历时的延续,污染物质量浓度呈波浪状降低,直至趋于平稳,具有明显的初期冲刷效应;污染物年负荷量在不同用地类型之间的高低顺序为:交通区、工业区、商业区、居民区。

**关键词:** 土地利用方式;降雨径流;初期冲刷效应;污染负荷

**中图分类号:** TU984

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2012)06-0475-06

## Pollution characteristics of runoff in different function areas of Hangzhou city

LI Song-bo, XIANG Mei-zhou, CHEN Qian-hu

(College of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The urban land use is a major factor affecting water quality in the urban watershed, which has the correlation with water quality, i. e. , this relationship is affected by the types of land use and the spatial distribution. The surface runoff in different function areas of Hangzhou was monitored after typical rainfall to investigate the variations of pollutants concentration, event mean concentrations ( EMCs ) and the pollutant load of runoff caused by rainfall water. Results showed that the pollutant concentration is up to the higher value in the first 5—20 min and then descended to a stable value in a wavy pattern, which indicates an obvious scouring effect in the early step of rainfall. Furthermore, the pollution load in different types of land use from high to low is traffic area, industrial area, commercial area and residential area.

**Key words:** land use types; storm runoff; first flush effect; pollution load

收稿日期: 2012-08-17

作者简介: 李松波(1986— ),男,黑龙江省漠河人,硕士研究生,研究方向为市政工程。

通信作者: 陈前虎,教授,博士,主要从事城市规划研究。

随着城市化进程的不断加快,不透水地面面积迅速增加,形成了不同于自然地表的“城市第二自然格局”<sup>[1]</sup>。这种土地利用方式的变化,不仅改变了自然景观格局,而且影响了景观中的物质循环和能量交换,对区域气候、水量、水质、土壤和生物多样性造成了巨大影响,也极大地改变了地表的水文特征及水流的方向和速率。在雨量较多的季节,迅速形成的地表径流冲刷并挟带着大量的污染物质进入地表水体,形成了典型的非点源污染。由此可见,土地利用方式的变化已成为目前非点源污染恶化的重要因素,美国环境保护署(USEPA)已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<sup>[2]</sup>。同时,城市土地利用方式也影响到地表污染物的负荷状况,城区地面已成为非点源污染的重要污染来源。因此,土地利用方式的变化不仅影响区域水环境,也成为控制城市非点源污染的关键。

国外对城市降雨径流污染及其控制的研究在 20 世纪 70 年代就取得了很大的进展。Sartor 和 Boyd 的研究结果表明:城市雨水径流中固体悬浮物、营养物质、重金属等污染物的质量浓度/负荷要远高于未利用土地和乡村径流中的污染物质量浓度<sup>[3]</sup>;众多学者认识到研究非点源污染物累积和冲刷规律的必要性,并已经在污染物的时空分布、初始冲刷效应、不透水地面对流域水质影响和地表径流管理控制研究等方面取得了相应的成果<sup>[4]</sup>。国内学者也对很多城市的降雨径流过程进行了污染物质量浓度/负荷变化规律、污染物迁移过程、水环境质量特征、雨水径流模型及控制预防措施等方面的研究<sup>[5-8]</sup>。

杭州作为国际风景旅游城市,随着城市化进程的加快及城市“退二进三”的功能转型,由土地利用方式变化引起的非点源污染逐渐成为水体污染的主要来源。为此,深入探讨降雨径流污染特征、不同城市土地利用类型与地表雨水水质之间的相关关系,对于控制与管理非点源污染,保持城市景观水体良好具有重要意义。本研究根据杭州市城区土地利用状况,将研究区域分为交通区、商业区、工业区、居民区,经过两年的雨水径流监测,总结出不同土地利用类型地表径流水质的出流规律,并引用国外研究中通用的降雨场次污染物质量浓度(EMC),对降雨径流污染的时空分布特征进行了定量分析。

1 研究地区与方法

1.1 研究区域概况及降雨特征

杭州是典型的平原河网城市,属亚热带季风性气候,雨量充沛,平均年降雨量为 1 454.6 mm,70% 的雨量集中在 4—9 月的汛期。市内土地利用类型主要有交通区、商业区、居民区和工业区。交通区选择路面宽、车流量大的交通干线,其路面沉积物与交通流量、车辆交通行为等因素有关,以文二路与湖墅南路口附近区域为研究区域;商业区是商业贸易活动集中的场所,车流量和人流量大,以武林广场作为研究区域;居民区选取大关南苑居住区,毗邻城市交通主干道;工业区是由不同类型的工业厂区密集而成,选取长浜工业园为研究区域。研究区域位置及环境特征见表 1。

表 1 研究区域的位置及环境特征

Table 1 Locations and characteristics of sampling sites in different function areas			
功能区	采样位置	汇水面积/hm <sup>2</sup>	环境特征
交通区	文二路与湖墅南路口	3.2	城市内主要交通要道,交通流量(19 650 车次/12 h)
商业区	武林广场	7.5	传统繁华商业中心,平均人流量 3 928 人/h
居民区	大关南苑	8.6	20 世纪 70 年代以来的中密度住宅小区
工业区	长浜工业园	860.0	以机电和钢材为主

1.2 样品采集与测定

降雨径流采样点均设于道路雨水口,每个区设有 4 个取水点(图 1),当降雨量达到 0.5 mm 后,开始形成地表径流,用 2 L 聚乙烯瓶采集径流水样,时间间隔为 5 min,在取样的同时,结合自动雨量计同步记录降雨强度。样品采集后,在规定的 24 h 保存时间内对样品进行水质分析。测定方法:SS 采用重量法,COD 采用重铬酸盐法,氨氮(NH<sub>3</sub>—N)采用纳氏试剂光度法,总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法。

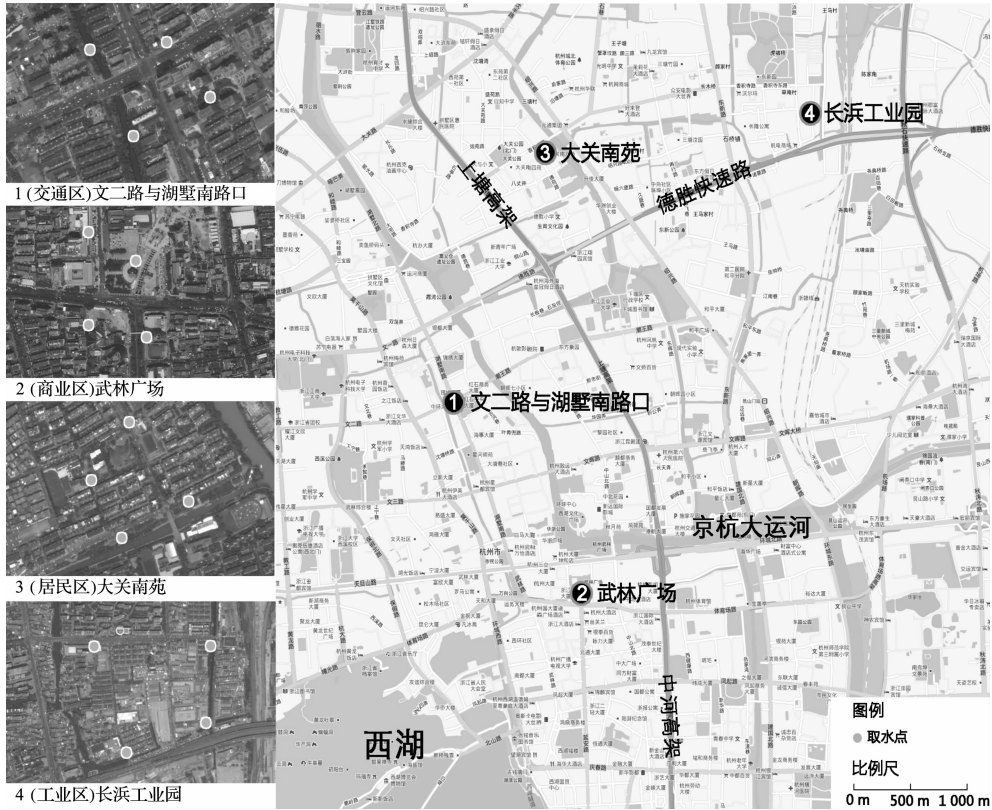


图 1 杭州市城区降雨径流取水点位置

Fig. 1 Sketch map of sampling sites in Hangzhou city

2 结果与分析

2.1 典型降雨径流污染物变化规律

杭州市以中雨降雨强度为主,在对多次降雨事件样品进行收集和分析的基础上,从中选取了 2011 年 9 月 29 日中雨降雨过程作为典型事件,其降雨量为 13.9 mm,平均及最大雨强分别为 0.93 mm/10 min 和 1.9 mm/10 min(图 2),前期晴天时间为 4 d。本研究给出了在不同土地利用类型下,地表径流中 SS、COD<sub>Cr</sub>、氨氮和总磷(TP)质量浓度随降雨时间的变化过程,如图 3 所示。

污染物的冲刷是一个复杂的动态过程,受降雨特征、土地利用状况和周边环境等多种因素的影响。土地利用类型和降雨前期晴天时间长短不同决定了污染物的初始含量,而降雨强度对冲刷过程的影响较大。此次降雨为典型的中雨过程,且初期降雨强度较大,污染物质量浓度表现为急剧上升,在降雨 5~20 min 处于较高值,之后随着降雨历时的延长逐渐下降并趋于平缓,期间随着降雨强度的增大而有小幅上升。在不同土地利用类型下,所产生的地表径流污染物质量浓度的变化过程基本一致,在整个径流污染过程中,整体表现为初期径流中污染物质量浓度高于后期径流中污染物质量浓度,具有明显的初期冲刷效应。

由于前期晴天天数较多,使得不同土地利用方式下初期污染物质量浓度都比较高,其中交通区污染物质量浓度最高,SS、COD、NH<sub>3</sub>—N、TP 分别达到 821、493、3.13、1.66 mg/L,均超过典型生活污水标准。这是由于道路径流水质主要取决于路面污染状况,各种污染物是其最直接的污染原因,随机性和变化幅度很大,在整个降雨过程中污染物质量浓度都比较高,说明交通区是污染比较严重的区域;商业区是

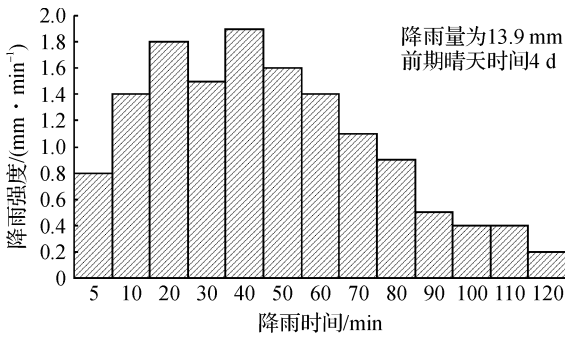


图 2 典型降雨事件降雨强度随时间的变化

Fig. 2 Variation of rainfall intensity with time

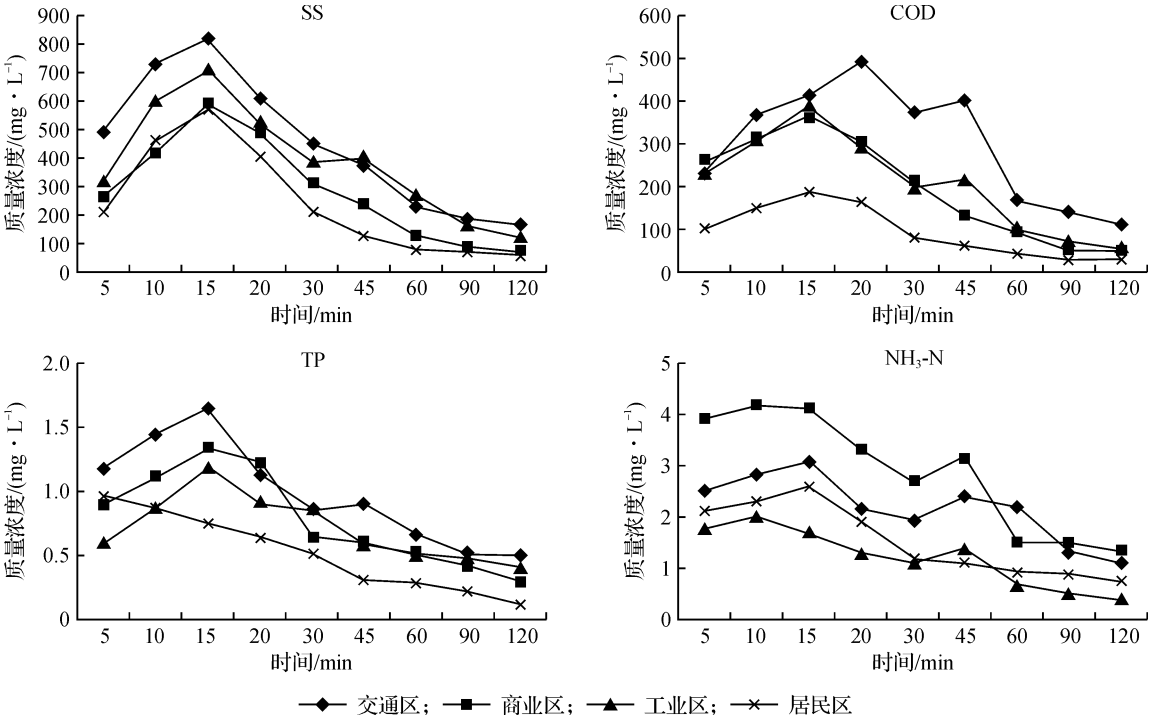


图 3 径流污染物质量浓度随降雨过程的时间变化

Fig. 3 Temporal variation of pollutants in different function areas

人流密集的区域,商业活动频繁,道路旁多为商铺和餐饮店,废弃物污染情况严重,SS、COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 分别达到 593、362、4.26、1.33 mg/L;居民区内绿化程度较高,其清洁状况相对较好,径流污染物质量浓度降低最快,在 30 min 后污染物达到较低水平并处于平衡状态;工业区生产活动频繁,人员活动情况复杂,产生污染物的区域广,总量大,成分较为复杂,与生产性质联系紧密。从时间上看,污染物排放具有间歇性,污染物平时积累,降雨后集中冲刷,初期污染物质量浓度很高,SS、COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 分别达到 734、391、2.05、1.21 mg/L,也超过了典型生活污水标准。不同土地利用方式对降雨径流的污染程度和污染物质量浓度随时间的变化有显著影响。

2.2 典型降雨 EMC 分析

在降雨形成的地表径流中,污染物质量浓度随时间的变化比较大,因此,需要对一场降雨径流的污染程度做出总体评价。美国环境保护署于 1979—1983 年间设立了国家城市径流项目(NURP),其中将降雨径流事件平均质量浓度(event mean concent ration, EMC)用来表示在一场降雨径流全过程排放中某污染物的平均质量浓度。EMC 实质上是一场降雨径流全过程样品污染质量浓度的流量加权平均值,其计算公式为:

$$C_{EM} = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T C(t)Q(t) dt}{\int_0^T Q(t) dt}$$

式中,  $C_{EM}$ —EMC, mg/L;  $M$ — 污染物的质量, mg;  $V$ — 径流体积, L;  $C(t)$ — 径流期间随时间  $t$  变化的污染物质量浓度, mg/L;  $Q(t)$ — 径流期间随时间  $t$  变化的地表径流量, L/min;  $T$ — 总的径流时间, min。

在实际采样过程中,很难获得每个时刻的径流量,因此,只记录降雨开始和地表径流形成的时间,可以消除两者之间的时间差异。此外,在研究区域中,不透水地面面积所占比例很大,因此,可以忽略采样期间地表径流的蒸发量和入渗量,在扣除径流形成的时间后,以降雨量代替地表径流量计算径流污染物的 EMC 值。表 2 给出了杭州市城区不同土地利用类型中地表径流污染物的 EMC 值。

表 2 杭州不同土地利用类型地表径流污染物 EMC

Table 2 Event mean concentration of surface runoff in different function areas of Hangzhou

用地类型	EMC(mg · L <sup>-1</sup> )			
	SS	COD	TP	NH <sub>3</sub> —N
交通区	509.46	348.98	1.07	2.33
商业区	339.54	224.43	1.15	3.11
居民区	285.06	108.38	0.57	1.63
工业区	455.96	239.80	0.79	1.36
国家地表水环境Ⅴ类标准	200.00	40.00	0.40	2.00

通过比较可知,杭州中心城区路面径流主要污染物为 SS 和 COD,径流水质劣于国家地表水Ⅴ类水质,其中 SS 质量浓度高出Ⅴ类水质标准 1.43~2.55 倍,COD 质量浓度高出Ⅴ类水标准 2.71~8.73 倍,TP 超出Ⅴ类水标准两倍以上,NH<sub>3</sub>—N 也有不同程度的污染。与表 3<sup>[9-14]</sup>中美国双子城和法国巴黎相比较,杭州市城区降雨径流污染程度明显高于欧美国家的城市,但是比韩国青州市径流水质污染程度低很多;与国内城市相比较,杭州市城区降雨径流污染程度比上海、广州等城市轻很多,和苏州市比较接近。污染物在不同土地利用类型中显示出较为相似的分布特征,交通区的污染程度明显高于其他区域,其次为工业区和商业区,居民区污染物质量浓度值最低,这与图 3 结果相一致。由此可见,杭州城区地表降雨径流污染较为严重,面源污染已成为水体重要的污染源。

2.3 典型降雨地表径流污染负荷

城市降雨径流污染负荷是指由一场降雨或一年中的多场降雨所引起地表径流排放的污染物总量。污染负荷量是水质评价、预测和水污染控制的重要指标。

$$L=0.01\alpha\phi pAc$$

(1)

式(1)中:L—单位面积排水区域的年污染负荷量,kg/a;α—径流修正系数,一般取 0.9;φ—排水区域综合径流系数;p—年降雨量,mm/a;A—单位排水面积,1 hm<sup>2</sup>;c—污染物的 EMC,mg/L。

在该研究中,径流修正系数 α 是产生径流的降雨事件占总降雨事件的比例,用于雨量较小不产生径流的降雨的修正;研究区域内基本为非渗透性地面,交通区的地表综合径流系数为 0.85,商业区的为 0.75,居民区的为 0.70,工业区的为 0.85,杭州市年平均降雨量为 1 454.6 mm/a,依据公式(1)和表 2 中污染物的平均质量浓度,计算不同土地利用类型地表径流的年污染负荷,结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出,杭州城区降雨径流水质污染比较严重,主要污染物为 SS、COD、NH<sub>3</sub>—N、TP,其污染负荷量分别为 2 577~5 593、979~3 831、14.74~30.12、5.15~11.75 kg/(hm<sup>2</sup> · a),污染物负荷量比较高。这些污染物汇集到受纳水体后,将对受纳水体水质造成非常严重的污染。其中当大量的氮、磷污染物排入水体后,很容易引起藻类爆发。2004 年钱塘江水系中富春江水库和富阳新化埠首次出现藻类大规模爆发现象,说明钱塘江水系污染已经十分严重,杭州对其也有一定的影响。与国外研究结果相比,

表 3 国内外部分城市降雨事件地表径流 EMC

Table 3 EMCs of surface runoff monitored in domestic and foreign

地区	EMC/(mg · L <sup>-1</sup> )	
	SS	COD
美国双子城	184	169
法国巴黎	93	131
韩国青州市	369	695
上海	251	336
广州	416	308
苏州	213	189

表 4 不同土地利用类型地表径流年负荷

Table 4 Annual loads of surface runoff in different function areas

用地类型	污染负荷/[kg · (hm <sup>2</sup> · a) <sup>-1</sup> ]			
	SS	COD	NH <sub>3</sub> —N	TP
交通区	5 593	3 831	25.58	11.75
商业区	3 289	2 174	30.12	11.14
居民区	2 577	979	14.74	5.15
工业区	5 006	2 633	14.93	8.67

杭州市降雨径流水质污染比较严重,各种污染物质量浓度和径流负荷均高于美国 NURP 的研究成果;就 COD 径流负荷而言,大大高于德国所采用的  $600\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  的设计标准,但基本在法国 QASTOR 数据库结论的范围内,这与杭州市人口密度高、外来旅客人流密集和城市环境卫生管理水平有很大的关系。此外,对不同土地利用类型地表径流污染负荷进行比较,结果表明:交通区地表径流输出污染物质总量的 36.1%,商业区占 21.01%,居民区占 13.65%,工业区占 29.24%,交通区地表径流输出污染物质最大,其次是工业区。由此可见,加强对交通区和工业区的地表径流污染防治,对于杭州市治理地表水体的污染、降低钱塘江水系污染程度及解决水资源短缺问题具有重要意义。

3 结 语

杭州市城区主要污染物为 SS 和 COD,其 EMC 质量浓度监测结果比北京、上海、广州等城市要低,与苏州市相近,但均高于国家 V 类水标准,TP 超出 V 类水标准 2 倍以上,也有不同程度的  $\text{NH}_3\text{—N}$  污染。城区单位面积排水区域 SS、COD、 $\text{NH}_3\text{—N}$ 、TP 年污染负荷量分别为  $2\,577\sim 5\,593$ 、 $979\sim 3\,831$ 、 $14.74\sim 30.12$ 、 $5.15\sim 11.75\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,对钱塘江水系造成了较大污染,监测结果也远高于美国、德国等发达国家城市。

杭州市城区地表径流污染物质量浓度大多在径流初期  $5\sim 20\text{ min}$  处于较高值,随着降雨历时的延续,污染物质量浓度呈波浪状降低,直至趋于平稳,具有明显的初期冲刷效应。

杭州市城区地表径流污染物年污染负荷量在不同用地类型之间有很大的差别,由高到低的顺序为:交通区、工业区、商业区、居民区,为改善城市的生态环境,加快城市“退二进三”的功能转型,减小非点源污染对整个城市水环境的影响,应当加强对交通区和工业区的污染治理,通过对城市不同土地利用类型中污染物负荷量的系统研究,为杭州市未来的城区规划提供可靠依据。

参考文献:

[1] 许世远. 上海城市自然地理图集[M]. 北京:中国地图出版社,2004.

[2] Taebi A, Droste R L. Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater [J]. Science of the Total Environment,2004,327(1/3):175-184.

[3] Sartor J D, Boyd G B. Water pollution aspects of street surface contaminants[R]. Washington DC: The United States Environmental Protection Agency,1972.

[4] Vaze J, Chiew Francis H S. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface[J]. Urban Water,2002,4:379-389.

[5] 张淑娜,李小娟. 天津市区道路地表径流污染特征研究[J]. 环境科学与管理,2008,33(2):25-28.

[6] 严长安,陈满荣,王建,等. 城市公路路面雨后积水非点源污染初步研究:以扬州市江阳中路为例[J]. 南水北调与水利科技,2008,6(4):63-67.

[7] 卓慕宁,王继增,吴志峰,等. 珠海城区暴雨径流污染负荷估算及其评价[J]. 水土保持通报,2003,23(5):35-38.

[8] 陈民东,张胜,李思敏. 邯郸市区雨水初期径流控制量的确定[J]. 资源环境与工程,2007,21(4):435-438.

[9] Brezonik P L, Stadelmann 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(7):1743-1757.

[10] 车伍,刘燕,李俊奇. 国内外城市雨水水质及污染控制[J]. 给水排水,2003,29(10):38-42.

[11] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff[J]. Water Research,2000,34(6):1773-1780.

[12] 李田,林莉峰,李贺. 上海市城区径流污染及控制对策[J]. 环境污染与防治,2006,28(11):868-871.

[13] Gan H Y, Zhuo M N, Li D Q, et al. Quality characterization and impact assessment of highway runoff in urban and rural area of Guangzhou, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 140(1/3) : 147-159.

[14] 祁赛君,王涌涛. 苏州城市典型汇水面雨水径流初期冲刷规律分析[J]. 环境科技,2011,24(1):41-43.