

上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究

林莉峰¹, 李田^{2*}, 李贺²

(1. 上海市城市排水有限公司, 上海 200070; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:通过 2003~2005 年连续 3 a 对上海市城区非渗透性地表径流的采样与检测, 获得了 19 个采样点 56 组径流水样污染物 (COD、BOD₅、SS、NH₄⁺-N、TP、TN) 浓度随降雨历时的变化过程线. 据此分析了径流污染物浓度的变化规律及其与降雨特性之间的关系, 计算了地表径流水质的事件平均浓度, 分析了事件平均浓度的分布规律及其与降雨特性参数之间的相关关系. 研究表明, 上海市区非渗透性地表径流事件平均浓度中值 (mg/L) 为: COD 205, BOD₅ 68, SS 185, NH₄⁺-N 3.14, TP 0.40, TN 7.23, 大大高于法国巴黎同类研究的结果; BOD₅ 与 COD 的比值约为 0.37, 明显高于发达国家相关监测的结果. 结果表明, 上海市城区地表径流污染严重, 即使实现了理想的分流制也难以控制面源污染对城市水环境的危害.

关键词:上海市; 径流污染; 非渗透性地表; 事件平均浓度

中图分类号: X508 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)07-1430-05

Characteristics of Surface Runoff Pollution of Shanghai Urban Area

LIN Li-feng¹, LI Tian², LI He²

(1. Shanghai Municipal Sewerage Co. Ltd., Shanghai 200070, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Sampling and monitoring of surface runoff in Shanghai urban area were carried out during rainy seasons from 2003 to 2005, and pollutographs of COD, BOD₅, SS, NH₄⁺-N, TP and TN of 56 rainfall events from 19 sampling sites were analyzed. Discharge processes of runoff pollutants during rain events and relationships of the processes with rainfall characters were discussed, and event mean concentrations (EMCs) were calculated. Probability distribution of EMCs and correlation between EMCs and rain characters were analyzed. Medium event mean concentrations of pollutants in surface runoff of Shanghai urban area are: COD 205, BOD₅ 68, SS 185, NH₄⁺-N 3.14, TP 0.40, TN 7.23 (mg/L), which are much higher than those in Paris urban area. The ratio of BOD₅ to COD is 0.37, which is very high for surface runoff compared with that of large cities of developed countries. Results show that impervious surface pollution is serious in Shanghai urban area and some measures must be taken to improve urban water environment quality except stormwater separation.

Key words: Shanghai; runoff pollution; impervious surface; event mean concentrations (EMCs)

城市径流污染特性的研究在发达国家已有逾 30 a 的历史. 美国环保署 (USEPA) 于 1978 年开展了历时 5 a 的 NURP (Nationwide Urban Runoff Program) 研究, 以掌握城市径流的污染特征, 为城市雨水径流污染的控制提供依据^[1]. 法国^[2]、韩国^[3]、日本^[4]等发达国家, 对城市径流污染特性也进行了大量的研究. 国内该领域的研究工作起步晚、投入不足, 已有的工作远不能满足城市面源污染控制的工程规划与管理决策的需要. 随着点源污染初步得到控制, 城市面源污染控制在上海市已经步入实施阶段, 而相关工作的成效, 有赖于扎实的基础数据调查与积累.

为确定非渗透性地表径流对城市水环境危害的程度, 本研究于 2003~2005 年选择用地性质和污染程度不同的采样点, 对上海市城区非渗透性地表径流进行连续的采样与检测, 以掌握上海市城区地表径流污染的特性、浓度范围及其影响因素, 为城市径流污染控制措施的选择与方案决策建立基础.

1 材料与方法

1.1 实验方法

国外相关研究通常在分流制雨水系统出口处采集径流样品. 上海市分流制系统雨、污混接现象普遍, 雨水系统的出流水质受到旱流污水及其沉积物的严重影响. 因此, 本实验在道路雨水口处采集进入市政管道之前的地表雨水径流样品, 以获得真实反映地表径流污染特性的数据. 相对于系统出流口采样, 雨水口处采样监测需要的样本数量大, 实施更困难. 选取有代表性的采样点, 自地表产生径流开始采集第 1 个样品. 采样间隔一般为 5 min, 根据降雨强度和历时变化进行必要调整; 短时降雨强度较大时,

收稿日期: 2006-07-28; 修订日期: 2006-10-08

基金项目: 上海市科委重大项目 (04dz12024)

作者简介: 林莉峰 (1981~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市面源污染, E-mail: linlifeng@126.com

* 通讯联系人, E-mail: tianli@mail.tongji.edu.cn

采样时间缩短至 3 min; 降雨历时长而强度小, 采样间隔延长至 10 ~ 15 min. 水样用 1 L 水样瓶收集后送往上海市城市排水监测站, 采用标准方法统一分析. 监测水质指标有 COD、BOD₅、SS、NH₄⁺-N、TP、TN 等. 相关的降雨特征数据由临近采样点的排水泵站的自计雨量计获得. 使用德国 NIVUS 公司的 PCM Pro 多普勒面积速度流量计, 于雨水口连接管处率定降雨过程中雨水口径流水量的变化.

1.2 采样点选择

上海老城区人口稠密, 居住、商业及交通用地混杂, 难以简单地根据用地类型选择采样点以确定径流水质. 为提高监测结果的代表性, 在市区不同地域设置了较多的采样点, 以获得总体上能够反映不同用地性质与地面污染程度非渗透性地面的径流样品. 所涉及 19 个采样点的分类及其一般特征见表 1.

表 1 采样点分类及特征

Table 1 Classification and charters of sampling sites		
类型	采样点个数	采样点一般特征
轻度污染	6	居住小区庭院、广场、两侧绿化较好且车流量不大的道路
中度污染	6	人流量较大的区域、车流量较大的交通干线
重度污染	7	人流密集的商业区, 两旁多商铺和餐饮店的街道

1.3 降雨特性

本研究完成的 56 组径流水质监测涉及 21 场降雨事件, 降雨量变化范围在 2.5 ~ 41.6 mm, 能够代表大、中、小不同降雨的情况. 相关降雨事件的特征数据统计见表 2.

表 2 径流水质监测相关降雨事件的降雨特征

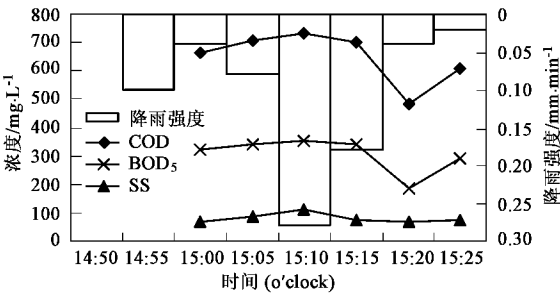
Table 2 Characteristics of related rainfall events				
特征值	最小值	最大值	中值	平均值
降雨量/mm	2.5	41.6	10	10
降雨历时/min	15	250	60	71
降雨强度/mm·min ⁻¹	0.03	0.75	0.14	0.20
前期晴天数/d	1	32	9	9

2 结果与分析

2.1 地表径流排污规律

不同下垫面与降雨特性情况下, 地表径流的污染程度与出流过程有很大的不同. 图 1 ~ 6 为几次典型降雨事件的实测径流水质及降雨强度变化过程.

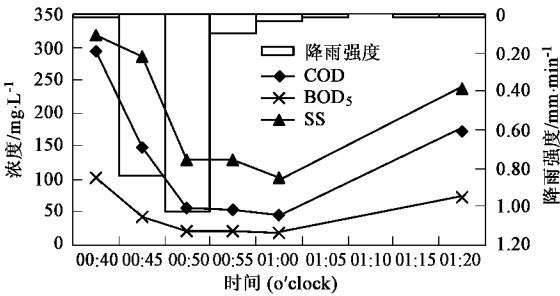
图 1 中新客站南广场属轻度污染区域, 该次降雨的雨量仅 3.7 mm, 前期晴天数为 10 d. 整个径流



2004-08-04, 降雨量 3.7 mm, 前期晴天天数 10 d

图 1 新客站南广场径流 COD、BOD₅、SS 变化过程线

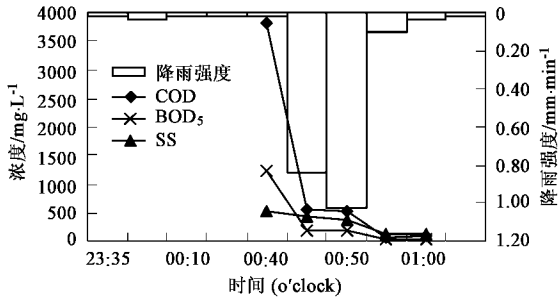
Fig.1 COD, BOD₅, SS pollutograph of runoff from Xinkezhan south square



2004-08-13, 降雨量 13.4 mm, 前期晴天天数 7 d

图 2 芙蓉江路径流 COD、BOD₅、SS 变化过程线

Fig.2 COD, BOD₅, SS pollutograph of runoff from Furongjiang Rd.

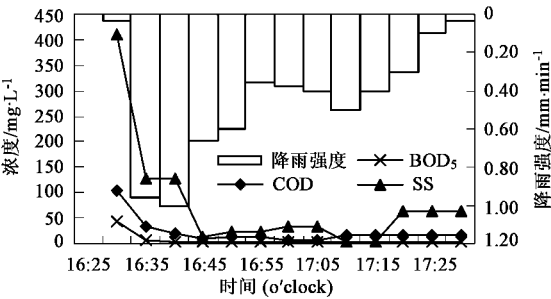


2004-08-13 降雨量 13.4 mm, 前期晴天天数 7 d

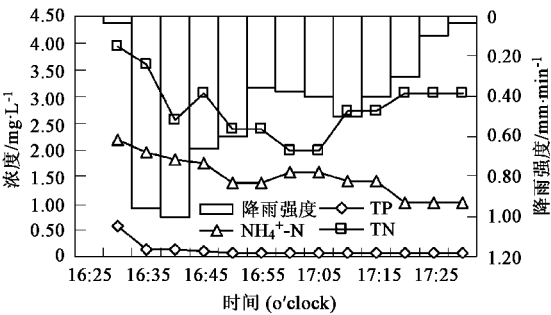
图 3 水城路径流 COD、BOD₅、SS 变化过程线

Fig.3 COD, BOD₅, SS pollutograph of runoff from Shuicheng Rd.

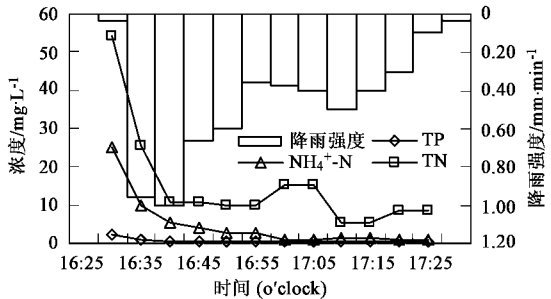
过程污染物的浓度始终较高, 说明即便是环境卫生状况相对较好的区域, 在降雨量较小、前期晴天时间长的情况下, 直至降雨结束径流水质仍然很差. 图 3 所示的降雨事件, 雨量达到 13.4 mm 时, 产生的径流污染物浓度仍达到 BOD₅ 33 mg/L, COD 88 mg/L, SS 127 mg/L, 说明对于地表污染状况严重的区域, 10 mm 以上的降雨仍未能将地表冲刷干净. 仅在图 4 ~ 6 所示的降雨量很大(28.7 mm)、前期晴天天数较少



2005-07-30 降雨量 28.7 mm, 前期晴天天数 2 d
图 4 同济西苑径流 COD、BOD₅、SS 变化过程线
Fig.4 COD, BOD₅, SS pollutograph of runoff from Tongji Xiyuan



2005-07-30 降雨量 28.7 mm, 前期晴天天数 2 d
图 5 同济西苑 NH₄⁺-N、TP、TN 变化过程线
Fig.5 NH₄⁺-N, TP, TN pollutograph of runoff from Tongji Xiyuan



2005-07-30 降雨量 28.7 mm, 前期晴天天数 2 d
图 6 密云路径流 NH₄⁺-N、TP、TN 变化过程线
Fig.6 NH₄⁺-N, TP, TN pollutograph of runoff from Miyun Rd.

(2 d)状况下,径流污染物浓度才稳定于较低水平.地表径流存在明显的初期效应,降雨初期径流 COD 和 SS 浓度值(mg/L)可以达到 10³ 数量级.

同一场降雨不同地点的径流水质浓度差别较大.2004-08-13 水城路的径流浓度大大高于芙蓉江路,是因为前者是人流密集的商业区,道路两旁多为商铺和餐饮店,有机污染负荷高;而后者是居民区内

新修道路,环境卫生状况相对较好.图 5、6 所示的结果反映了同样的情况.2005-07-30 密云路径流的 NH₄⁺-N, TP, TN 浓度比同济西苑高出 1 个数量级左右.密云路采样点靠近公交车站并且附近有垃圾箱,污染比较严重;而同济西苑采样点位于小区内道路,属污染程度较低区域.

上述实测结果初步表明,地表径流污染物的出流规律与降雨强度、降雨量及地表污染物初始累积量(前期晴天数)有关,而径流污染物的平均浓度和用地类型、累积降雨量与前期晴天数等因素有关,其中用地类型是径流水质的主要影响因素.而对于雨水口采样的地面径流水质调查,用地类型的影响更多地表现为雨水口周边的地面卫生状况.

2.2 地表径流流量与事件平均浓度

事件平均浓度(event mean concentration, EMC)是以流量为权求得 1 次降雨事件的径流平均浓度,即以降雨事件总污染物负荷与总径流体积比值来表征径流污染.EMC 较随机采集的混合样平均浓度能够更准确地反映径流污染程度,可以方便地评价不同场合下径流污染的负荷.

由于采样点数量多、分布范围广,受到流量监测设备条件的限制,本研究对部分降雨事件雨水口径流过程进行了现场检测,用以率定瞬时单位线法计算结果,然后通过模型计算确定其他采样点的径流过程.瞬时单位线法是不完全 Γ 函数,其 2 个常数 N (特征河长或线性水库的个数)和 K (特征河长或线性水库的传播时间)综合反映了流域和降雨的特征.周玉文等^[5]认为,一般城市雨水口汇流区域 N 、 K 的取值范围分别为 0.5~1.4 和 5~15(min),由于单个雨水口汇流面积小,汇流和退水时间短,模拟时选用 $N = 0.5$, $K = 5$ min.图 7 为某雨水口采样点 2005-07-30 降雨事件的模拟径流量、管道流量计实测径流量和降雨强度变化过程.该雨水口服务区域为非渗透性铺砌地面,不考虑雨水下渗,扣除 0.5 mm 初损(多次降雨观测平均值).由图 7 可知,实测

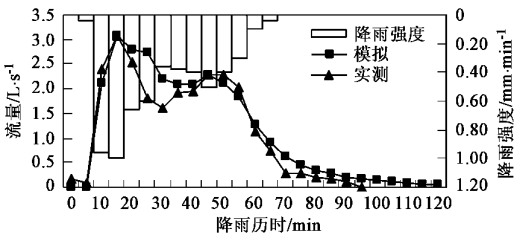


图 7 实测、模拟径流量过程线
Fig.7 Measured and simulated runoff flowrates

与模拟的 2 个洪峰径流量吻合良好,径流总体积的相对误差约为 5%。多次实测结果表明,在降雨强度不是很小的情况下,模拟与实测径流量相对误差的平均值在 10% ~ 15%。据此,根据各次降雨事件的降雨过程,先按瞬时单位线法计算得到雨水口的径流过程线,再结合实测污染物浓度变化过程线便可计算得到各次降雨径流的事件平均浓度。

2.3 事件平均浓度分布规律

NURP^[1]等国外的同类研究结果均表明,径流污染物事件平均浓度呈对数正态分布。图 8 给出了本研究实测径流事件平均浓度在对数正态概率图上的分布情况。

从图 8 可以看出,除 BOD₅ 有一定误差之外,其他水质参数值的数据点基本处于同一直线上,说明正态分布情况良好。BOD₅ 数值的波动偏大与不同采样点有机污染程度相差较大有关。根据对数正态分布的定义,得知对于不同用地类型与降雨特征,地表径流的 EMC 总体呈良好的对数正态分布。因此,可通过均值(或中值)及变差系数(标准差与均值之比)描述 EMC 的集中趋势和变化特性,并可方便地计算给定置信度下 EMC 的范围。鉴于人口稠密的上海中

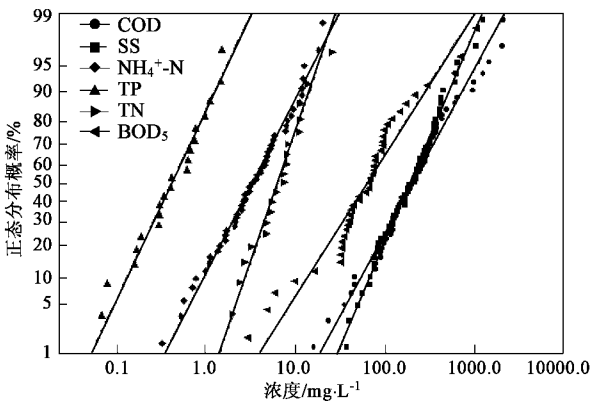


图 8 事件平均浓度对数正态分布概率

Fig.8 Lognormal distribution of runoff EMC

心城区居住、商业与交通用地混杂交错,按用地性质对 19 个采样点分类存在较大的主观性,本研究不分用地类型,对所有监测点的事件平均浓度进行统一的统计分析,掌握城区不同下垫面径流水质的总体情况。实验所得 56 次降雨事件径流 EMC 在 90% 置信区间下的浓度范围如图 9 所示。中值、均值和变差系数统计结果见表 3。

表 3 中 BOD₅ 的变差系数较大,说明数据的离

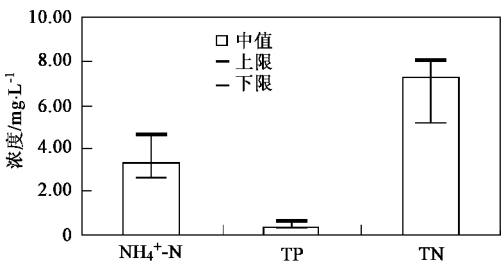
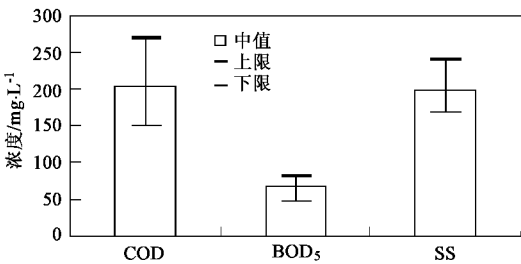


图 9 地表径流 EMC 分布范围

Fig.9 Range of surface runoff EMC

表 3 上海市城区非渗透性地表径流事件平均浓度统计				
Table 3 EMC statistic of urban runoff from impervious surface in Shanghai				
特征值	样本个数	中值/mg·L ⁻¹	均值/mg·L ⁻¹	变差系数
COD	56	205	336	1.24
BOD ₅	41	68	124	1.57
SS	56	185	251	0.83
NH ₄ ⁺ -N	49	3.15	4.85	0.94
TP	20	0.40	0.57	0.77
TN	19	7.23	7.74	0.69

散程度较高。这是因为为避免统计的主观性,未对污染程度不同的采样点进行分类。此外,由于几次实地监测的降雨量很小(2.5 ~ 3.7mm),使得相关降雨事件的 EMC 相当大;而均值较之中值对异常值更为敏

感,使得统计结果的均值远大于中值。本研究不分采样点用地类型所得径流水质综合统计结果,可以反映上海城区非渗透性地表径流的总体污染状况:径流的 COD、SS 中值浓度已经高于上海市合流污水一期工程早流污水的平均浓度。与巴黎市区高密度的居住/商业区 Le Marais 的街道径流水质调查结果^[2]比较,上海市区地表径流污染物浓度高出 1 倍以上。此外,由于上海市的年均降雨量高达 1 200 mm,雨水径流造成的污染较法国等降雨量较小的欧洲国家要严重得多。

2.4 径流污染的特性

根据各次降雨径流污染物浓度的 EMC 作图,得

到地表径流的 BOD_5 与 COD 之间的相关性分析结果如图 10.

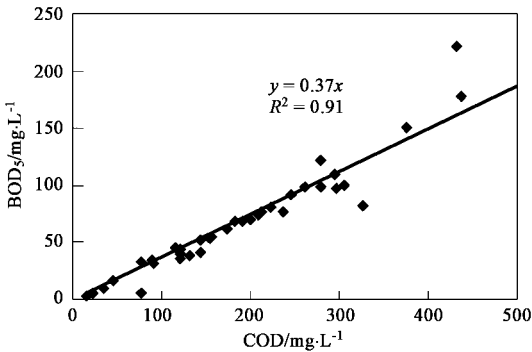


图 10 地表径流的 BOD_5/COD

Fig.10 Ratio of BOD_5 vs COD of surface runoff

图 10 表明地表径流的 BOD_5 与 COD 之间具有很好的线性关系($R^2 = 0.91$), BOD_5 与 COD 的比值约为 0.37.分析表明不同地面污染程度采样点之间上述比值无明显差异.这与韩国清州市^[3]的调查结果($BOD_5/COD = 0.33 \sim 0.56$)比较接近;高于巴黎市区的实测值 0.27^[2]及美国 NURP 调查结果 1/6^[1].以上结果表明,上海城区地表受生活垃圾污染严重,径流污染物中可生物降解有机物所占比例很大.与欧美发达国家的城市径流相比,上海城区的雨天径流更容易造成市区河道雨后缺氧黑臭.

2.5 地表径流影响因素的相关性分析

为了评价主要影响因子与径流污染物之间的关系,计算了降雨特征数据与径流水质之间的相关系数,结果见表 4.根据上述分析,各项水质参数的 EMC 呈对数正态分布,在计算相关系数之前,各降雨特征数据与水质数据均先转化为对数值,以增加数据的对称性.

表 4 径流污染物浓度与降雨特性的相关性

参数	COD	BOD_5	SS	NH_4^+-N
降雨量	-0.51	-0.48	-0.24	-0.39
降雨强度	-0.32	-0.29	-0.34	-0.15
晴天天数	0.30	0.28	0.06	0.18

表 4 中 COD、 BOD_5 、SS、 NH_4^+-N 4 个水质变量与降雨量均呈负相关,相关系数最高的为 COD, $R = -0.51$.其原因为降雨量越大,径流的稀释作用越强,径流中污染物浓度越低.由表 4 可见,径流水质还与降雨强度呈负相关性,而与前期累计晴天天数呈正相关,这证实了污染物在晴天累积、雨天受冲刷

的理论.这一结果与 Patrick 等^[6]的研究结论相近,而与 NURP^[1]的研究结果不同.后者得出径流量与径流事件平均浓度之间相关性并不明显的结论,可能是其调查所涉及范围太广,各城市之间的差异掩盖了上述关系.

3 结论

(1) 根据 2003 ~ 2005 年雨季对上海城区 19 个采样点累计 21 场降雨地表径流的连续采样监测,得到上海市非渗透性地表径流事件平均浓度的中值(mg/L)为: COD 205, BOD_5 68, SS 185, NH_4^+-N 3.14, TP 0.40, TN 7.23.此中值浓度大大高于法国巴黎同类研究的结果.

(2) 统计结果表明,上海城区非渗透性地面径流的污染物事件平均浓度总体呈良好的对数正态分布.据此统计了 90% 置信度下径流中主要污染物的浓度范围.

(3) 地表径流的 BOD_5 与 COD 之间有很好的线性关系($R^2 = 0.91$). BOD_5 与 COD 的比值为 0.37,明显高于发达国家相关监测的结果.

(4) 非渗透性地面径流污染物的浓度受众多因素影响,实验结果表明,其事件平均浓度与降雨强度、降雨量呈负相关,而与前期晴天数呈正相关.

(5) 在上海市中心城区高人口密度、高污染负荷条件下,即使分流制雨水系统不存在雨污混接,其雨天出流也会对城市水体造成明显的损害.在排水系统规划和现有系统改造决策中,需要认真探索适合上海城区具体情况、符合今后长远发展需要的城市排水体制.

参考文献:

[1] U. S. Environmental Protection Agency. Results of the National Urban Runoff Program Volume I—Final Report, PB 84-185552 [R]. Washington D C: National Technical Information Service (NTIS), 1983.

[2] Gromaire-Mertz M C, Garnaud S, Gonzalez A, et al. Characterization of urban runoff pollution in Paris [J]. Wat Sci Tech, 1999, 39(2): 1 ~ 8.

[3] Choe J S, Bang K W, Lee J H. Characterization of surface runoff in urban areas [J]. Wat Sci Tech, 2002, 45(9): 249 ~ 254.

[4] Atsushi Ichiki, Toshiyuki Ohnishi, Kiyoshi Yamada. Estimation of Urban Nonpoint Source Pollution In Lake Biwa Basin [J]. Wat Sci Tech, 1998, 38(10): 157 ~ 163.

[5] 周玉文,孟昭鲁.瞬时单位线法推求雨水管网入流量过程线的研究[J]. 给水排水,1995,21(3):5 ~ 9.

[6] 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: 1743 ~ 1757.