

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2017. 05. 015

合肥春季雨水径流污染过程及特征分析

窦月芹,吴 涓,陈 众,胡 欣

(安徽大学资源与环境工程学院,安徽 合肥 230601)

摘要:为了解春季雨水径流对巢湖水体营养素储备和藻类繁殖的影响,2013—2015年3—5月期间,对合肥草地、生活区和交通干道3类下垫面的12场降雨径流进行监测分析。结果表明,生活区和交通干道的TN、NH₄⁺-N、COD以及TP径流事件平均浓度值分别是GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中V类标准限值的4.8、2.5、4.3、2.4和3.7、2.0、3.6、2.3倍,其SS平均浓度分别是GB 8978—1996《污水综合排放标准》中二级标准限值的7.5和13.5倍,NO_x-N均值分别为1.63、2.39 mg/L。Person系数分析显示不同形态氮浓度之间强相关,COD与氮浓度强相关。跟踪分析生活区COD、TN、TP和SS指标,其浓度-时间变化曲线以及M(V)曲线分析显示春季径流有初始冲刷效应,可以通过控制初期径流控制径流污染。

关键词:春季径流;城市下垫面;营养物;初始冲刷;巢湖;合肥市

中文分类号:X508 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2017)05 - 0086 - 05

Spring rain runoff pollution process and its characteristics analysis in Hefei City

DOU Yueqin, WU Juan, CHEN Zhong, HU Xin

(School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: To know the effects of spring runoff on nutrient storage and algae development in Chaohu Lake, runoff samples from three urban underlying surfaces of grassland, living quarters and highway were monitored and tested during 12 rain events, from March to May in the year of 2013—2015 in Hefei City. Results indicated that the average EMCs (event mean concentrations) of TN、NH₄⁺-N、COD and TP from living quarters and highway were 4.8、2.5、4.3、2.4 and 3.7、2.0、3.6、2.3 times of the fifth level *Surface Water Environmental Quality Standard* (GB3838 - 2002), average EMCs of SS were 7.5 and 13.5 times of the second lever *Integrated Wastewater Discharge Standard*(GB8978—1996), and EMCs of NO_x-N were 1.63、2.39mg/L respectively. Person coefficient analysis indicated that TN、NH₄⁺-N and NO_x-N were positively related with each other, and COD was related with nitrogen. By tracing and analyzing COD、TN、TP and SS in the living quarters., their concentration-time change curves and M (V) curves analysis showed that the first flush phenomenon occurred in spring rainfall runoff, and runoff pollution could be handled by controlling the first runoff.

Key words: spring runoff; urban underlying surface; nutrient; first flush; Chaohu Lake; Hefei City

随着点源污染逐渐得到控制,雨水径流所带来的非点源污染已经成为城市水体污染的一个主要来源^[1-2]。径流中的营养物和SS等污染物主要来自人类活动(如生活垃圾堆放、交通运输等)、植物降解以及动物粪便排放等,因此径流中污染物的种类和含量随着地区以及下垫面的不同会有很大差异^[3-4]。研究发现,径流污染存在明显的初始冲刷效应^[5-7],即降雨初期的小部分径流携带大部分的污染物。美国从20世纪50年代起就提出了一系列雨水管理措施,其中一种重要径流水质管理方式就

基金项目:安徽省教育厅重点科研项目(KJ2017A019)
作者简介:窦月芹(1975—),女,讲师,博士,主要从事水环境管理研究。E-mail: yqindou@163.com

是控制初期径流,即对初期 12.7 mm 或者 25.4 mm 径流进行控制^[8]。

我国大部分地区的降雨多集中在夏季,对径流污染的研究也多集中在夏季,而对于富营养化水体,春季往往是藻类营养素储备和藻类繁殖的一个重要阶段,对春季径流面源污染进行研究及控制有重要意义。本文对合肥地区春季的雨水径流,包括径流水质特征和初始冲刷特征进行了研究,重点关注氮磷营养物,探索不同下垫面的径流污染特性,以期为巢湖流域面源污染的管理和控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

合肥位于 117.27°E,31.86°N,地处长江和淮河之间、巢湖之滨。气候属于北亚热带季风气候,四季分明,雨量适中,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。多年年平均降水量为 1000 mm 左右,多年年平均气温为 15.7℃。

1.2 研究方法

1.2.1 采样方法

考虑到实验规模和可操作性,采样点选择在安徽大学校园及其附近的九龙路、馨苑居民区。将采样区域划分成交通区(交通干道)、生活区和绿地区,各设置 2~3 个采样点。干道采样点在路边雨水下水井,生活区采样点包括屋面(楼顶排水管)和小区内道路下水井,绿地区选取校园教学楼前草地。从降雨径流形成时,用 1L 的聚乙烯瓶采样。春季多数降雨强度不大,采样频率为:产流后 80 min 内 10 min/次,之后 20~120 min/次。由于径流流量较难监测,用监测到的降雨量表征径流量。2013—2015 年春季(3—5 月),共采集到 12 场有效降雨。

1.2.2 分析方法

径流监测指标包括 TN、NH₄⁺-N、NO_x-N(NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N)、TP、SS 和 COD。测定方法:TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法,NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法,NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法,TP 采用钼锑抗分光光度法,COD 采用重铬酸钾法测定,SS 采用重量法。径流中污染物特征以径流事件平均浓度^[9]表示。

2 结果与分析

2.1 不同下垫面径流污染物分析

3 类下垫面的径流 EMC 值如图 1 所示。12 次径流监测中 TN 都有完整的数据,NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N

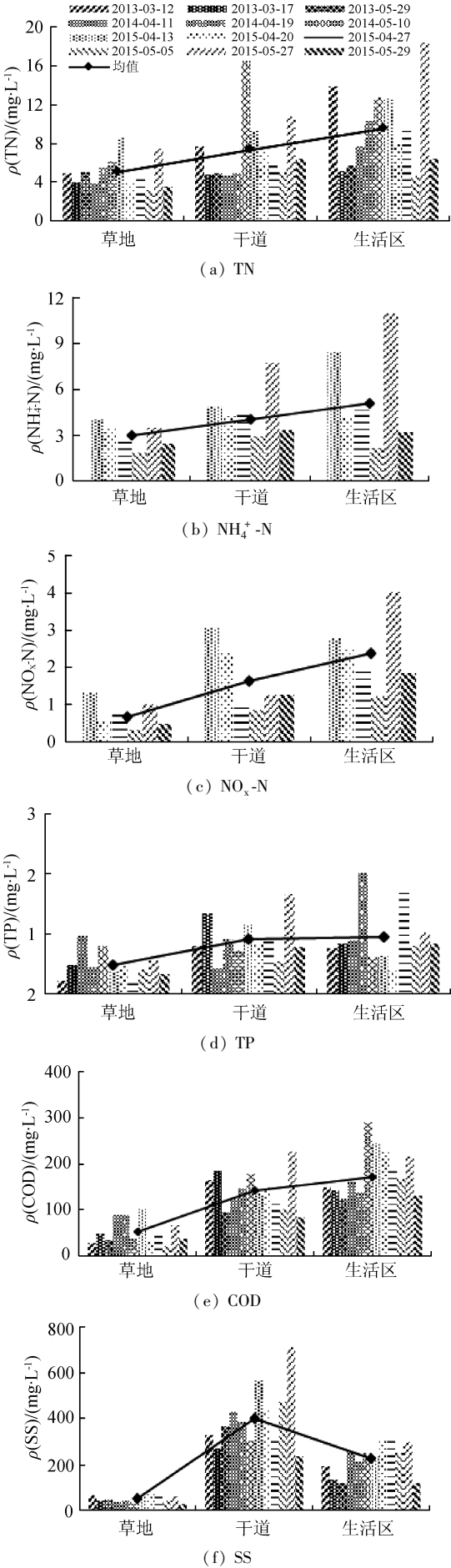


图 1 不同下垫面径流污染物质量浓度

仅有 2015 年 6 次降雨的有效数据。污染物 TN、NO_x-N、NH₄⁺-N 以及 COD 在草地径流中浓度最低,生活区的浓度最高,交通干道浓度中等(图 1(a)、(b)、(c)、(e))。GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中 V 类水质的 TN、NH₄⁺-N 以及 COD 的质量浓度限值分别为 2.0 mg/L、2.0 mg/L 和 40 mg/L,草地、交通干道和生活区下垫面的污染物均值均超过这个标准,其中污染较为严重的生活区和交通干道径流 TN、NH₄-N 以及 COD 均值分别是 V 类水质标准的 4.8、2.5、4.3 和 3.7、2.0、3.6 倍。分析单次降雨径流中 TN 的组成,径流中的溶解性 TN 大部分以无机氮形式存在,部分以有机氮(organic nitrogen, ON)形式存在,如 2015 年 4 月 20 日生活区径流 TN 为 7.94 mg/L,ON 质量浓度为 1.23 mg/L($\rho(\text{ON}) = \rho(\text{TN}) - \rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) - \rho(\text{NO}_x - \text{N})$)。目前许多研究或者实践采用工程性措施处理雨水径流,对 NH₄⁺-N 和 NO_x-N 有较好的去除作用,相比较而言,溶解性有机氮在雨水和污水处理中都比较难去除。

影响径流水质的因素主要有区域特点、下垫面类型、降雨特征(前期晴天数、降雨强度、降雨历时等)等^[9-10]。生活区在 3 类下垫面中污染比较严重,主要是由于生活区的 3 个采样点选在馨苑小区,是安徽大学教职工生活区,入住率高,人口密度大,人类活动频繁,而安徽大学地处大学城,附近的交通干道与老城区交通干道相比,人为活动相对较少。草地径流的各类污染物浓度都是最低的,为方便采样,本次几个采样点选在有一定坡度的草地,类似生物滞留系统,这与文献[11-12]中植被-土地系统对径流中不同污染物有一定去除率的结论一致。

监测中共有 11 次 TP 的有效数据(图 1(d))。草地径流中 TP 均值最低,但是也高于地表水 V 类水 TP(0.4 mg/L)标准,生活区和道路径流 TP 均值相似,分别是 V 类水标准的 2.4、2.3 倍。文献[13]监测到绿地径流中磷的浓度与其他下垫面相比偏高,在本次研究中没有发现这种现象。道路径流的 SS 浓度明显高于草地和生活区径流中浓度(图 1(f)),与生活区相比,道路行人活动较少,生活垃圾堆放量、动物粪便等少,氮和有机物的浓度较低;但是道路车流量大,而且近年随着合肥城市发展,运输建筑垃圾和渣土的车辆频繁,所以道路的 SS 明显较高。我国 GB 8978—1996《污水综合排放标准》一级和二级标准 SS 的限值分别是 20 mg/L、30 mg/L,可以看出,交通道路和生活区的 SS 值远远超过这一排放标准,SS 均值分别是二级标准限值的 13.5 和 7.5 倍。

谢继锋等^[14]在 2009 年 12 月—2010 年 10 月期间考察了合肥的径流特征,而本文中相应指标值(COD、SS、TN 以及 TP 的浓度均值)均高于谢继锋等^[14]的研究结果(11 个月浓度均值),这在一定程度上显示春季径流氮磷污染物浓度偏高。

总体上生活区径流营养盐浓度最高,生活区径流各污染物浓度之间的相关性见表 1。表 1 显示,三种形态氮(TN、NH₄⁺-N 和 NO_x-N)之间相关性极强,COD 与氮指标之间相关性也较强。而其他污染物之间在此次监测中没显示出很强的相关性。

表 1 生活区径流各污染物浓度之间 Person 系数					
	NO _x -N	NH ₄ ⁺ -N	TP	COD	SS
TN	0.949	0.986	0.044	0.520	0.441
NO _x -N		0.937	-0.113	0.610	0.326
NH ₄ -N			0.043	0.635	0.312
TP				-0.402	0.068
COD					0.650

2.2 初期径流污染特征分析

为了解春季径流初期冲刷特征,选取整体污染较为严重的生活区,分析 2015-05-05 和 2015-05-27 的径流水质随时间变化特征(图 2)。表 2 列出这两场降雨的特征。

表 2 两场降雨特征				
时间	降雨量/ mm	最高温度/ ℃	平均历时/ min	降雨前干燥 天数/d
2015-05-05	18	23	565	7
2015-05-27	32	32	422	14

由图 2 可见,在形成径流后 50~80 min 内,径流污染物浓度变化较大,随后趋于平缓。2015-05-05 降雨形成径流 80 min 后 COD 降至 65.2 mg/L 以下,2015-05-27 降雨降至 47.4 mg/L 以下。这两场降雨初期监测自然雨水中 TN 浓度分布为 4.6 mg/L、4.1 mg/L,可见大气沉降是径流中 TN 的一个主要来源。Sally 等^[15]的研究也指出雨水径流特征与大气中污染物特征以及下垫面特点密切相关。TP 在 80 min 之后分别降至 0.54 mg/L、0.52 mg/L 以下。SS 虽然在 80 min 之后浓度趋于平缓,但浓度依然在 100 mg/L 以上,高于污水综合排放标准中 SS 的限值。李家科等^[16]研究西安市夏季雨水,结果显示产流前 20 min 污染物浓度最强,之后下降趋于平缓。这主要因为与春季相比,夏季降雨普遍强度大,径流量大,污染物冲刷剧烈。

目前国内外多采用 Geiger^[17]的定义研究径流初始冲刷效应,即以污染物的累积污染负荷(P_t)与累积径流量(Q_t)的相关性为基础,以两者所形成无

量纲累积曲线(M(V)曲线)的发散来确定是否发生了初始冲刷,定义如下:

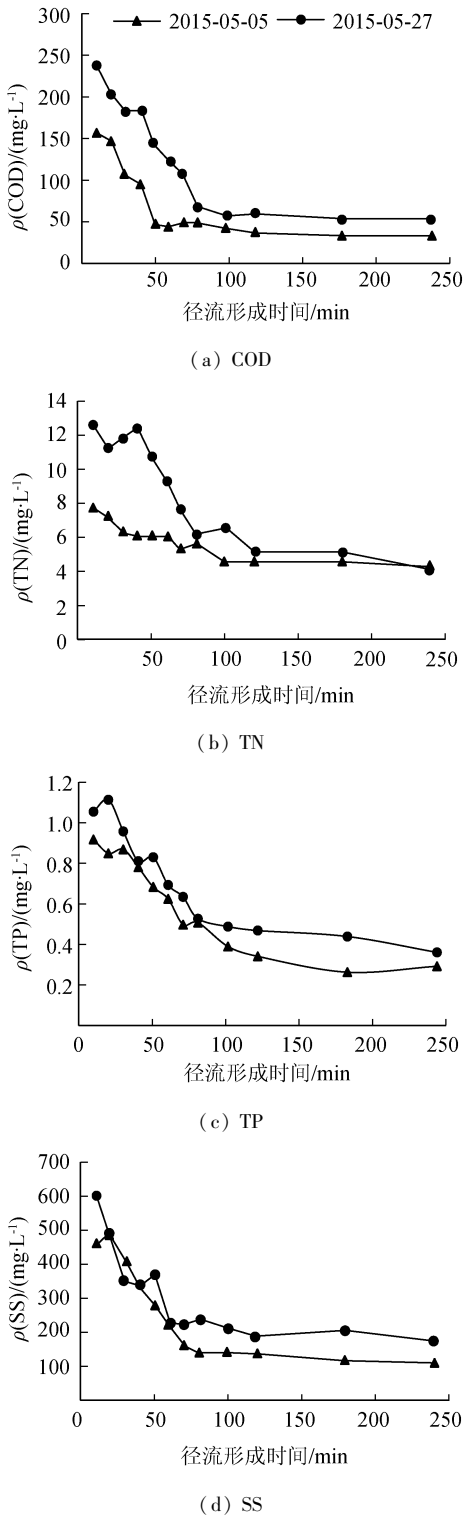


图2 生活区径流污染物浓度随时间变化

$(P_i / \sum P_i) / (Q_i / \sum Q_i) > 1$ 表示有初始冲刷效应; $(P_i / \sum P_i) / (Q_i / \sum Q_i) < 1$ 表示无初始冲刷效应。其中, $[P_i / \sum P_i]$ 是累积污染负荷与总负荷之比, $[Q_i / \sum Q_i]$ 是累积径流量与总径流量之比。

图3 是生活区径流 COD、TP、TN 以及 SS 的 M(V)

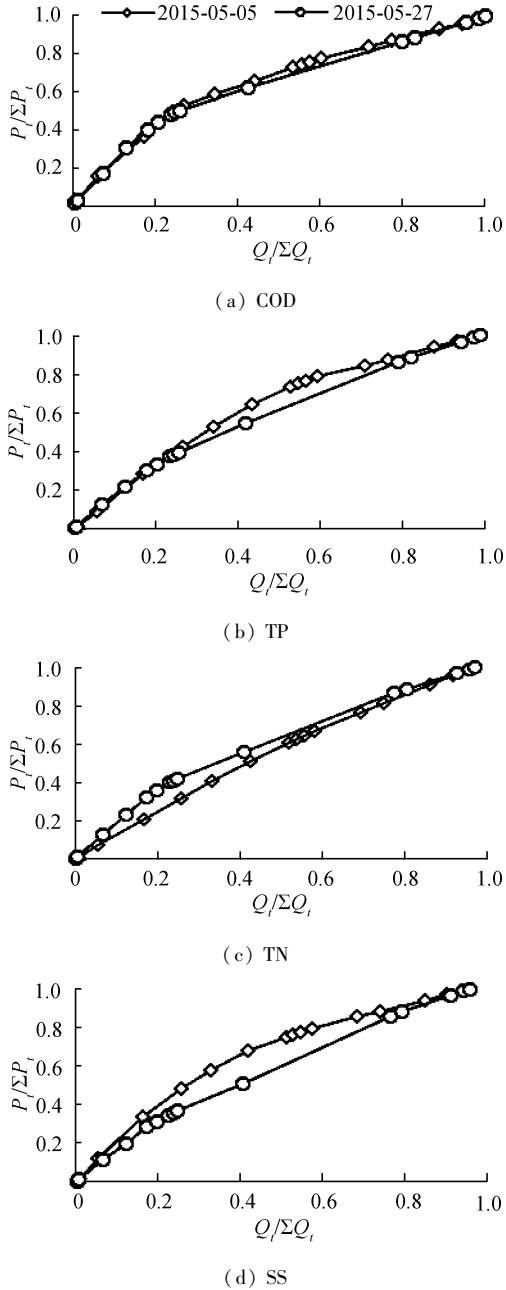


图3 生活区径流 COD、TP、TN 以及 SS 的 M(V) 曲线

曲线。结果显示:污染物指标 COD、TP、TN 以及 SS 曲线均在对角线上方,即 $[P_i / \sum P_i] / [Q_i / \sum Q_i] > 1$,均存在不同程度的初期冲刷效应。M(V)曲线显示本次监测的径流,没有一些文献^[5,6,16]中初期冲刷明显,结合图2 污染物浓度随时间变化曲线,这主要是因为本次研究关注春季,而相关文献关注夏季或者全年径流研究,夏季降雨普遍强度大,径流量大,污染物初始冲刷较强烈。

根据我国对降雨强度的分类,2015 年 5 月 5 日和 27 日的降雨量分别为 18 mm 和 32 mm,分别属于中雨和大雨。春季的降雨量在时间上相对分散均匀,但是春季降雨量也相对小,按照控制初期 12.7 mm 径流的标准,可以满足春季雨水径流处理量。

3 结 论

对合肥 2013 年至 2015 年 3—5 月期间共 12 场降雨进行有效监测,并对其春季雨水径流污染特征进行研究,选取草地、交通干道和生活区(屋顶和小区道路)3 类下垫面,分析其径流中 TN、NO_x-N、NH₄⁺-N、TP、COD 以及 SS 的质量浓度。

径流事件平均浓度分析显示,3 类下垫面中,TN、NH₄⁺-N、TP 以及 COD 在草地径流中质量浓度较低,生活区和道路的质量浓度较高,均值分别为 9.54、5.07、0.96、171.3 mg/L 和 7.34、4.05、0.93、143.2 mg/L,分别是地表水 V 类水质标准的 4.8、2.5、4.3、2.4 倍和 3.7、2.0、3.6、2.3 倍,生活区和道路径流 NO_x-N 的质量浓度分别为 2.39 mg/L 和 1.63 mg/L。道路和生活区的 SS 均值分别是污水综合排放标准二级标准限值的 13.5 和 7.5 倍。生活区径流营养盐污染最为严重,Person 相关分析显示不同形态氮浓度之间呈强相关,与 COD 浓度呈较强相关。

跟踪分析生活区径流中 COD、TN、TP 和 SS 浓度,发现在形成径流后 50~80 min 内污染物浓度较高,变化较大,之后趋于平缓。相应的 M(V)曲线分析也显示生活区径流污染物均存在不同程度的初期冲刷效应。控制初期径流(12.7 mm)可以满足春季径流污染控制量。

参考文献:

[1] HUANG T L,LI X,RIJNAARTS H,et al. Effects of storm runoff on the thermal regime and water quality of a deep, stratified reservoir in a temperate monsoon zone, in Northwest China [J]. Science of the Total Environment, 2014,485-486(13):820-827.

[2] TANG J Y M, ARYAL R, DELETIC A, et al. Toxicity characterization of urban stormwater with bioanalytical tools [J]. Water Research,2013,47:5594-5606.

[3] KAYHANIAN M,FRUCHTMAN B D,GULLIVER J S,et al. Review of highway runoff characteristics: comparative analysis and universal implications [J]. Water Research, 2012,46(20):6609-6624.

[4] PEYTON D P, HEALY M G, FLEMING G T A, et al. Nutrient, metal and microbial loss in surface runoff following treated sludge and dairy cattle slurry application to an Irish grassland soil [J]. Science of the Total Environment,2016,541(1):218 - 229.

[5] 任玉芬,王效科,欧阳志云,等. 北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析[J]. 环境科学,2013,34(1):373-378. (REN Yufen, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, et al. Analysis of first flush effect of typical underlying surface runoff in Beijing urban city [J].

Environmental Science, 2013, 34 (1): 373-378. (in Chinese))

[6] ZHANG Q Q,WANG X K,HOU P Q,et al. The temporal changes in road stormwater runoff quality in Chongqing, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013,185(12):9763-9775.

[7] PENG H Q, LIU Y H, WANG W, et al. Event mean concentration and first flush effect from different drainage systems and functional areas during storms [J]. Environmental Science and Pollution Research,2016,23(6):5390-5398.

[8] ISMM. Stormwater management manual [M]. Iowa: Iowa State University,2009.

[9] 谢继锋,李静静,窦月芹,等. 不同下垫面类型对地表径流中多环芳烃污染特征的影响分析[J]. 环境化学,2015,34(4):733-740. (XIE Jifeng, LI Jingjing, DOU Yueqin, et al. Pollution characteristics of PAHs in urban runoffs on different types of underlying surfaces [J]. Environmental Chemistry,2015,34(4):733-740. (in Chinese))

[10] STERK A,SCHIJVEN J,HUSMAN A M R,et al. Effect of climate change on runoff of Campylobacter and Cryptosporidium from land to surface water [J]. Water Research,2016,95:90-102.

[11] CHEN X L, PELTIER E, STURM B S M, et al. Nitrogen removal and nitrifying and denitrifying bacteria quantification in storm water bioretention system [J]. Water Research 2013,47(4):1691-1700.

[12] FAULKNER J W, ZHANG W, GEOHRING L, et al. Nutrient transport within three vegetative treatment areas receiving silage bunker runoff [J]. Journal of Environmental Management,2011,92(3):587-595.

[13] STAGGER J H,DAVIS A P,JAMIL E,et al. Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff [J]. Water Research,2012,46:6731-6742.

[14] 谢继锋,胡志新,徐挺,等. 合肥市不同下垫面降雨径流水质特征分析[J]. 中国环境科学 2012,32(6):1018-1025. (XIE Jifeng, HU Zhixin, XU Ting, et al. Water quality characteristics of rainfall runoff in Hefei City [J]. China Environmental Science, 2012, 32 (6): 1018-1025. (in Chinese))

[15] ZGHEIB S,MOILLERON R,CHEBBO G. Priority pollutants in urban stormwater: part 1- case of separate storm sewers [J]. Water Research,2012,46(20),6683-6692.

[16] 李家科,李怀恩,董雯,等. 西安市城区非点源污染特性与负荷估算[J]. 水力发电学报,2012,31(4):131-138. (LI Jiake, LI Huai'en, DONG Wen, et al. Estimation of non-point source pollution characteristics and loading in Xi'an urban areas [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31(4):131-138. (in Chinese))

[17] GUPTA K, SAUL A J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows [J]. Water Research, 1996,30(5):1244-1252.

(收稿日期:2017-02-22 编辑:徐 娟)