

雨水径流截流渗滤系统控制城市面源污染的中试研究

白瑶¹, 左剑恶^{1*}, 干里里¹, 罗同顺¹, 缪恒峰², 阮文权², 黄霞¹

(1. 清华大学环境科学与工程系, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122)

摘要: 设计雨水径流截流渗滤中试系统, 监测其对汇水路面上降雨径流的长期净化效果, 分析 2 次典型降雨径流的污染特征及系统处理效果. 结果表明, 路面径流污染严重, SS、COD、TN、TP 的平均浓度分别为 361、135、7.88 和 0.62 mg/L; 长时降雨形成的径流表现出明显初期效应, 前 25% 水量中所含的 SS、TP、DTP 及 PO_4^{3-} 等污染物的量均超过总量的 50%; 在形成的径流总量小于截流池体积的情况下, 该系统可 100% 去除径流形成的面源污染; 当径流量超过截流池体积时, 溢流部分经由渗滤池净化, 系统对 SS、COD、TN、TP、DTP 和 PO_4^{3-} 等污染物总量的去除率可分别达到 97.4%、61.8%、22.6%、85.1%、72.1% 和 85.2%; 系统长期运行稳定, 对 SS、COD、TN 和 TP 等主要污染物浓度的去除率分别为 98.6%、65.4%、55.1% 和 92.6%, 可大幅削减径流引起的面源污染.

关键词: 面源污染; 径流; 初期径流; 截流; 渗滤; 总磷

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)09-2562-07

Urban Non-point Source Pollution Control by Runoff Retention and Filtration Pilot System

BAI Yao¹, ZUO Jian-e¹, GAN Li-li¹, LOW Thong Soon¹, MIAO Heng-feng², RUAN Wen-quan², HUANG Xia¹

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: A runoff retention and filtration pilot system was designed and the long-term purification effect of the runoff was monitored. Runoff pollution characters in 2 typical events and treatment effect of the pilot system were analyzed. The results showed that the runoff was severely polluted. Event mean concentrations (EMCs) of SS, COD, TN and TP in the runoff were 361, 135, 7.88 and 0.62 mg/L respectively. The runoff formed by long rain presented an obvious first flush effect. The first 25% flow contributed more than 50% of the total pollutants loading of SS, TP, DTP and PO_4^{3-} . The pilot system could reduce 100% of the non-point source pollution if the volume of the runoff was less than the retention tank. Otherwise the overflow will be purification by the filtration pilot system and the removal rates of SS, COD, TN, TP, DTP and PO_4^{3-} reached 97.4%, 61.8%, 22.6%, 85.1%, 72.1%, and 85.2% respectively. The system was stable and the removal rate of SS, COD, TN, and TP were 98.6%, 65.4%, 55.1% and 92.6%. The whole system could effectively remove the non-point source pollution caused by runoff.

Key words: non-point source pollution; runoff; first flush; retention; filtration; total phosphorous

非点源污染(non-point source pollution, NSP)指污染物在非特定地点形成并随降雨径流进入受纳水体所形成的污染, 具有形成面广、随机性大、不确定性强等特征, 对其进行管理或控制具有很大难度^[1-4]. 城市化进程会导致路面透水性降低、径流量增加、径流速度增大、冲刷效应增强^[5,6]. 在面源污染治理过程中, 城市水体的富营养化是国内很多城市急需解决的问题, 根据 Shindler 等^[7]的研究, 磷是控制富营养化的关键因子, 所以控制径流中的磷可以有效控制降雨径流对水体的污染.

道路雨水是城市面源污染的重要组成部分, 其污染程度受车流量、干期间隔等因素影响^[8,9], 目前主要通过蓄洪截流、滞留渗滤、人工湿地等工艺加以

处理^[10-15]. 雨水径流的截流技术可以削减洪峰, 减少初期径流的污染负荷^[16]; 渗滤技术能够采用不同填料和运行方式, 使其有针对性地去去除径流中不同污染物, 具有施工简便、去除效果好和运行成本低等特点^[5,6,17]. 这些技术在国外应用较多, 但多为单独工艺, 少有组合工艺^[18], 而类似技术在国内尚未得到充分研究, 仅在宝鸡、昆明等地有少量渗滤系统应用实例, 其主要去除的目标污染物分别为重金属、TN 等^[19].

收稿日期: 2010-10-24; 修订日期: 2010-12-13

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07313-004)

作者简介: 白瑶(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市面源污染防治技术, E-mail: whitethu04@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: jiane.zuo@tsinghua.edu.cn

本研究提出以磷为路面径流污染控制的关键因素,采用截流与渗滤组合工艺,设计一套分离初期与后期径流并将其分别导向污水管网和渗滤池的径流收集净化系统,探讨其对我国江南某地路面径流的处理效果,并对 2 场典型降雨形成的径流污染控制的结果进行了具体分析。

1 材料与方法

1.1 试验系统及其运行

试验路段位于江苏省无锡市江南大学校内某桥,汇水面共 504 m²,排水体制为雨污分流制,污水管网通向污水处理厂,雨水管网直接通入桥下自然水体。

雨水径流截流渗滤中试系统建设于路边绿地区内,由收集系统、截流池与渗滤池组成,平面布置如图 1 所示。路面径流经过雨水井、雨水管首先汇入截流池。截流池实际有效容积为 4.9 m³,用于储存初期径流。截流池储满水后,后期径流溢流进入渗滤池。渗滤池长 6 m,宽 6 m,深 1.2 m,底层与周边均采用防渗措施,避免地下水渗入,池底铺设集水管道及卵石,其上依次覆盖 0.4 m 无烟煤、0.4 m 石英砂,表层覆土并种植景天科耐旱植物。课题组前期研究表明所用填料对雨水径流中的磷能针对性吸附。渗滤出水直接排入自然水体。降雨结束后,截流池内储存的初期径流通过潜污泵打入污水管网,与污水一同流向污水厂进行处理。在系统周边布置 ISCO-674 型号雨量计用以监测降雨量,计数间隔为 5

min;在图 1 中①处管道内布设 ISCO-2150 型号流量计用以监测流量,读数间隔为 1 min。

径流截流渗滤中试系统建成后,除监测其对自然降雨径流的监测效果外,还利用周边自然水体模拟降雨径流,用于研究该系统在各种运行条件下对不同污染特征的降雨径流的处理效果。

1.2 采样及测试方法

自径流产生开始计时,在①处按照先密后疏的原则每隔 5~15 min 采集路面径流,在⑦、⑩处每隔 15 min 采集 200 mL 水样,降雨后分别按照径流形成过程中所测得的流量比例混合,作为截流池溢流水混合样(即渗滤池进水样)和渗滤池出水混合样。降雨结束后,在⑥处采集截流池混匀后出水水样作为截流池混合水样。

降雨结束后,立即取各水样 500 mL,用于测定 SS、COD、TN、TP 等指标,同时各剩余水样采用 0.45 μm 滤膜过滤,滤后水样用于测定可溶性总磷(dissolved total phosphorous, DTP)、PO₄³⁻及 NH₄⁺-N 等指标。各指标测定均使用国标方法^[20]:SS 采用 105℃ 下滤膜过滤烘干称重减量法,COD 采用重铬酸钾消解硫酸亚铁铵滴定法,TN 采用过硫酸钾消解 1:9 盐酸显色紫外分光光度法,TP、DTP 采用过硫酸钾消解孔雀石绿-磷钼杂多酸分光光度法,PO₄³⁻采用孔雀石绿-磷钼杂多酸分光光度法,NH₄⁺-N 采用水杨酸-次氯酸钠分光光度法。

2 结果与讨论

该雨水径流截流渗滤中试系统自 2010 年 7 月建成至 2010 年 11 月持续运行,共净化自然降雨 7 场,模拟降雨 4 场。本研究选择该系统模拟短时少量降雨和实际长时不均匀降雨这 2 种最典型的降雨情况下的运行情况。

2.1 系统模拟短时少量降雨情况下的运行效果

本试验模拟江南地区短时少量降雨,模拟试验路面面积 40 m²,喷洒水泵水量为 8 m³/h,共产生径流 4 m³,小于截流池有效容积 4.9 m³,所有产生的径流均被截流,无径流溢流入渗滤池。

将在①处所采集水样测得的各种污染物的浓度扣除模拟所用河水中各污染物的背景值得到实际径流冲刷作用在路面冲刷过程中所产生的各污染物浓度,并按照式(1)计算得到本次降雨径流中各污染物的次降雨径流平均浓度(event mean concentration, EMC),列于表 1 中。由于本次降雨径流全部贮存于截流池中,该 EMC 值即为截流池混合

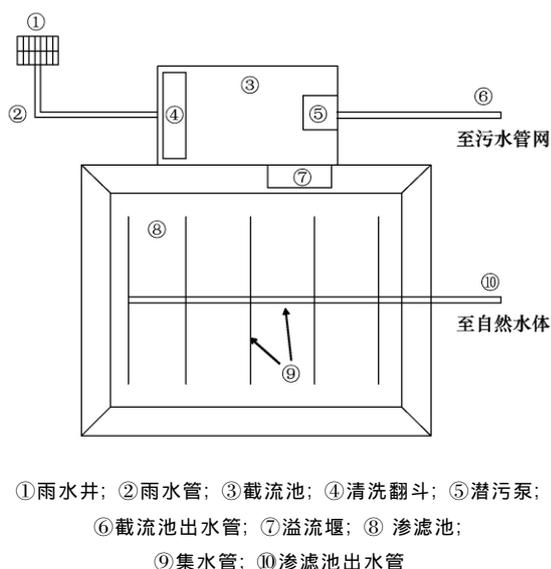


图 1 雨水径流截流渗滤中试系统及采样点示意

Fig. 1 Schematic diagram of the runoff retention and filtration pilot system

均匀后的出水水质.同时,分别计算本系统各环节对污染物浓度的去除率,同样列于表1.

$$EMC = \frac{m}{V} = \frac{\sum c_i Q_i}{\sum Q_i} \quad (1)$$

表1 模拟短时少量降雨情况下系统各环节水质及其对污染物浓度的去除效果

Table 1 Water quality and pollutants concentration removal rate of different steps under the simulated short rain

项目	SS	COD	TN	TP	DTP	PO ₄ ³⁻
径流 EMC 即截流池水质 /mg·L ⁻¹	488	91	2.63	0.38	0.01	(0.004)
渗滤池进水水质 /mg·L ⁻¹	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
渗滤池出水水质 /mg·L ⁻¹	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
截流池去除率 /%	100	100	100	100	100	100
渗滤池去除率 /%	0	0	0	0	0	0
系统总去除率 /%	100	100	100	100	100	100

由表1可知,虽然该场降雨历时较短,水量较小,但路面径流污染依旧较严重,径流中TN、TP浓度均超过或接近地表水V类水标准(TN ≤ 2.0 mg/L, TP ≤ 0.4 mg/L),尤其是SS浓度甚至已经超过污水综合排放二级标准(SS ≤ 200 mg/L),接近城市生活污水水平.分析这种现象,是因为路面在一定干期内累积

式中,EMC为污染物的次降雨径流平均浓度,mg/L; m为径流中污染物总量,mg; V为径流体积,L; c_i为样品中污染物的浓度,mg/L; Q_i为对应样品采样时刻的径流流量,L.

的污染物表层极易被降雨冲刷携带,虽然少量降雨的水量较小,但是表层污染物已经被包含在了这部分径流中,从而形成污染程度较严重的径流.

结合试验路段面积等参数,计算各环节污染物产生或被去除的污染总量、污染负荷及污染削减率,计算结果列于表2中.

表2 模拟短时少量降雨情况下系统的运行效果

Table 2 Operation results of the system under the simulated short rain

项目	SS	COD	TN	TP	DTP	PO ₄ ³⁻
污染物产生总量/g	1952	365	10.53	1.53	0.02	0.02
截流池去除量/g	1952	365	10.53	1.53	0.02	0.02
渗滤池去除量/g	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
排入水体总量/g	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
污染物产生负荷/mg·m ⁻²	48800	9121	263.31	38.19	0.47	0.50
截流池去除负荷/mg·m ⁻²	48800	9121	263.31	38.19	0.47	0.50
渗滤池去除负荷/mg·m ⁻²	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
排入水体负荷/mg·m ⁻²	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
截流池污染去除率/%	100	100	100	100	100	100
渗滤池污染去除率/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
系统总污染去除率/%	100	100	100	100	100	100

由表2中数据可见,在本次模拟短时少量降雨情况下,径流中SS、COD、TN、TP、DTP、PO₄³⁻等各种污染物形成的污染负荷分别为48800、9121、263、38.19、0.47及0.50 mg/m².由于所有径流均被截流池截流,并在降雨结束后泵入污水厂处理,所以表2中与渗滤池相关的进水污染物浓度、污染物总量、负荷削减均为零,也没有任何污染直接排放进入自然水体,即意味着该系统对此类降雨径流产生的污染负荷削减程度为100%,非常有效地削减了面源污染.

2.2 系统在长时不均匀降雨情况下的运行效果

试验当地每年夏季7、8月多降雨,且易出现单次降雨量较大、延时较长的降雨,在降雨期间,降雨

强度会反复变化,径流的产生量、冲刷强度和污染物浓度也会随之出现相应变化.本试验监测了2010年7月无锡市的一场实际降雨,当日降雨从11:31开始,于12:55结束,历时84 min,总降雨量41.2 mm,形成径流23.40 m³.降雨过程中,降雨量及径流流量随降雨历时的变化如图2所示,沿降雨历时所采集的各路面径流样品的水质变化如图3所示.

由图2可知,本次降雨在第16 min和第42 min处分别出现降雨量峰值,径流流量对雨量的响应滞后约2~5 min.产生的径流先汇入截流池,在储满截流池后溢流入渗滤池,经渗滤池过滤、吸附后进入自然水体.截流池共截流该次降雨最初15 min的径流,约为最初5 mm的降雨.

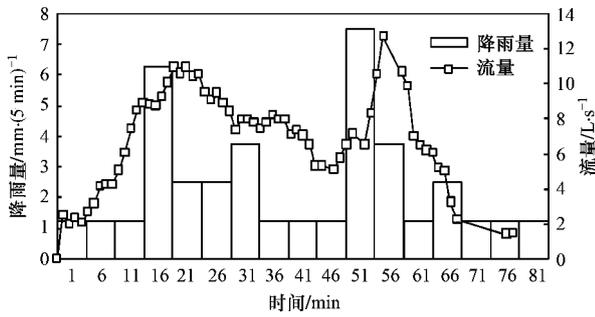


图2 降雨量和径流流量随降雨历时的变化

Fig.2 Variation of rainfall and runoff quantity with time

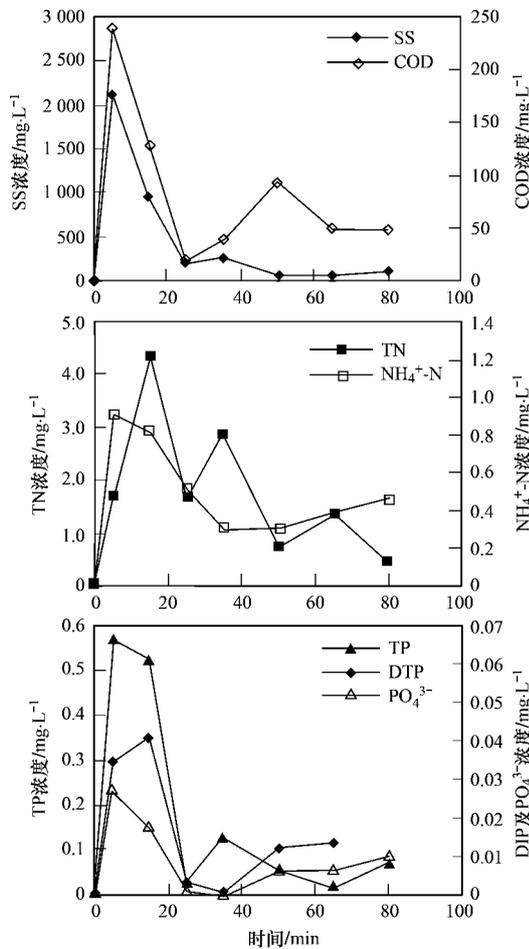


图3 路面径流水质随降雨历时的变化

Fig.3 Variation of runoff qualities with time

从图3中可以看出,本次径流中各污染物的浓度均表现出明显的初期污染严重、后期污染减轻的特征.径流产生后,各污染物浓度快速上升,在前20 min内达到峰值,然后随降雨历时逐渐下降,自第20 min至降雨结束时,各污染物浓度基本稳定.但还可观察到,在第40~60 min之间,由于降雨量短时骤

然增大,导致各污染物浓度出现了小幅波动.

本次降雨初期径流的污染程度非常高,按照地表水环境质量标准分类,其污染物浓度已远远超过地表水V类水的标准限值($COD \leq 40 \text{ mg/L}$, $TN \leq 2.0 \text{ mg/L}$, $TP \leq 0.4 \text{ mg/L}$),尤其是SS、COD等污染物浓度已经超过污水综合排放二级标准($SS \leq 200 \text{ mg/L}$, $COD \leq 150 \text{ mg/L}$),接近城市生活污水水平,这样的水质很难通过简单处理得到改善.而后期径流中,除SS外,其它污染物浓度均已满足城镇污水处理厂一级A排放标准($SS \leq 10 \text{ mg/L}$, $COD \leq 50 \text{ mg/L}$, $TN \leq 15 \text{ mg/L}$, $NH_4^+-N \leq 15 \text{ mg/L}$, $TP \leq 0.5 \text{ mg/L}$),尤其是易引起水体富营养化的TN、TP等污染物均已能达到地表水环境质量II类水标准,污染程度较轻,所以仅需有针对性地采用简单处理方法继续改善SS、TN、TP等指标即可.

分析初期径流污染的形成,是由于地表污染物在晴天累积,而在雨天被冲刷入排水系统,在降雨初始形成的地表径流会冲刷携带地表大量易迁移的污染物,随着冲刷作用的持续,下垫面上残留污染物减少,其径流携带的污染物也就减少,即使此时降雨量再次增大,冲刷作用增强,也不会再导致径流水质的大幅度变化.关于初期径流的界定,有人认为,最初2~3 mm的降雨形成的径流为污染程度最严重的初期径流,也有人认为在一定下垫面情况下,最初10 min的径流为初期径流^[21].

以径流中各污染物量的累计频率对流量累计频率作图,如图4所示.可以发现,所有污染物均有显著初期径流的特征.中试系统的截流池可截流最初

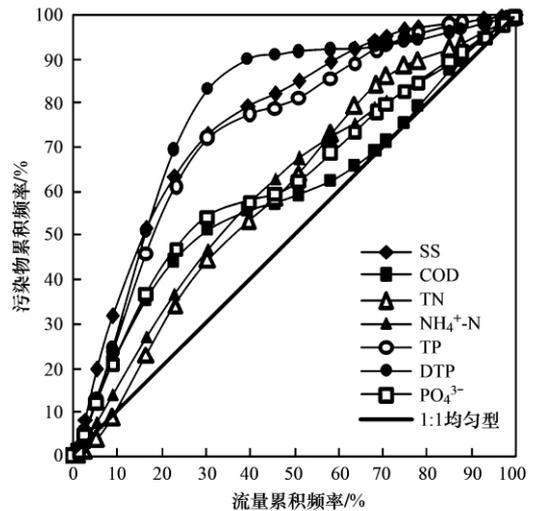


图4 污染物累积频率与流量累积频率的关系

Fig.4 Relationship between the cumulative frequencies of pollutants and flow volume

4.9 m³ 的水量,约占本次径流总流量的 25%,由图 4 可知,这部分径流中包含的 SS、COD、TN、NH₄⁺-N、TP、DTP 及 PO₄³⁻ 各类污染物的比例均较高,分别是 66.95%、47.10%、38.06%、40.32%、65.46%、75.00% 和 50.10%。其中,SS、TP 及 DTP 的初期污染效应最为明显。推测这是由于含磷污染物大部分以固态附着或可溶态吸附在

SS 颗粒上,这与 Gan 等^[22] 的研究结果相同。由此可知,保证 SS 的去除率是去除含磷污染物的有效途径。

依据式(1)计算本次降雨所产生径流中各污染物的 EMC,与截流池出水水质、渗滤池进水水质、渗滤池出水水质及系统各环节对污染物浓度的去除率一同列于表 3 中。

表 3 实际不均匀降雨情况下系统各环节水质及其对污染物浓度的去除效果

Table 3 Water quality and pollutants concentration removal rate in different steps of the system under actual uneven rainfall

项目	SS	COD	TN	TP	DTP	PO ₄ ³⁻
截流池进水 EMC/mg·L ⁻¹	550	96	2.74	0.23	0.02	0.01
截流池混合水质/mg·L ⁻¹	2219	275	2.90	0.70	0.05	0.03
渗滤池进水水质/mg·L ⁻¹	108	48	2.69	0.11	0.01	0.01
渗滤池出水水质/mg·L ⁻¹	18	46	2.68	0.04	0.01	(0.002)
截流池去除率/%	80.4	49.6	1.6	53.6	60.2	35.1
渗滤池去除率/%	16.4	2.1	0.5	27.5	4.5	46.3
系统总去除率/%	96.7	51.7	2.1	81.1	64.7	81.3

从表 3 中可知,该系统对 SS、TP、DTP 及 PO₄³⁻ 的去除率超过 60%,去除效果较好,而对 COD 和 TN 的去除效果有限。其中,截流池对 SS 和 DTP 的贡献较大,剩余污染物的去除则主要依靠渗滤池。此结果再次证明截流池主要针对和 SS 相关性较好的污染物进行去除,渗滤池内吸附填料则主要针对可溶性污染物如 PO₄³⁻ 等进行去除。系统对 COD 和 TN 的浓度的总去除率较低,尤其是对 TN 浓度的去除率不足 10%。分析该结果,是因为该系统仅靠沉淀、过滤、吸附等物理过程去除相应污染物,而没有生物过程降解 COD 和 TN,所以这 2 种污染物的去除效率不够理想。韩芸等^[19] 在宝鸡市金渭湖边设计了岸边渗滤池对雨水径流进行处理,其对 SS、TN 和 TP 浓度的去除率分别为 81.1%、27.0% 和 41.7%,

与本试验结果相比可知,一般渗滤池对 SS 的去除效果均较好,在总磷方面,本试验中针对磷的特异性吸附材料则远优于普通砂渗滤池的效果。但两试验均表明,渗滤池对径流中 TN 的处理效果不甚理想。侯立柱等^[23] 采用滤柱试验研究发现,增加无砂混凝土及中粉质壤土可提高系统对 TN 的去除率,使 TN 出水浓度 < 0.5 mg/L,为渗滤池的进一步改进提供了依据。

计算污染物在截流、渗滤环节分别被去除和最终排入水体的污染物总量,并分析截流、渗滤各环节和总系统对污染负荷的削减效果,结果如表 4 所示。根据表 4 中的数据,计算各类污染物被截流池、渗滤池分别去除以及最终排入水体的相对比例,结果如图 5 所示。

表 4 实际不均匀降雨情况下系统的运行效果

Table 4 Operation results of the system under the actual uneven rainfall

项目	SS	COD	TN	TP	DTP	PO ₄ ³⁻
污染物产生总量/g	12 874	2 236	64.03	5.38	0.35	0.27
截流池去除量/g	10 875	1 345	14.20	3.41	0.24	0.13
渗滤池去除量/g	1 666	37	0.28	1.17	0.01	0.10
排入水体总量/g	333	854	49.55	0.80	0.10	0.04
污染物产生负荷/mg·m ⁻²	25 544	4 437	127.04	10.68	0.69	0.53
截流池去除负荷/mg·m ⁻²	21 578	2 670	28.18	6.76	0.47	0.26
渗滤池去除负荷/mg·m ⁻²	3 305	73	0.55	2.32	0.02	0.19
排入水体负荷/mg·m ⁻²	661	1 694	98.32	1.59	0.19	0.08
截流池去除率/%	84.5	60.2	22.2	63.3	68.5	48.7
渗滤池去除率/%	12.9	1.7	0.4	21.8	3.6	36.6
系统总去除率/%	97.4	61.8	22.6	85.1	72.1	85.2

从表 4 和图 5 可知,雨水径流截流渗滤中试系统对雨水径流中 SS、COD、TN、TP、DTP 和 PO₄³⁻ 的

负荷去除率分别达到 97.4%、61.8%、22.6%、85.1%、72.1% 和 85.2%。除 PO₄³⁻ 的去除表现为渗

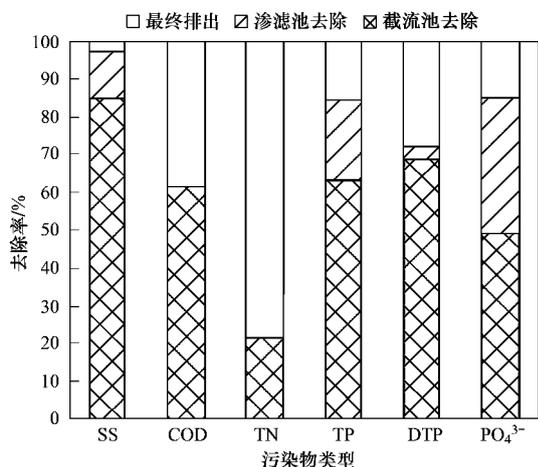


图5 实际不均匀降雨情况下系统各环节对
污染物负荷的去除效果

Fig.5 Reduce effect of the pollution loading
under the actual uneven rainfall

滤池去除比例大于截流池以外,其余污染物主要由截流池去除。

综合分析,截流池的效果主要体现在对前期污染物的截流,通过储存初期高污染程度的径流,并在降雨结束后泵入污水厂按照污水处理流程处理,避免了这部分污染物直接排入自然水体,大大削减了降雨引起的面源污染负荷。但由于截流池主要截流的为大颗粒易沉淀物质,对COD、TN、TP等污染物的去除也主要限于吸附在颗粒上的部分,而多数细微颗粒及可溶性污染物依旧会存在于截流池的溢流水中。渗滤池的过滤作用可以去除直径更细小的SS颗粒,吸附层更可以针对 PO_4^{3-} 进行去除,使其降至尽可能低的水平,保护水体不富营养化,据Singhal等^[24]的研究表示,多数渗滤池对粒径 $>38\mu m$ 的颗粒物的去除率可达到90%以上。虽然渗滤池对COD、TN等指标没有明显改善效果,但因其出水水平并不很高,且COD并不是富营养化的关键控制因子,属于可接受范围。

2.3 系统多次运行后的综合效果分析

本系统自2010年7月建成至2010年11月,共净化自然降雨7场,模拟降雨4场,这些降雨涵盖了短时少量降雨、长时低强度降雨、短时暴雨和长时不均匀降雨等多种降雨类型。将各类降雨情况下监测的路面径流EMC和系统对污染物浓度的总去除率进行平均,可知该汇水路面径流中SS、COD、TN和TP等主要污染物的平均浓度分别为361、135、7.88和0.62 mg/L,系统对径流中SS、COD、TN和

TP浓度的平均去除率分别为98.6%、65.4%、55.1%和92.6%。11场降雨总降雨量共600 mm,约相当于无锡市半年的降雨量。按照路面径流系数0.9计算该系统在4个月运行期间实际削减的面源污染负荷,如表5中数据所示。可见,该中试系统可对路面雨水径流进行很好的净化,大幅削减城市面源污染。

表5 系统运行期间对面源污染的实际削减效果

Table 5 Reduce effect of non-point source pollution
by the system during operation

项目	SS	COD	TN	TP
污染物总量削减/kg	7 021	2 411	119	16
污染物负荷削减/ $g \cdot m^{-2}$	13 930	4 785	235	31

3 结论

(1) 无锡地区降雨径流污染程度严重,并表现出明显的初期径流效应。对一次实际降雨形成的径流,截流池所截流的前25%水量中含有的SS、COD、TN、 NH_4^+-N 、TP、DTP、 PO_4^{3-} 等污染物负荷占总负荷的比例分别是67.0%、47.1%、38.1%、40.3%、65.5%、75.0%和50.1%。

(2) 在模拟短时少量降雨情况下,所有产生径流均被雨水径流截流渗滤系统截流,系统对所有污染物的浓度、总量和负荷的去除率均为100%。

(3) 在实际不均匀降雨情况下,系统对径流中SS、COD、TN、TP、DTP及 PO_4^{3-} 等污染物浓度的总去除率分别是96.7%、51.7%、2.1%、81.2%、64.7%和81.3%,对各污染物负荷的去除率分别为97.4%、61.8%、22.6%、85.1%、72.1%和85.2%。其中,截流池共截流 $4.9 m^3$ 初期径流,主要去除SS和DTP;渗滤池共处理水量 $15.89 m^3$,主要去除TP和 PO_4^{3-} ;整个系统可有效去除降雨径流中各种形态的磷。

(4) 通过4个月的运行数据可得该系统对径流中SS、COD、TN和TP浓度的平均去除率分别为98.6%、65.4%、55.1%和92.6%,削减因面源污染而进入水体的SS、COD、TN和TP等污染物总量分别为7 021、2 411、119和16 kg。

参考文献:

- [1] Field R, Pitt R. Urban storm-induced discharge impact [J]. Water Environmental Technology, 1990, 3(6): 47-49.
- [2] Maniquiz M C, Young L S, Hyung K L. Long-term monitoring of infiltration trench for nonpoint source pollution control [J]. Water Air and Soil Pollution, 2010, 212(1-4): 13-26.

- [3] US EPA. Preliminary data summary of urban stormwater best management practices [R]. Washington, DC: Office of Water, 1999.
- [4] 张红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. 水资源保护, 2010, 26(3): 87-90.
- [5] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响[J]. 环境科学, 2004, 25(6): 32-39.
- [6] Wei Q S, Zhu G F, Wu P, *et al.* Distributions of typical contaminant species in urban short-term storm runoff and their fates during rain events: A case of Xiamen City [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(4): 533-539.
- [7] Shindler D W, Armstrong F A J, Holmgren S K. Eutrophication of lake 227, experimental lakes area northwestern Ontario, by Addition of phosphate and nitrate [J]. *Fisheries Research Board of Canada*, 1971, 28(11): 1763-1782.
- [8] 边博. 前期晴天时间对城市降雨径流污染水质的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3522-3526.
- [9] Kus B, Kandasamy J. Low-cost filtration system to treat first-flush stormwater [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2009, 9(5-6): 347-355.
- [10] Wilson M A, Mohseni O M, Gulliver J S, *et al.* Assessment of hydrodynamic separators for storm-water treatment [J]. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, 2009, 135(5): 383-392.
- [11] Hatt B E, Fletcher T D, Deletic A. Pollutant removal performance of field-scale stormwater biofiltration systems [J]. *Water Science and Technology*, 2009, 59(8): 1567-1576.
- [12] Chavan P V, Dennett K E, Marchand E A. Behavior of pilot-scale constructed wetlands in removing nutrients and sediments under varying environmental conditions [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2008, 192(1-4): 239-250.
- [13] Bratieres K, Fletcher T D, Deletic A, *et al.* Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: A large-scale design optimisation study [J]. *Water Research*, 2008, 42(14): 3930-3940.
- [14] Jung Y J, Stenstrom M K, Jung D I, *et al.* National pilot projects for management of diffuse pollution in Korea [J]. *Desalination*, 2008, 226(1-3): 97-105.
- [15] Murakami M, Sato N, Anegawa A, *et al.* Multiple evaluations of the removal of pollutants in road runoff by soil infiltration [J]. *Water Research*, 2008, 42(10-11): 2745-2755.
- [16] Hunt W F, Smith J T, Jadlocki S J, *et al.* Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban Charlotte, NC [J]. *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, 2008, 134(5): 403-408.
- [17] Davis B S, Birch G F. Catchment-wide assessment of the cost-effectiveness of stormwater remediation measures in urban areas [J]. *Environmental Science and Policy*, 2009, 12(1): 84-91.
- [18] Scholz M, Yazdi S K. Treatment of road runoff by a combined storm water treatment: retention and infiltration system [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2009, 198(1-4): 55-64.
- [19] 韩芸, 李斌, 彭党聪, 等. 宝鸡市雨水径流岸边渗滤系统设计与应用[J]. 给水排水, 2009, 35(4): 36-39.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社. 2002.
- [21] Herrmann T, Schmida U. Rainwater utilisation in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects [J]. *Urban Water*, 1999, 1(4): 307-316.
- [22] Gan H Y, Zhuo M N, Li D Q. 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.
- [23] 侯立柱, 冯绍元, 丁跃元, 等. 多层渗滤介质系统对城市雨水径流氮磷污染物的净化作用[J]. 环境科学学报, 2009, 29(5): 961-967.
- [24] Singhal N, Elefsiniotis T, Weeraratne N, *et al.* Sediment retention by alternative filtration media configurations in stormwater treatment [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2008, 187(1-4): 173-180.