

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.11.016

浅基质层干植草沟对道路径流中 PAHs 的去除效果

张庭秀, 李 田

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要: 上海市道路径流中的多环芳烃(PAHs)平均浓度达到3 996 ng/L,与其他国家相比污染较严重。以前期已稳定运行1年的浅基质层干植草沟中试系统为处理设施进行现场试验,研究设施对道路径流中美国EPA提出的16种优先控制PAHs的控制效果及去除机制。结果表明,监测期内设施出水PAHs浓度显著低于进水浓度($p < 0.05$), $\Sigma 16\text{PAHs}$ 和具有致癌性或可疑致癌性的 $\Sigma 6\text{PAHs}$ 的出水浓度范围分别为172.40~365.05 ng/L和9.70~99.97 ng/L。前置沉淀池对PAHs的去除效果不佳。干植草沟设施对高分子质量PAHs的去除率与TSS呈显著正相关,主要伴随基质对TSS的过滤、拦截而被去除;低分子质量PAHs主要依靠吸附作用被去除,水力负荷的升高影响其去除效果。干植草沟设施对苯并[a]芘的去除率达到98.00%,出水浓度低于《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)规定的限值(30 ng/L),达标率为100%,干植草沟即使基质层较浅也可有效控制路面径流对受纳水体的PAHs污染。

关键词: 道路径流; 多环芳烃; 干植草沟; 低影响开发; 海绵城市建设

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)11-0096-08

Removal Efficiency of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Road Runoff by Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer

ZHANG Ting-xiu, LI Tian

(School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The average concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road runoff in Shanghai is 3 996 ng/L, which is higher than that in other countries. A field test was carried out in a pilot-scale dry grass swale system with shallow substrate layer which had been operated stably for one year, and the control performance and removal mechanism of 16 kinds of priority controlled PAHs proposed by US EPA were explored. During the monitoring period, PAHs concentration in the effluent of the facility was significantly lower than that in the influent ($p < 0.05$), and concentrations of $\Sigma 16\text{PAHs}$ and $\Sigma 6\text{PAHs}$ (carcinogenicity or suspected carcinogenicity) in the effluent were 172.40–365.05 ng/L and 9.70–99.97 ng/L, respectively. PAHs in the road runoff could not be effectively removed by the pre-sedimentation tank. The removal rate of high molecular weight PAHs was positively correlated with the removal rate of TSS, indicating that the removal of these PAHs mainly depended on filtration and

interception of TSS by substrate. Low molecular weight PAHs were mainly removed by adsorption, and the removal performance was affected by the increase of hydraulic load. The removal rate of benzo(a)pyrene was 98.00%, and its concentration in the effluent was lower than the limitation (30 ng/L) in *Integrated Wastewater Discharge Standard* (GB 8978 - 1996) with compliance rate of 100%, indicating that the dry grass swale with shallow substrate layer could effectively control the PAHs pollution in road runoff to receiving water body.

Key words: road runoff; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); dry grass swale; low impact development; sponge city development

随着城市化进程的不断推进,我国城市地表径流污染问题日益严峻。地表积累的大量污染物在降雨的淋溶和冲刷作用下进入城市水体,成为水体污染的重要来源,加剧了城市水环境质量的恶化。多环芳烃(PAHs)是具有两个或两个以上苯环的一类有机化合物的总称,是城市地表降雨径流中常见的污染物之一。由于部分 PAHs 对生物具有致癌、致畸和致突变作用,且其结构稳定、水溶性低、难以被生物降解,美国国家环境保护局(EPA)1976 年将其 16 种 PAHs 确定为优先控制污染物,我国也将苯并[a]芘(BaP)列入饮用水、地表水等环境质量标准中。径流中 PAHs 的含量通常在 $10 \sim 10^3$ ng/L 数量级之间,且以道路径流的污染最为严重^[1]。美国洛杉矶高速公路路面径流中 16 种 PAHs 总浓度范围为 $23.6 \sim 1\,880$ ng/L^[2],法国巴黎道路径流中 PAHs 的检测浓度为 $677 \sim 6\,477$ ng/L^[3]。国内研究人员对我国主要城市地表径流中 PAHs 污染状况的调查发现^[4-5],我国城市地表径流中的 PAHs 以 4 ~ 6 环的颗粒相为主,占比约为 80%,与其他国家相比,我国主要城市雨水及城市地表径流中的 PAHs 污染情况严重。已有研究表明,水体生态系统中大约 14% ~ 36% 的 PAHs 负荷来自于城市地表径流^[6]。因此,控制城市地表径流的 PAHs 污染具有十分重要的意义。

干植草沟设施对道路等径流中污染物具有良好的水文、水质控制效果。相较于营养物质和悬浮物,对植草沟控制道路径流中 PAHs 污染的研究仍然少见,已有的研究通常是以生物滞留设施为评价对象^[7]。上海地区地形平坦、地下水位高,干植草沟设施底部由于距离地下水位太近,其出水不能下渗;在雨季,河道水位上涨易经排水管倒灌进入干植草沟设施而造成设施失效,因此应用于上海的干植草沟基质深度一般较浅,其运行效果不宜简单地参考

生物滞留设施,浅基质层干植草沟对 PAHs 的实际控制效果值得关注。鉴于此,笔者对已稳定运行 1 年的浅基质层干植草沟中试系统进行现场试验。在上海地区实际降雨条件下,通过监测上海市内环高架路面径流中 PAHs 的含量以及设施出水水质,评价浅基质层干植草沟对实际道路径流中 PAHs 的控制效果,探讨影响 PAHs 去除的因素和机制,以期为控制城市径流中的 PAHs 污染提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设施

浅基质层干植草沟中试系统于 2019 年建成,位于上海内环高架与密云路交界处,用于收集处理高架道路径流。植草沟系统由前置沉淀池和干植草沟两部分组成。前置沉淀池尺寸为 $1.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ (长×宽×高),可有效缓解进水流量的波动,末端设有 60° 三角堰。干植草沟外壁尺寸为 $8 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ (长×宽×高),汇水面积约为 200 m^2 ,从上至下依次为蓄水层、植物、基质层和砾石排水层,底部设有穿孔排水管,并设置防渗层以防止出水下渗。植物为狗牙根草皮。基质层厚度为 30 cm,由建筑砂、表层土、给水厂污泥和发酵木屑(质量比为 65 : 25 : 7 : 3)混合组成;排水层厚 30 cm,上方铺设透水土工布及 5 cm 中砂层,池底的穿孔排水管于出口处上弯 30 cm,在排水层形成饱水区(如图 1 所示)。

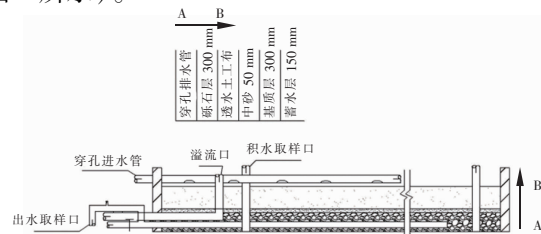


图 1 植草沟设施主体剖面示意

Fig. 1 Sectional view of dry grass swale

高架道路径流经雨落管收集后进入前置沉淀池,然后通过植草沟上方的穿孔管流入植草沟;设施出水经底部穿孔排水管收集,通过出水井排入市政雨水管道。前置沉淀池和出水计量井设有三角堰与超声波液位计,配套的数据记录仪可对设施的进、出水流量进行连续监测,每5 min记录一次数据。在距设施约100 m处屋顶安装SL3-A翻斗式自记雨量计,对降雨量变化过程进行实时监测。

1.2 样品采集与检测

水质样品采集与分析:在高架道路水落管处收集路面径流,在前置沉淀池三角堰出口收集植草沟进水样品,在出水计量井三角堰口处收集出水样品。在道路产生径流、设施产生进水和底部产生出水的开始阶段,根据降雨强度大小,每隔5~20 min采集一个样品,并记录采样的起止时间。样品采集后立即送实验室,以累积流量为权重配制混合样以获得进出水的事件平均浓度(EMC)。水样避光保存在4℃冰箱中,并于48 h内完成水质分析。PAHs分析方法参照《水质 PAHs 的测定 液液萃取和固相萃取 高效液相色谱法》(HJ 478—2009)。使用高效液相色谱仪(Shimadzu LC-20A)测定16种PAHs,即萘(NaP)、二氢苊(AcNy)、芴(Fl)、苊(AcNe)、菲(PhA)、蒽(An)、荧蒽(FLA)、芘(Py)、苯并[a]蒽(BaA)、蒽(Chy)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DBahA)、茚并[1,2,3-cd]芘(IP)、苯并[g,h,i]芘(BghiP)。

基质样品采集与分析:穿孔管布水的均匀性受降雨强度变化影响,设施前后段基质接收的进水量不完全一致,因此在设施前后段分设采样点1[#]、2[#],其中1[#]点在距设施前壁1 m的池中轴线处,2[#]点在距设施后壁1 m的池中轴线处,分别对1[#]、2[#]采样点0~10、10~20、20~30 cm基质层进行分层取样。样品采集后冷冻干燥,研磨后过60目筛,参照《土壤和沉积物 多环芳烃的测定 高效液相色谱法》(HJ 784—2016)进行PAHs的测定和分析。

常规水质检测指标包括总悬浮固体(TSS)等,采用国家标准方法检测。

1.3 质量控制

PAHs分析的质量控制采用加标回收分析和平行样分析,16种PAHs混合标准品由美国o2si公司提供。在样品萃取前加入十氟联苯(纯度99%),用

于跟踪样品前处理的回收率(50%~130%)。以蒸馏水进行空白试验,16种目标PAHs均未检出,分析过程无污染。样品中PAHs的平均加标回收率范围为69.7%~105%,空白水样加标试验中各组分的回收率为70%~110%,满足痕量PAHs的分析要求。同一水样的平行样品($n=3$)中16种PAHs具有较好的重现性,相对标准偏差小于20%,满足质量控制标准。

1.4 数据处理与分析

根据式(1)计算每场降雨事件的平均水力负荷(HLR, cm/h),以反映不同降雨事件进水与基质的平均空床接触时间。以设施每单位排水面积的污染物质量(mg/m^2)为统一单位,由式(2)和式(3)对整个监测期内进、出设施的污染物质量负荷(L_{in} 、 L_{out} , mg/m^2)进行计算^[8]。

$$\text{HLR} = \frac{V_0}{10 \times S \times t} \quad (1)$$

$$L_{\text{in}} = \frac{M_{\text{in}} \times P}{A \times D} \quad (2)$$

$$L_{\text{out}} = \frac{M_{\text{out}} \times P}{A \times D} \quad (3)$$

式中: V_0 为进水径流总量, L ; S 为设施的横截面积,取20 m^2 ; t 为进水时间,h; M_{in} 为设施在8场降雨事件中输入的PAHs总质量,mg; M_{out} 为设施在8场降雨事件中输出的PAHs总质量,mg; P 为上海市同期平均降雨量,约595 mm; A 为场地排水面积,取200 m^2 ; D 为监测期内8场降雨事件的雨量之和,约272 mm。

利用IBM SPSS 20对路面径流以及设施进、出水各污染物的EMC均值进行正态分布检验以及显著性和相关性分析。在0.05水平下,所有数据符合正态分布,但部分数据方差不齐,故采用单因素方差分析中的Games-Howell方法进行显著性分析;相关性用皮尔逊相关系数(r)表征。

2 结果与讨论

2.1 监测降雨事件

在2020年6月—8月监测期内,采集到完整的进、出水过程样的降雨事件共有8场,其中,小雨(<10.0 mm)1场、中雨(10.0~24.9 mm)4场、大雨(25.0~49.9 mm)1场、暴雨(50.0~99.9 mm)2场,8场降雨事件的降雨特性见表1。雨量不超过8 mm的降雨事件中设施通常不产生出流。

表1 监测降雨事件的降雨特征

Tab.1 Characteristics of monitored rainfall events

项 目	降雨量/ mm	降雨历 时/h	降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	前期晴天 数/d
6月12日	22.6	2.4	9.4	3.1
6月15日	57.9	6.7	8.6	2.3
6月21日	9.1	7.3	1.2	2.7
7月2日	20.5	6.1	3.4	3.2
7月28日	47.9	1.4	34.2	10.9
8月4日	74.3	10.6	7.0	7.2
8月10日	22.9	5.6	4.1	5.2
8月26日	16.4	2.5	6.6	15.5
平均值	34.0	5.3	9.3	6.3
中值	22.8	5.9	6.8	4.2

2.2 干植草沟系统对PAHs的去除效果

监测期内8场降雨事件的路面径流以及干植草沟设施进、出水中16种PAHs的EMC均值如表2所示。

表2 各监测样品中PAHs的平均浓度

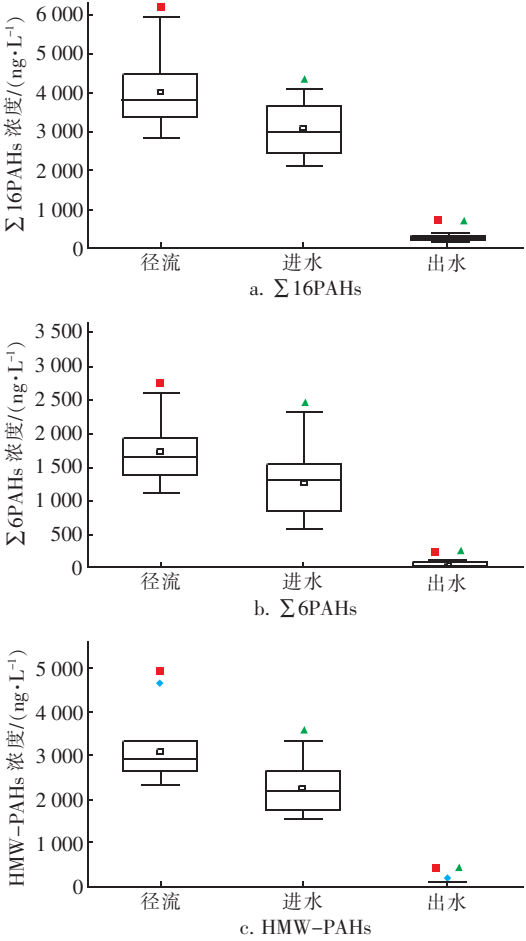
Tab.2 Average concentration of pollutants in different water samples

项 目		平均浓度/(ng · L ⁻¹)			去除率/%
		路面径流	设施进水	设施出水	
2环	NaP	143	135	49	63.70
3环	AcNe	67	124	26	79.03
	Fl	261	196	34	82.65
	AcNy	127	56	23	58.93
	PhA	213	211	17	91.94
	An	55	52	25	51.92
4环	FlA	409	289	13	95.50
	Py	406	296	8	97.30
	Chy	308	147	3	97.96
	BaA	292	153	n. d.	—
5环	BbF	628	448	15	96.65
	BkF	160	193	14	92.75
	BaP	373	300	6	98.00
	DBahA	75	58	n. d.	—
6环	IP	174	139	8	94.24
	BghiP	307	251	11	95.62
LMW-PAHs		866	774	174	77.52
HMW-PAHs		3 130	2 274	78	96.57
Σ6PAHs		1 702	1 291	43	96.67
Σ16PAHs		3 996	3 048	252	91.73

注: n. d. 表示未检出;LMW-PAHs指2环和3环PAHs;HMW-PAHs指4~6环PAHs;Σ6PAHs指BaA、BbF、BkF、BaP、DBahA、IP这6种具有致癌性或可疑致癌性的PAHs组分。

BaA和DBahA在8次试验的出水中均未检出,根据《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002),统计污染总量时以0计。高架路面径流中Σ16PAHs的EMC均值为3 996 ng/L,4~6环的高分子质量PAHs(HMW-PAHs)是PAHs的主要成分,占总PAHs的78%以上,与边璐^[9]等人的研究结果一致。其中,占比最高的单个PAHs为BbF(15.7%),其次为FlA和Py,分别占总PAHs的10.24%和10.16%,表明降雨径流中的PAHs主要来自于高温燃烧源^[10]。在高负荷交通流量下,机动车汽油和柴油的不完全燃烧是径流中PAHs的主要来源之一^[11]。具有明确或潜在致癌性的6种PAHs的平均浓度高达1 702 ng/L,是国外主要城市道路径流监测结果的4~10倍^[2],对自然环境和人类健康均具有很大威胁,其处理效果更是值得关注。

8场降雨事件的路面径流以及设施进、出水PAHs的EMC浓度分布见图2,其中,“■”表示径流和出水之间存在显著差异($p < 0.05$),“▲”表示进水与出水之间存在显著差异($p < 0.05$)。



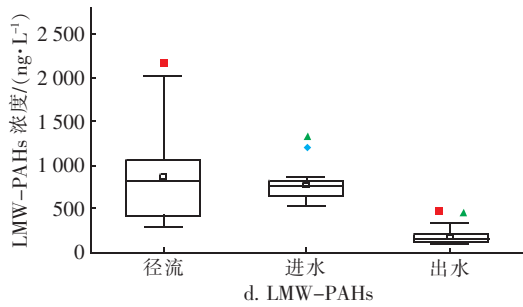


图2 干植草沟系统不同类型水样中PAHs的EMC分布
Fig.2 EMC of PAHs in road runoff, influent and effluent of the dry grass swale system

由图2可知,经干植草沟系统处理后,出水PAHs浓度显著低于进水浓度($p < 0.05$), $\Sigma 16\text{PAHs}$ 和 $\Sigma 6\text{PAHs}$ 出水浓度范围分别为172.40~365.05 ng/L和9.70~99.97 ng/L。DiBlasi等人^[12]在美国马里兰州大学校园内进行现场试验,结果表明,经生物滞留设施处理后PAHs出水浓度范围为57~370 ng/L,总浓度降低31%~99%。本试验中设施基质层较浅,厚度明显小于一般生物滞留设施,对高架路面径流中 $\Sigma 16\text{PAHs}$ 和具有明确致癌性的 $\Sigma 6\text{PAHs}$ 的去除率分别达到91.73%和96.67%,呈现出良好的去除效果。设施出水以LMW-PAHs为主,占出水总PAHs的60.87%~81.13%,对HMW-PAHs的去除率普遍高于LMW-PAHs,与Boving等人^[13]的现场试验结果相同。

径流在进入设施之前首先经过前置沉淀池,以去除部分较大的悬浮颗粒物。经过前置沉淀池后 $\Sigma 16\text{PAHs}$ 平均浓度相比路面径流下降948 ng/L,平均去除率约为23.72%;而前置沉淀池对TSS的平均去除率为29.35%(TSS浓度由367.13 mg/L降至259.38 mg/L)。前置沉淀池进、出水的PAHs浓度不存在显著性差异($p > 0.05$),而出水TSS浓度显著降低($p < 0.05$),原因在于沉淀池去除的悬浮物粒径较大,而路面积累的PAHs主要吸附于粒径为100~250 μm 的小颗粒上^[14],且粒径越小,表面积越大,越易富集PAHs^[15],因此预沉淀对PAHs等有机物的去除效果较差。

在干植草沟系统中,基质层是决定净化效果的关键。对设施前、后段不同深度处的基质样品的检测结果发现(见图3),PAHs主要被截留于基质层上部0~10 cm,含量随着基质层深度的增加而降低,上部10 cm区域中的 $\Sigma 16\text{PAHs}$ 含量(2.58~3.64

$\mu\text{g/g}$)比下部区域(0.57~0.65 $\mu\text{g/g}$)高出近一个数量级。本设施在植草沟上方铺设了穿孔管实行沿程进水,布水相对均匀,前段由于在小降雨量事件下接收了相对较多的进水次数,基质中截留的PAHs稍高于后段,但PAHs的总体纵向分布和组成特征与设施前段并无差别。基质内残留的PAHs中有90.69%~92.57%属于HMW-PAHs,普遍分布于顶部10 cm基质中。而以2环萘(NaP)为代表的LMW-PAHs在基质层底部含量有所上升,这可能与本身的理化性质有关:低环数的PAHs因溶解度高、渗透势大而更容易向下迁移^[16],进而随时间降解或淋出。DiBlasi等^[12]采集生物滞留基质表层至40~50 cm深度的样品进行分析,结果显示,被截获的PAHs在径流入口附近的土壤介质中仅垂直传播了数厘米,因此,从PAHs去除角度来看,干植草沟采用较浅基质层的设计对运行效果没有影响。

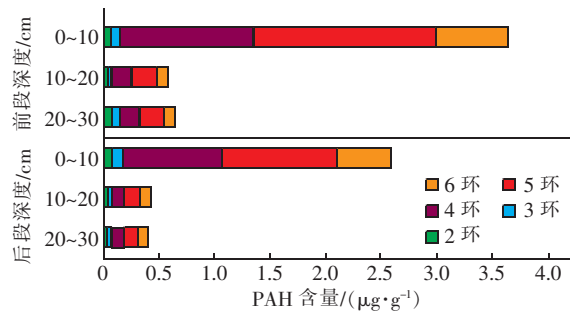


图3 不同深度基质样品中的PAHs含量

Fig.3 PAHs content in substrate samples at different depths

2.3 干植草沟系统去除PAHs的影响因素

HMW-PAHs和LMW-PAHs因理化性质差别较大,干植草沟系统对两者的去除效果也有较明显的差异。图4给出了8场降雨事件中HMW-PAHs进、出水浓度及其去除率和TSS去除率之间的关系。可以看出,HMW-PAHs的进水浓度和出水浓度之间存在显著的负相关关系($r = -0.81, p < 0.05$),在高浓度进水条件下,HMW-PAHs反而可以取得更好的去除效果。同时,HMW-PAHs去除率与TSS去除率存在显著相关性($r = 0.81, p < 0.05$),而LMW-PAHs去除率与TSS去除率相关性并不显著。课题组前期研究表明,设施稳定运行一段时间后,基质存在明显层化现象,TSS主要在基质层上部得到截留^[17]。HMW-PAHs的正辛醇-水分配系数大,疏水性强,容易吸附于颗粒物表面^[18],可伴随基质对TSS的滤饼过滤和深度过滤^[19]等作用在干

植草沟内得到有效去除,相关现象在生物滞留设施中已经得到了验证^[20]。

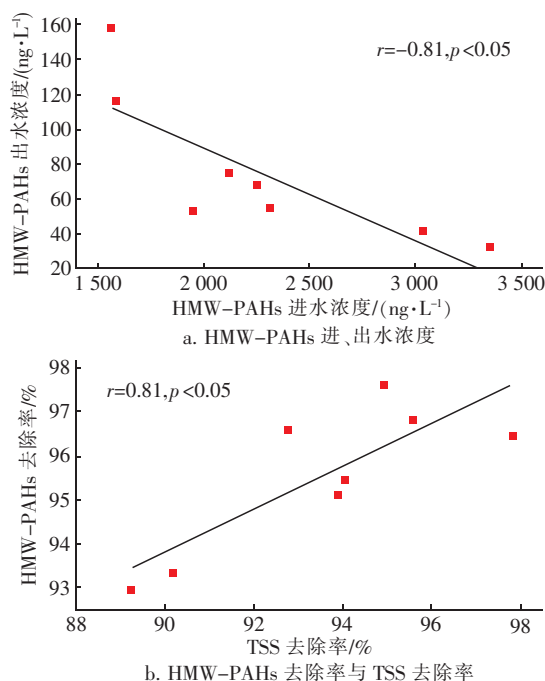


图4 HMW-PAHs进、出水浓度的相关性及其去除率和TSS去除率的相关性

Fig. 4 Correlation between influent and effluent concentrations of HMW-PAHs and correlation between removal rates of HMW-PAHs and TSS

设施对LMW-PAHs的去除效果较差,去除率仅为77.52%。对8场降雨事件中LMW-PAHs的进、出水浓度的相关性分析表明,LMW-PAHs进、出水浓度之间存在显著相关性($r=0.77, p<0.05$),进水LMW-PAHs浓度升高,出水浓度也随之升高[见图5(a)]。低浓度LMW-PAHs溶于水,其去除机制可能与HMW-PAHs不同。本设施基质层浅,与其他类似设施相比,污染物与基质接触时间短,去除效果容易受HLR的影响^[21]。对LMW-PAHs出水浓度、去除率与HLR的相关性分析结果表明,LMW-PAHs出水浓度与HLR呈显著正相关($r=0.65, p<0.05$),而去除率则与HLR呈显著负相关($r=-0.75, p<0.05$) [见图5(b)]。LeFevre等^[22]对生物滞留模拟柱的相关研究发现,吸附作用对LMW-PAHs去除的贡献最多,达到56%~73%。对于干植草沟系统,较大HLR使得径流与基质接触时间短,反应不充分,因此LMW-PAHs出水浓度高,去除效果相应减弱。而大部分HMW-PAHs在

径流流经基质的过程中,已随着TSS被截留于表层10 cm基质中,实际的HMW-PAHs去除与水力负荷无关。

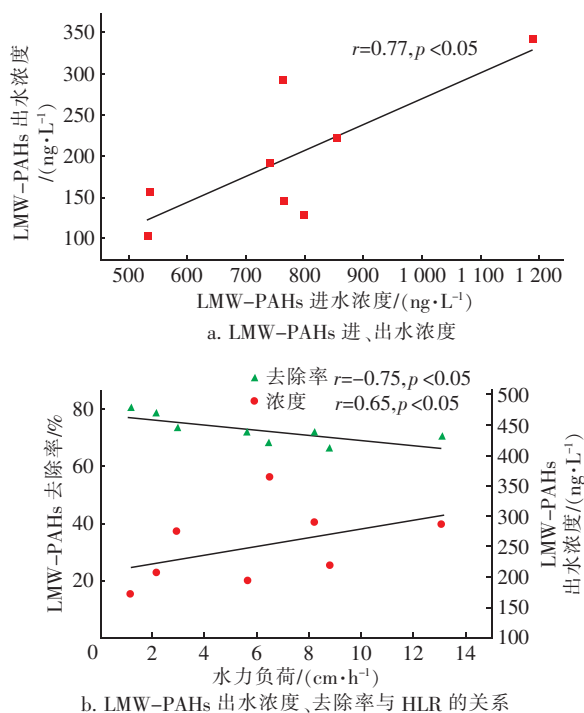


图5 LMW-PAHs进、出水浓度的相关性及其出水浓度、去除率与HLR的关系

Fig. 5 Correlation between influent and effluent concentrations of LMW-PAHs and correlation between hydraulic loading rates and effluent concentration, removal rate of LMW-PAHs

本试验监测期为干植草沟设施连续运行的第2年,试验结果表明,设施在连续运行两年后对PAHs仍然有良好的去除效果。PAHs类污染物在植草沟系统中的主要去除机制有基质吸附、微生物降解、植物吸收以及挥发扩散等,其中挥发作用最不显著,吸附截留和降解是主要去除机制^[22],去除效果可能与基质组成和配比、有机质类型、植物种类等相关,可通过优化设计参数进一步提高设施对PAHs的控制效果,被去除的PAHs的归宿问题将另行讨论。

3 设施运行效果评价

根据8场降雨事件的EMC均值,对设施在监测期内的PAHs污染负荷控制效果进行综合评价。由于设施存在径流量削减作用^[17],对 $\Sigma 16\text{PAHs}$ 、 $\Sigma 6\text{PAHs}$ 和TSS的质量负荷去除率均高于质量浓度去除率,分别为96.18%、98.31%和97.14%,设施对PAHs污染排放削减效果显著(见表3)。而BaP

作为多环芳烃中毒性最大的一种强致癌物,对径流 PAHs 污染负荷的贡献率在 8.37%~21.09%。我国《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)规定 BaP 的排放限值为 30 ng/L,由表 2 可知,上海高架路面径流中的 BaP 浓度已超过该标准限值的 10 倍。经浅基质层干植草沟处理后,各场次降雨设施出水 BaP 浓度与标准限值之间的比值均小于 1,达标率达到 100%,说明干植草沟系统可有效控制路面径流 PAHs 污染排放。

表 3 干植草沟系统对 PAHs 污染负荷控制效果

Tab.3 Control effect of PAHs mass load by the dry grass swale system

项 目	污染物质量负荷/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$)		质量负荷 削减率/%	质量浓度 削减率/%
	L_{in}	L_{out}		
$\Sigma 16\text{PAHs}$	4.19	0.16	96.18	91.73
$\Sigma 6\text{PAHs}$	1.78	0.03	98.31	96.67
TSS	3.85×10^5	0.11×10^5	97.14	93.57

4 结论

① 浅基质层干式植草沟对高架道路径流中的 PAHs 有很好的处理效果,对 $\Sigma 16\text{PAHs}$ 和具有明确致癌性的 $\Sigma 6\text{PAHs}$ 的去除率可达到 91.73% 和 96.67%,PAHs 主要被截留于基质层上部 0~10 cm 范围内。

② 浅基质层干式植草沟对不同分子质量 PAHs 的去除机理不同。HMW-PAHs 的去除率与 TSS 去除率显著相关,主要伴随基质对 TSS 的过滤、拦截得到去除;LMW-PAHs 主要依靠吸附作用去除,水力负荷的升高影响其去除效果。

③ 高架道路径流经浅基质层干式植草沟处理后,对 BaP 的去除率可达到 98.00%,出水浓度达到了《污水综合排放标准》(GB 8978—1996),设施可有效控制路面径流对受纳水体的 PAHs 排放污染。

参考文献:

- [1] LUNDY L, ELLIS J B, REVITT D M. Risk prioritisation of stormwater pollutant sources[J]. *Water Research*, 2012, 46(20): 6589-6600.
- [2] LAU S L, HAN Y, KANG J H, *et al.* Characteristics of highway stormwater runoff in Los Angeles: metals and polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Water Environment Research*, 2009, 81(3): 308-318.
- [3] 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.
- [4] 张巍, 张树才, 万超, 等. 北京城市道路地表径流及相关介质中多环芳烃的源解析[J]. *环境科学*, 2008, 29(6): 1478-1483.
ZHANG Wei, ZHANG Shucai, WAN Chao, *et al.* Source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface runoff and related media of urban roads in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(6): 1478-1483 (in Chinese).
- [5] 吴杰, 熊丽君, 吴健, 等. 上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析[J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2240-2248.
WU Jie, XIONG Lijun, WU Jian, *et al.* Comparison and source apportionment of PAHs pollution of runoff from roads in suburb and urban areas of Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2240-2248 (in Chinese).
- [6] HOFFMAN E J, MILLS G L, LATIMER J S, *et al.* Urban runoff as a source of polycyclic aromatic hydrocarbons to coastal waters [J]. *Environmental Science & Technology*, 1984, 18(8): 580-587.
- [7] LEROY M C, LEGRAS M, MARCOTTE S, *et al.* Assessment of PAH dissipation processes in large-scale outdoor mesocosms simulating vegetated road-side swales [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 520: 146-153.
- [8] DAVIS A P, MCCUEN R H. *Stormwater Management for Smart Growth* [M]. New York: Springer, 2005: 156-157.
- [9] 边璐, 李田, 侯娟. PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源[J]. *环境科学*, 2013, 34(10): 3840-3846.
BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons using two mathematical models for runoff of the Shanghai elevated inner highway, China [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(10): 3840-3846 (in Chinese).
- [10] BERBEE R, RIJS G, DE BROUWER R, *et al.* Characterization and treatment of runoff from highways in the Netherlands paved with impervious and pervious asphalt [J]. *Water Environment Research*, 1999, 71(2): 183-190.
- [11] MIGUNTANNA N P, LIU A, EGODAWATTA P, *et al.* Characterising nutrients wash-off for effective urban

- stormwater treatment design [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 120: 61–67.
- [12] DIBLASI C J, LI H, DAVIS A P, *et al.* Removal and fate of polycyclic aromatic hydrocarbon pollutants in an urban stormwater bioretention facility [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(2): 494–502.
- [13] BOVING T B, NEARY K. Attenuation of polycyclic aromatic hydrocarbons from urban stormwater runoff by wood filters [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2007, 91(1/2): 43–57.
- [14] LAU S, STENSTROM M K. Metals and PAHs adsorbed to street particles [J]. Water Research, 2005, 39(17): 4083–4092.
- [15] ARYAL R K, FURUMAI H, NAKAJIMA F, *et al.* Dynamic behavior of fractional suspended solids and particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in highway runoff [J]. Water Research, 2005, 39(20): 5126–5134.
- [16] 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 等. 不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征 [J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3369–3377.
- LU Yintao, XIANG Xinxin, ZHANG Shichao, *et al.* Vertical distribution characteristics of PAHs in soils with different land use types during rapid urbanization [J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 3369–3377 (in Chinese).
- [17] 张佳伟, 李田, 张庭秀. 浅基质层干植草沟运行效果的现场实验 [J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4105–4112.
- ZHANG Jiawei, LI Tian, ZHANG Tingxiu. Performance assessment of field-scale dry grass swale with shallow substrate layer [J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4105–4112 (in Chinese).
- [18] SCHWARZENBACH R P, GSCHWEND P M, IMBODEN D M. Environmental Organic Chemistry [M]. Hoboken, NJ: Wiley, 2016.
- [19] LI H, DAVIS A P. Urban particle capture in bioretention media. I: laboratory and field studies [J]. Journal of Environmental Engineering, 2008, 134(6): 409–418.
- [20] TEDOLDI D, CHEBBO G, PIERLOT D, *et al.* Assessment of metal and PAH profiles in SUDS soil based on an improved experimental procedure [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 202: 151–166.
- [21] LOPEZ-PONNADA E V, LYNN T J, ERGAS S J, *et al.* Long-term field performance of a conventional and modified bioretention system for removing dissolved nitrogen species in stormwater runoff [J]. Water Research, 2020, 170: 115336.
- [22] LEFEVRE G H, NOVAK P J, HOZALSKI R M. Fate of naphthalene in laboratory-scale bioretention cells: implications for sustainable stormwater management [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(2): 995–1002.
- 作者简介: 张庭秀 (1996–), 女, 江苏宜兴人, 硕士研究生, 研究方向为城市面源污染控制和低影响开发。
- E-mail: 897747077@qq.com
- 收稿日期: 2020–10–11
- 修回日期: 2020–11–03

(编辑: 刘贵春)

坚持节水优先, 强化水资源管理