

廖晓数, 吴志权, 朱成煜, 等. 海绵型雨水口初期雨水截污能力优化研究 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1170-1176.

LIAO X S, WU Z Q, ZHU C Y, et al. Research on optimization of initial rainwater interception capacity of sponge-type rainwater inlet[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(4): 1170-1176.

海绵型雨水口初期雨水截污能力优化研究

廖晓数¹, 吴志权¹, 朱成煜¹, 林冰², 苏君豪², 张倩², 仇玥^{1*}

1. 武汉市汉阳市政建设集团有限公司

2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院

摘要 选用装配式选配截污型雨水口,以土工布、不锈钢筛网和5种不同填料作为过滤模块,配置人工模拟雨水用于试验,研究其在不同截污装置下对初期雨水中悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、总氮(TN)和总磷(TP)等污染物的去除效果,测试其对初期雨水径流污染的削减能力,并综合评价其在实际工程运用中的可行性与经济性。结果表明:在土工布、不锈钢筛网过滤模块中,土工布对SS有较好的去除效果,不锈钢筛网则需将孔径降至0.074 mm时才对SS有较明显的去除效果,但二者对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP的去除效果均较差;以高炉灰焦粒、活化沸石、椰壳生物炭、陶粒、活性炭作为滤料的5种过滤模块均能有效提高初期雨水中COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP的去除效果;其中陶粒在达到理想的脱氮除磷效果的同时,也可实现较好的SS和COD去除效果,使用年限与其他过滤模块相差不大,且售价(5~13元/kg)略低于其他过滤模块。

关键词 陶粒; 雨水口; 过滤模块; 污染物

中图分类号: X52 文章编号: 1674-991X(2022)04-1170-07 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210597

Research on optimization of initial rainwater interception capacity of sponge-type rainwater inlet

LIAO Xiaoshu¹, WU Zhiquan¹, ZHU Chengyu¹, LIN Bing², SU Junhao², ZHANG Qian², QIU Yue^{1*}

1. Wuhan Hanyang Municipal Construction Group Co., Ltd.

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology

Abstract An assembly-type optional sewage-interception rainwater inlet was proposed, with geotextile, stainless steel screen and five different fillers as the filter modules, and the artificial simulated rainwater was equipped for the test to study its removal effect on the pollutants of suspended solids (SS), chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP), in the initial rainwater under different sewage intercepting devices. Its ability to reduce the initial runoff pollution was tested and the feasibility and economy in practical engineering applications were evaluated. The test results showed that: in the geotextile and stainless steel screen filter modules, geotextile had a good removal effect on SS, while the stainless steel screen had an obvious removal effect on SS when the aperture was decreased to 0.074 mm, but the two filter modules had poor removal effect on COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP. The five filtration modules with high furnace ash coke particles, activated zeolite, coconut shell biochar, ceramsite and activated carbon as filter materials, could effectively improve the removal effects of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP in the initial rainwater. Among them, ceramsite could not only achieve the ideal removal effect of nitrogen and phosphorus, but also achieve good removal effect on SS and COD. Its service life was comparable with other filtration modules, and the market unit price (5-13 yuan/kg) was slightly lower than other filtration modules.

Key words ceramsite; inlet for rainwater; the filter module; pollutant

近年来,城市水体污染问题虽有所改善,但仍是国家环境治理的重中之重。在城市非点源已成为仅次于农业面源的第二大面源^[1]。由降雨引发的地表径流污染是城市非点源污染的重要

收稿日期: 2021-11-22

基金项目: 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室开放研究基金项目(2019-06)

作者简介: 廖晓数(1981—),男,高级工程师,主要研究方向为污染水体修复与海绵城市工程设计, 66159062@qq.com

* 通信作者: 仇玥(1993—),女,初级工程师,硕士,主要研究方向为污染水体修复与海绵城市工程设计, 33716290@qq.com

来源之一。目前,在我国运营的雨水管道存在不同程度的沉积物累积现象,为了减轻管道末端受纳水体的污染物负荷,必须从雨水管道系统的源头控制污染,降低后续处理工艺的负荷^[2]。雨水口是城市排水系统的咽喉,也是城市非点源污染进入水环境的重要通道^[3]。对于地表径流中的初期雨水,将其经截污装置去除污染物之后,再进行有效收集与利用,是减少地表径流污染、解决城市水资源短缺的有效措施之一^[4]。城镇内雨水口的堵塞,会提高城市道路的积水风险,有可能导致被污染的积水汇入并污染城市水体^[5]。因此,建造雨水口截污设施可以从管网源头控制污染并防止管路堵塞,从而有效缓解城市内涝。雨水口截污装置作为路面排水污染控制设施,其结构型式及功能对径流雨水的水质控制尤为重要^[6]。

针对雨水口各种截污措施的截污效果,国内学者进行了一系列的研究。如陈莹等^[7]结合西安市道路径流水质、水量特征及街道截口设置,设计了一种道路雨水口截污装置——截污挂篮,并研究了其透水性能、工作状态、截污效果及漏循环;陈望等^[8]研究了以500、400、350、250、200 g/m²的土工布制成的截污装置对西安市屋面初期雨水的截污效果,发现在不发生溢流的情况下,土工布截污装置可有效减轻屋面初期径流污染负荷,改善屋面径流水质;柳健^[9]采用尼龙网和土工布2种截污挂篮,发现其对

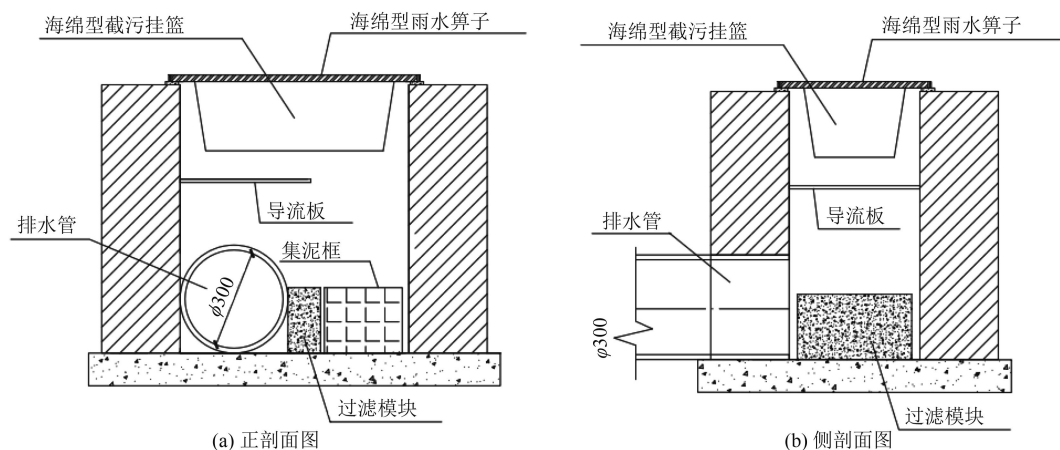
径流固体污染物具有较好的去除效果。

笔者采用海绵型雨水口截污装置(与传统型雨水口不同的是,该雨水口增加了截污挂篮、导流板、过滤模块等模块化的活动式装置),研究在不同特性材料的过滤模块条件下,海绵型雨水口对悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH₄⁺-N)、总氮(TN)和总磷(TP)的去除效果,以期为城市地表径流的净化提供参考。

1 材料与方法

1.1 海绵型雨水口截污装置

海绵型雨水口截污装置结构如图1所示。该装置包括井壁、雨水箐子、截污挂篮、导流板、过滤模块、集泥框、排水管道等。雨水箐子对地表径流中的粗大污染物进行初步拦截,稍大的颗粒物被截留于箐子内;雨水及通过雨水箐子的较小颗粒物流至截污挂篮,小颗粒物被截留在挂篮内;而雨水和细颗粒物则通过截污挂篮的孔隙落至井底的集泥框,最后到达孔径很小的过滤模块。细小颗粒被截留于过滤模块一侧,逐渐积聚于集泥框中。当降水量很大,雨水来不及全部通过过滤模块时,过滤模块前的水位会持续上升,直至从过滤模块顶端溢流至另一侧。最终,经过雨水箐子、截污挂篮、集泥框和过滤模块的过滤后,较为清洁的地面雨水通过排水管道排至雨水井。



注:图中数字单位为mm。

图1 海绵型雨水口截污装置结构

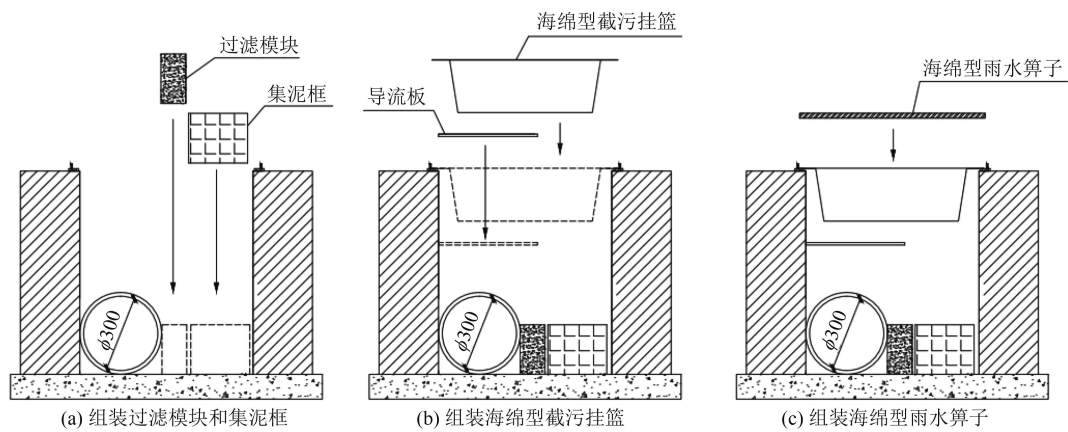
Fig.1 Sewage interception device of sponge-type rainwater inlet

海绵型雨水口截污装置采用模块化设计,构造简单,拆装灵活,检修方便,日常维护工作量较小。海绵型雨水口截污装置的组装工艺如图2所示。

1.2 试验用初期雨水水质

试验用水样取自武汉市洪山区珞狮南路边雨水

口和武汉理工大学校园内雨水口,雨水箐子尺寸均为750 mm×450 mm。于2021年6—8月下雨时打开雨水箐子,将雨水挂篮套好袋子放入,收集第5、10、15、20分钟的初期雨水。共采样6次,降水量(以24 h计)分别为15~24.9 mm(中雨)2次,



注: 同图 1。

图 2 海绵型雨水口组装修艺

Fig.2 Assembly process of sponge-type rainwater inlet

25~49.5 mm(大雨)2 次和 50 mm(暴雨)以上 2 次。据实际初期雨水的水质, 配制人工模拟初期雨水用于后续试验。初期雨水水质和模拟雨水水质如表 1 所示。

表 1 实际初期雨水水质和模拟初期雨水水质

Table 1 Actual initial rainwater quality and simulated initial rainwater quality					mg/L
雨水类型	水质指标	5 min	10 min	15 min	20 min
实际初期雨水	COD	160~200	180~220	150~190	120~160
	NH ₄ ⁺ -N 浓度	1~3	2~5	0~2	0~3
	TN 浓度	4~6	5~7	2~4	1~4
	TP 浓度	0.4~0.6	0.4~0.6	0.2~0.6	0.2~0.4
	SS 浓度	70~90	70~80	50~80	60~90
模拟初期雨水	COD	175	205	165	135
	NH ₄ ⁺ -N 浓度	2	4	1.2	2
	TN 浓度	4.5	6.5	3	3.5
	TP 浓度	0.6	0.6	0.4	0.4
	SS 浓度	80	80	75	85

1.3 试验方案及检测方法

土工布由合成纤维通过编织或针织而成, 在实际生产中多用于防渗、过滤、排水等^[10]。土工布具有良好的机械强度和化学性能, 抗腐蚀能力强, 在干燥或湿润环境中都能保持较好的强度和抗拉能力, 孔隙大小稳定, 透水性好, 可作为良好的过滤材料^[11]。分别采用土工布、不锈钢筛网以及不同材质的滤料过滤模块进行海绵型雨水口截污装置的截污效果研究, 土工布和不锈钢筛网采用蒙在集泥框上的方法来探究截污效果, 另外采用不锈钢筛网来承托过滤模块中的滤料。具体试验设计如表 2 所示。

分别将第 5、10、15 和 20 分钟的模拟初期雨水倒入海绵型雨水口截污装置中, 并检测出水 SS、COD、NH₄⁺-N、TN、TP 浓度。用多普勒流量计测得实际初期雨水流速为 1.1 m/s, 实际初期雨水流量为

1.5 L/s。用该数据进行模拟试验, 在 φ300 的试验管段横截面面积下的平均过流量为 1.5 L/s。根据试验得知, 雨水入流持续时间为 1~5 min, 对 SS、COD、NH₄⁺-N、TN、TP 的截留效果差别不大, 即持续时间

表 2 具体截污试验方案设计

Table 2 Specific design of pollution interception test scheme

过滤模块	材料参数
土工布	规格分别为 100、200、400、600、800 g/m ²
不锈钢筛网	孔径分别为 0.015、0.030、0.074、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0 mm
高炉灰焦粒滤料	粒径为 1.5~3.0 mm, 密度为 0.86 g/cm ³
活化沸石滤料	粒径为 1.5~3.0 mm, 密度为 2.0 g/cm ³
椰壳生物炭滤料	粒径为 1.5~3.0 mm, 密度为 0.42~0.55 g/cm ³
陶粒滤料	粒径为 1.5~3.0 mm, 密度为 2.25 g/cm ³
生物炭滤料	粒径为 1.5~3.0 mm, 密度为 0.55 g/cm ³

为 1 min 的初期径流雨水试验已经能够模拟实际径流雨水在该海绵型雨水口中的截污效果,故选择持续时间为 1 min。根据持续时间和平均过流量,计算得到累计过流量为 90 L。

试验中水质指标 SS、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的测定参照《水和废水监测分析方法》^[12]。

2 结果与讨论

2.1 土工布截污效果

用土工布作为过滤材料,污染物去除效果如表 3 所示。由表 3 可知,土工布的过滤作用使其对 SS 有较好的去除效果,去除率为 58%~64%。其中,规格 600 和 800 g/m² 的土工布过滤模块对 SS 去除效果较好,而规格 100、200 和 400 g/m² 的土工布过滤模块对 SS 的去除率差别不大。可知土工布对 SS 的去除率与其本身单位面积质量并无太大相关性,原因可能是,当在集泥框表面蒙上土工布,土工布的单位面积质量越大(即厚度越大),其过流流量和流速会降低,在降水量大的时间段,会造成部分来不及过滤的雨水溢流,对截污效果造成影响。土工布过滤模块对 COD 仅有微弱的去除效果,去除率平均为 13% 左右,400 和 800 g/m² 的土工布过滤模块去除 COD 的能力稍微优于其他单位面积质量的土工布,但差异并不显著。土工布过滤模块对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除效果微乎其微,去除率仅为 3% 左右,对 TP 则基本没有去除效果。可见,土工布适用于拦截污水中溶解态氮、磷浓度不高的雨水,如果实际工程中的雨水径流中溶解态氮、磷浓度不高,则可在集泥框表面蒙上土工布进行截污。

表 3 不同规格土工布过滤模块对污染物的去除效果

Table 3 Removal effect of geotextile filter module with different specifications on pollutants

规格/(g/m ²)	污染物去除率/%				
	COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	TP	SS
100	13	4	3	0	59
200	12	3	1	0	58
400	14	3	1	0	60
600	13	2	1	0	64
800	14	1	1	0	63

2.2 不锈钢筛网截污效果

用作雨水过滤模块的不锈钢筛网采用平纹、斜纹、密纹等方式编织而成,具有耐磨强度高、使用寿命长等优点,是较为传统的筛分和过滤材料。不锈钢筛网过滤模块的截污效果如表 4 所示。由表 4 可

知,孔径为 0.2、0.5、1.0、1.5 和 2.0 mm 的不锈钢筛网过滤模块对 SS、COD、TN、TP 几乎都没有去除作用,对 SS 的最高去除率仅为 3%。可见,不锈钢筛网作为过滤模块对污染物的去除效果较差。此外,通过降低不锈钢筛网的孔径至 0.074 mm,能在一定程度上提高海绵型雨水口对 SS 的拦截能力,但对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 几乎都没有去除作用。

表 4 不同孔径不锈钢筛网过滤模块对污染物的去除效果

Table 4 Removal effect of stainless steel screen filter module with different apertures on pollutants

孔径/mm	污染物去除率/%				
	COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	TP	SS
2.0	0	0	0	0	2
1.5	1	0	0	0	2
1.0	1	3	1	0	2
0.5	0	0	0	0	2
0.2	0	1	0	0	3
0.074	7	1	0	0	22
0.030	8	1	0	0	39
0.015	11	2	1	0	49

将不锈钢筛网孔径降至 0.074、0.030、0.015 mm,发现随着孔径的减小,海绵型雨水口对 SS 和 COD 的拦截能力也相应提高,0.015 mm 的不锈钢筛网过滤模块对 SS 的去除率达 49%,对 COD 的去除率为 11%。较小孔径的不锈钢筛网过滤模块能产生一定的去污效果,但在过滤模块的选择上不仅需要考虑对污染物的降解能力是否满足工程需求,也要考虑其经济性和实用性是否符合工程预算。0.015 mm 以上的不锈钢筛网孔隙率低,初期雨水透过所需时间过长,并且容易在雨水口中造成短流,降低截污效果^[13]。在水流进入雨水口之后,由于流速缓慢,过滤模块前端的水流容易受到雨水口处垂直向下的水流的冲击,造成水流紊乱,部分断面一旦形成真空状态,就会形成一股上升的气流,带动部分淤泥与水作向上运动,从而降低去污效果^[14]。另外,0.015 mm 以上的不锈钢筛网成本过高,在实际工程运用中难以满足经济方面的要求。

2.3 滤料的截污效果

过滤模块中的滤料设计一般要满足以下几个基本条件:1)有较好的表面性质和较大的比表面积,以保持滤料的均一性;2)具备一定的孔隙率以保持滤料的透气性和透水性,以防滤料被污染物填充或因为气压升高而形成短流现象;3)有较强的机械强度和一定的防腐蚀能力,防止滤料因水流冲击而受到

破坏^[15]。本试验在过滤模块中填充高炉灰焦粒、活化沸石、椰壳生物炭、陶粒、活性炭作为滤料,研究其对初期雨水中污染物的去除效果。高炉灰焦粒一般来源于电厂锅炉、各种工业用锅炉和煤矿燃煤等,根据不同来源,含有钛、铝、镁等各种金属元素组分,比表面积较大,有较高的孔隙率,是较好的过滤材料^[16]。活化沸石是将天然硅铝酸盐矿石经过多种工艺活化而成,在灼烧时会产生沸腾现象。活化沸石具有独特的物理化学特性,吸附性能强,有利于离子交换,对水中的有害重金属、SS、色度和臭味等都有去除效果,是一种较为理想的新型滤料^[17]。活性炭一般分为粉末状和颗粒状,主要用于水的净化、脱氯、去除色度和异味等,具有良好的吸附能力^[18]。椰壳生物炭是以优质椰子壳为原材料的一种滤料,具有吸附性能好、强度高优点。捣碎的椰壳具有较大的极性,比表面积大,有利于 SS 的附着^[19]。陶粒的原材料是黏土或页岩,内部结构呈细密蜂窝微孔状^[20],相较其他滤料最显著的优点是轻质性。

2.3.1 滤料的截污能力

试验采用的市售滤料粒径均为 1.5~3.0 mm,厚度均为 10 cm。5 种滤料的过滤模块对初期雨水中污染物的去除效果如表 5 所示。

表 5 不同填充滤料的过滤模块对污染物的去除效果

Table 5 Removal effects of filter modules filled with different filter materials on pollutants

滤料种类	污染物去除率/%				
	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	SS
高炉灰焦粒	23	85	47	67	74
活化沸石	48	85	48	0	76
椰壳生物炭	28	14	10	66	77
陶粒	36	76	53	63	75
活性炭	41	86	64	68	82

由表 5 可见,5 种滤料均能有效提高过滤模块的截污效果,尤其是提高了对 COD、TN、TP 和 NH₄⁺-N 的拦截效果。其中,高炉灰焦粒对各种污染物有均衡的去除效果,尤其对 TP 的去除率相对较高;活化沸石对 COD 的去除效果在 5 种滤料中表现最好,去除率达 48%,但其对磷污染物几乎没有去除效果;椰壳生物炭对 SS、COD、TP 的去除效果与高炉灰焦粒接近,但其脱氮能力明显弱于其他 4 种滤料。陶粒或活性炭作为滤料,能获得比高炉灰焦粒、活化沸石和椰壳生物炭滤料更好的截污效果,且陶粒和活性炭对不同的污染物均有着较好的降解效果。陶粒滤料在达到理想的脱氮除磷效果的同时,也实现了较

高的 SS 和 COD 去除效果。5 种滤料有较高的表面能,具有不规则的多孔状结构,吸附容量较大,过滤周期长,并对初期雨水中污染物有一定的絮凝作用^[21]。相对于土工布和不锈钢筛网来说,在初期降水量较少并保证雨水经过填充滤料过滤模块不会溢流的情况下,填充滤料对 SS 有更高的去除率。

相比普通砂滤料,活化沸石滤料更有利于微生物生长,易于微生物的附着,由于其比表面积大于普通滤料,因此有较高的 COD 去除率。活化沸石滤料的 NH₄⁺交换容量较高,能够吸附水中的 NH₄⁺,有适宜硝化菌进行硝化作用的条件,故活化沸石滤料对 TN 和 NH₄⁺-N 也有较好的去除效果。活化沸石由天然沸石活化而来,在灼烧过程中会因为表面络合吸附作用和羟基化作用的下降而影响沸石对 PO₄³⁻的吸附作用,甚至导致对 PO₄³⁻的吸附容量几乎降为 0。如表 5 所示,活化沸石对 TP 没有去除效果。

椰壳生物炭的制备过程要经过热解,随着温度的升高,椰壳生物炭的阳离子交换量降低,NH₄⁺交换容量较低,因而对 TN 和 NH₄⁺-N 的去除效果不如活化沸石。但椰壳生物炭对 PO₄³⁻保留了较好的吸附性能,对 TP 去除效果较好。此外,椰壳生物炭颗粒不规则,孔隙结构较发达,对 COD 也有一定的去除效果^[22]。

陶粒具有极好的吸附性能,对 COD 去除效果较好,而且质地硬,耐冲刷,有良好的物理性状。由于陶粒有着丰富的孔状结构和较大的比表面积,因此截污能力较好。孔状表面有利于微生物挂膜,可有效去除水中 COD、TP、TN 和 NH₄⁺-N 等,截污效果较好^[23]。

活性炭为黑色固体,一般由木炭制备,其吸附性能良好,多用于污水处理。一般活性炭表面会聚集微生物,微生物和有机物接触时间较长,对 COD 的去除效果高于除活化沸石外的其他滤料,对初期雨水脱氮除磷有着一定的作用,对氮磷元素去除效果较好^[24]。在物理吸附和微生物降解的双重作用下,活性炭对各种污染物的去除效果均略优于陶粒。

2.3.2 滤料的经济性

土工布、不锈钢筛网和填充滤料对初期雨水中污染物都有一定的去除效果,但在实际工程中还需考虑经济性和耐用性。对本研究的几种海绵型过滤模块进行价格和使用年限分析(表 6),结果表明:每 m² 土工布的市场售价约为不锈钢筛网的 1/10,且在多种工程用途中都有着与不锈钢筛网相当的使用寿命;0.015~0.074 mm 的不锈钢筛网价格较高,不宜在实际工程中大量运用;从城市附近的钢材生产

表 6 过滤模块价格和基本性能分析

Table 6 Price and basic performance analysis of filter modules

过滤模块	单价	使用年限/a
土工布(规格100、200、400、600、800 g/m ²)	1.5~4.0元/m ²	2~5
不锈钢筛网(孔径为0.015、0.030、0.074、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0 mm)	25~200元/m ²	2~5
高炉灰焦粒滤料(粒径为1.5~3.0 mm)	4~11元/kg	1.5~3.0
活化沸石滤料(粒径为1.5~3.0 mm)	4~14元/kg	1.5~2.0
椰壳生物炭滤料(粒径为1.5~3.0 mm)	6~18元/kg	1.5~2.0
陶粒滤料(粒径为1.5~3.0 mm)	5~13元/kg	2~4
活性炭滤料(粒径为1.5~3.0 mm)	10~22元/kg	2~3

等厂家收购高炉灰焦粒,若是大批量采购且在国家推动去产能、以废治废的相关政策背景下,能达到较低的收购成本;活性炭作为目前给水深度处理中常用的吸附材料,有着较好的截污性能和较高的收购成本,但其市场售价较高。

2.3.3 滤料的选择

陶粒的原材料一般为黏土和页岩,制作工艺相对简单,外表坚硬,机械强度大,耐用性强,有着长远的经济效益,其实际采购价格与活化沸石相仿。当实际工程对脱氮除磷要求较高时,不宜选择活化沸石作为滤料。椰壳生物炭价格较高,脱氮效果一般,但对 TP 和 SS 的去除效果好,可用于经费充足且雨水中氮浓度低的场景。就去除效果而言,活性炭对各污染物均有较好的去除效果,但其采购成本较高,在实际工程中用于海绵型雨水口的性价比不高。高炉灰焦粒滤料价格最为经济,相较于其他 4 种滤料,对 COD 去除效果最差,但对 COD 之外的其他污染物去除效果较好,适用于对 COD 去除效果要求不高且预算低的场景。综上,可从污染物截留率、过滤模块耐用性、经费预算、地方污染物排放标准或雨水中污染物浓度等方面,根据实际情况来选择相应的海绵型雨水口过滤模块。

3 结论

(1)多种海绵型雨水口过滤模块截污效果比较结果表明,土工布对 SS 有着一定的去除效果,对 COD 的去除效果微弱,对氮、磷污染物几乎没有去除作用。售价低廉的大孔径不锈钢筛网过滤模块(孔径>0.074 mm)的截污性能较差,而截污性能较好的小孔径不锈钢筛网过滤模块(孔径≤0.074 mm)则因经济性不高、过流能力弱,难以运用到生产实际中。

(2)在考虑经济性的前提下,高炉灰焦粒、活化沸石、椰壳生物炭、陶粒、活性炭 5 种过滤材料的海

绵型雨水口可灵活运用于不同径流雨水集流截污场景。可根据各地区不同季节的降水量、水质指标和污染物排放标准等,选用相应过滤模块的海绵型雨水口。其中活化沸石和椰壳生物炭适用于对脱氮除磷要求不高的场景或氮、磷浓度较低的雨水。活性炭去除效果好,但成本较高,适用于经济条件好,对污水处理预算较为充足的场景。陶粒具有良好的截污能力和经济实用性,适用于实际经费预算不高,又要求各项污染物去除效果好的场景。

参考文献

[1] 周国华,马莎莎,李俊奇,等.雨水口截污装置对径流污染的控制效果[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 66-71.
ZHOU G H, MA S S, LI J Q, et al. Analysis on effect of grate inlet interceptor on runoff pollution control[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(4): 66-71.

[2] 王建龙,王泽熙,李晗,等.雨水管道沉积物累积对过流能力影响的模拟试验[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(3): 732-737.
WANG J L, WANG Z X, LI H, et al. Simulation test on the influence of sediment accumulation on the drainage capacity of rainwater pipeline[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(3): 732-737.

[3] 凌文翠,李焕利,方瑶瑶,等.北京市典型雨水工程污染物去除效果监测分析[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(3): 738-743.
LIN W C, LI H L, FANG Y Y, et al. Monitoring and analysis of pollutants removal efficiencies of typical rainwater projects in Beijing City [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(3): 738-743.

[4] 徐强强,李阳,马黎,等.城市雨水管道沉积物氮磷污染溶出特性试验研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(3): 646-654.
XU Q Q, LI Y, MA L, et al. Experimental study on leaching characteristics of nitrogen and phosphorus in urban rainwater pipeline sediment[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(3): 646-654.

[5] 李海燕,刘亮,梁叶锦,等.雨水口截污技术研究进展[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(4): 242-246.
LI H Y, LIU L, LIANG Y J, et al. On the research advances with the interception technology on the storm-water inlet[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(4): 242-246.

[6] 刘超,李俊奇,王淇,等.国内外截污雨水口专利技术发展及其展望[J]. 中国给水排水, 2014, 30(4): 1-6.
LIU C, LI J Q, WANG Q, et al. Summary and prospect of storm drain inlet patent technologies at home and abroad[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(4): 1-6.

[7] 陈莹,赵剑强,张小玲,等.西安市道路雨水口截污挂篮试验研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(5): 69-72.
CHEN Y, ZHAO J Q, ZHANG X L, et al. On the use of interception baskets to prevent road gully runoff pollution in Xi'an[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(5): 69-72.

[8] 陈望,陈莹,赵剑强,等.雨水斗截污装置对屋面初期雨水净化

- 规律及关键参数设计[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(7): 1799-1807.
- CHEN W, CHEN Y, ZHAO J Q, et al. Purifying rule and key parameters design of the interception device of rainwater funnel treating initial roof rainwater runoff[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(7): 1799-1807.
- [9] 柳健. 城市道路雨水径流污染特征及源头控制技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [10] 叶奕梁, 徐朴. 土工布的生产技术和性能要求[J]. *纺织导报*, 2000(3): 36-40.
- YE Y L, XU P. Geotextiles production technology & requirements on their properties[J]. *China Textile Leader*, 2000(3): 36-40.
- [11] GUO J, HAN J, ZHANG X, et al. Experimental evaluation of wicking geotextile-stabilized aggregate bases over subgrade under rainfall simulation and cyclic loading[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(6): 1550-1564.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] 张怡蕾, 操家顺, 薛朝霞, 等. 城市排水管道内污染物迁移转化规律研究进展[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(1): 111-121.
- ZHANG Y L, CAO J S, XUE Z X, et al. Research progress on the pollutants migration and transformation in municipal sewer[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(1): 111-121.
- [14] WEI P, UIJTTEWAAL W, van LIER J B, et al. Impacts of shearing and temperature on sewage sludge: rheological characterisation and integration to flow assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 774: 145005.
- [15] WĄSIK E, CHMIEŁOWSKI K. Ammonia and indicator bacteria removal from domestic sewage in a vertical flow filter filled with plastic material[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 106: 378-384.
- [16] 王卉. 高炉熔渣形成过程及性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [17] 韩金柱. 沸石的改性及其除磷性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [18] 李通, 罗仕忠, 吴永永, 等. 活性炭改性及其对CO₂/CH₄吸附性能的研究[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(12): 2012-2017.
- LI T, LUO S Z, WU Y Y, et al. Study of the modifying of activated carbon and its adsorption properties of CO₂/CH₄ mixture[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(12): 2012-2017.
- [19] 邱家枝. 椰壳生物炭的制备及其应用研究[D]. 福州: 福州大学, 2016.
- [20] 代亚辉. 粉煤灰陶粒滤料的制备及其在废水生物处理中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [21] KIM J S, KANG M K, YANG C H, et al. Nitrification at low concentration of NH₄⁺-N by using attached growth in zeolite media[J]. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 2017, 39(10): 561-567.
- [22] WANG C, LI L F, SHI J W, et al. Biochar production by coconut shell gasification in supercritical water and evolution of its porous structure[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, 156: 105151.
- [23] LIU Y S, DU F, YUAN L, et al. Production of lightweight ceramisite from iron ore tailings and its performance investigation in a biological aerated filter (BAF) reactor[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 178(1/2/3): 999-1006.
- [24] LU Z D, LI C, JING Z B, et al. Implication on selection and replacement of granular activated carbon used in biologically activated carbon filters through meta-omics analysis[J]. *Water Research*, 2021, 198: 117152. ◇