

多层复合渗滤系统对初期雨水径流净化效果研究*

朱琳 张劲# 毛鸿志

(湖北大学资源环境学院,湖北 武汉 430062)

摘要 初期雨水径流污染物含量较高,进入地下水或地表水易对水环境造成污染。选用沸石、炉渣、生物陶粒、砾石4种填料自上而下依次填充构建多层复合渗滤系统,探究对初期雨水径流中污染物的去除效果。结果表明:多层复合渗滤系统对化学需氧量(COD)的平均去除率高达92.5%,对总磷(TP)、总氮(TN)和氨氮的平均去除率也能分别稳定在67.6%、54.3%、57.3%。炉渣的除磷能力最强,沸石对氮和有机物的去除效果最好。因此,在绿化下垫面构建包含沸石和炉渣等多层填料的复合渗滤系统可有效预防初期雨水径流污染。

关键词 复合填料 初期雨水 渗滤系统 沸石 炉渣

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.04.011

Study on purification effect of a multi-layer composite infiltration system on initial rainwater runoff ZHU Lin, ZHANG Jin, MAO Hongzhi. (Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan Hubei 430062)

Abstract: The pollutants content of initial rainwater runoff is usually high, and it is easy to pollute the water environment when entering into the groundwater or surface water. Zeolite, slag, bio-ceramsite and gravel were selected to construct a multi-layer composite infiltration system from top to bottom so as to explore the removal effect for pollutants. Results showed that the COD purification capacity of the multi-layer composite infiltration system remained at a high level, with an average removal rate of 92.5%. The purification effect of TP, TN and ammonia nitrogen was stable, with average removal rates of 67.6%, 54.3% and 57.3%, respectively. Slag had the strongest phosphorus removal ability, and zeolite had the best nitrogen and organic matter removal ability. Therefore, zeolite, slag as well as other fillers were suitable for the multi-layer composite infiltration system on the green underlying surfaces, which could effectively prevent the initial rainwater runoff pollution.

Keywords: composite filler; initial rainwater; infiltration system; zeolite; slag

随着我国城镇化进程的加快,土地利用类型发生了显著改变,非透水下垫面的增加使雨水径流量加大,由此导致的雨水径流污染问题也日益严重^[1]。特别是初期雨水径流中含有大量有机质、氮和磷等污染物,进入城市受纳的地表或地下水体会对城市水环境产生重大影响,因此初期雨水径流是城市水环境污染的重要来源之一^[2-3]。为有效应对初期雨水径流污染所带来的城市水环境污染问题,绿色屋顶、湿地、下凹式绿地、雨水花园等生态技术因同时与景观相结合,在城市建造中得到了广泛的应用^[4-6]。这些生态技术最核心的部分是绿化下垫面渗滤系统填料的构建,直接影响到初期雨水径流的净化效果和系统的使用寿命^[7-8]。

单一填料的污染物去除作用往往存在一定局限性,因此填料的多层复合对提高初期雨水的

净化效果具有重要作用^[9-11]。沸石具有发达的孔隙结构和较强的吸附、催化与离子交换性能,可将其置于首层维持好氧环境,保证水、空气、填料三相接触传质,对氨氮和化学需氧量(COD)具有较好的去除效果^[12];炉渣微孔结构较多,水力渗透系数低,可对水体中的磷起到较好的吸附作用^[13],但考虑到炉渣中含有一定量的Pb、Cu、Cd等重金属,置于首层怕对绿化下垫面植物产生一定影响,所以将它置于沸石层之下;生物陶粒作为一种新型的生物膜载体填料,具有较高的挂膜效率^[14],将其置于第三层可形成厌氧区,使反硝化细菌迅速繁殖,实现生物反硝化脱氮;将砾石置于底层可进一步净化上层填料净化后的低浓度雨水径流^[15]。因此,本研究按上述思路设计了4层复合渗滤系统,探究各层填料在多层复合渗

第一作者:朱琳,女,1998年生,硕士研究生,研究方向为水体的生态修复。# 通讯作者。

* 湖北省重点研发计划项目(No.202110801203002);湖北省技术创新重大专项(No.CXZD2018000172)。

滤系统对初期雨水径流污染物的去除效果,以实现初期雨水径流的高效稳定净化。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验用水

为保证水质的稳定,试验用水模拟地表初期雨水径流人工配制。配水标准参考了 2021 年 6—8 月武汉市武昌区的 7 次降水过程的初期雨水径流,通过向自来水中投加葡萄糖、硫酸铵、磷酸二氢钾、硫酸钾、硫酸镁、碳酸氢钠等配制,水质情况如表 1 所示。

表 1 初期雨水径流配水水质
Table 1 Spiked water quality of initial rainwater runoff

水质指标	范围	平均值	标准差
温度/℃	9.0~28.5	20.5	4.5
pH	7.18~8.32	7.75	0.25
COD/(mg·L ⁻¹)	218.20~260.30	235.08	17.87
氨氮/(mg·L ⁻¹)	10.92~12.60	11.90	0.74
总氮(TN)/(mg·L ⁻¹)	17.08~17.77	17.44	0.31
总磷(TP)/(mg·L ⁻¹)	1.31~1.99	1.68	0.36

1.1.2 试验装置

试验装置示意图如图 1 所示。主体装置为内径 15 cm、高 95 cm、厚 8 mm 的有机玻璃柱,用于装填填料模拟多层复合渗滤系统,设置 3 组平行并联进行,填料层的有效高度为 80 cm,平均分为 4 层,管顶预留 5 cm 的布水区,管底预留 10 cm 的透水层,透水层用直径 1~2 cm 鹅卵石填满,分别在每层填料层底部设置取样口。

供试填料自上而下依次为沸石、炉渣、生物陶粒和砾石。其中沸石由河南郑州某环保有限公司提供,砾石由江苏扬州某园艺旗舰店提供,炉渣由湖北武汉某建材市场提供,生物陶粒由山东滨州某陶粒有限公司提供。所有填料粒径均控制在 2~5 mm,

用 30 目筛滤去浮渣,用蒸馏水洗净,烘干后再使用。

1.2 试验方法

1.2.1 试验运行方式

采用连续进出水方式由蠕动泵将人工配制的初期雨水从进水箱提升至管顶的布水区,以滴滤的形式进入填料,进水流量为 6 L/d。自然挂膜,挂膜期间监测水质,当 COD 去除率大于 55 %,生物膜厚达 0.4 mm,显微镜检出轮虫和钟虫时,标志挂膜成功,本研究挂膜历时 28 d。试验的正式取样时间为 30、32、34、36、38、40、42、44、47、50、54、58、62 d。

1.2.2 水质指标的测定方法

水样的温度、溶解氧、pH 用便携式水质参数测定仪(DZB-712)测定,COD、TN、氨氮和 TP 分别用快速密闭催化消解法、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、纳氏试剂分光光度法和过硫酸钾消解分光光度法测定。

1.2.3 数据处理

使用 Levene 检验分析方差的同质性,当 $p < 0.05$ 时认为具有显著性差异。单因素方差分析的比较使用 Duncan 法。

2 结果与讨论

2.1 COD 的去除效果

对 COD 的去除是衡量填料处理污水效果的重要指标之一。填料对有机物的去除主要通过吸附和微生物降解实现^{[16]295}。由图 2 可见,挂膜成功后最终出水 COD 的平均去除率为 92.5 %,日均质量浓度为 10.73~26.58 mg/L,符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,说明本研究所设计的各层填料在多层复合渗滤系统中仍能充分发挥对有机物的去除作用。从时间上看

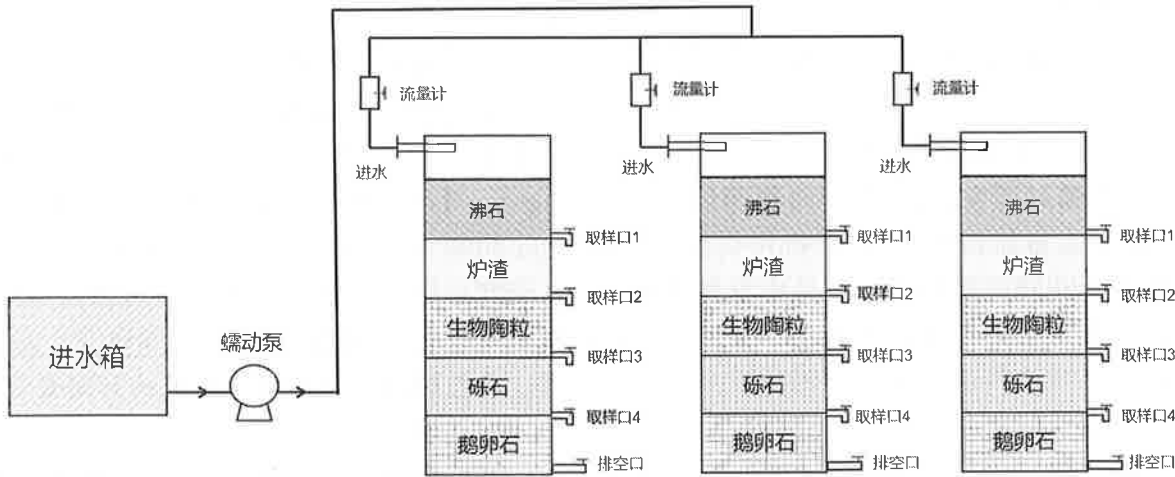


图 1 试验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

(见图3),各层对COD去除发生在36 d以后。

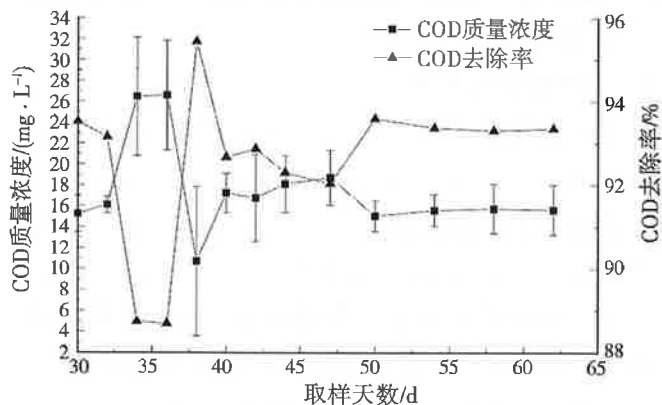


图2 多层复合渗滤系统对COD的去除效果

Fig.2 Removal effect on COD by multi-layer composite infiltration system

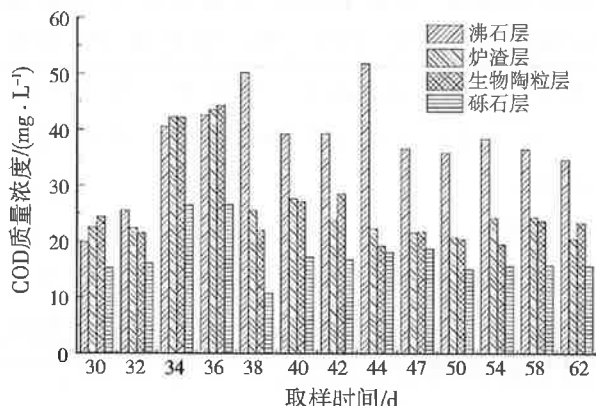


图3 各层出水的COD质量浓度变化

Fig.3 Change of COD mass concentration in each layer effluent

方差分析发现,与进水相比,沸石、炉渣和砾石都可以显著降低初期雨水径流中的COD,但由于炉渣层和生物陶粒层出水之间没有显著差异,说明生物陶粒对COD净化效果有限,因此对COD的去除主要靠沸石、炉渣和砾石。其中最主要的是沸石,这是因为沸石层处于首层,溶解氧含量高,加之沸石孔隙结构发达,吸附能力强,所以可以保持较长的与污水接触时间,又具有较大的接触面积,微生物在沸石层生长旺盛,因此有机物去除效率高^[17]。

2.2 氨氮的去除效果

如图4所示,挂膜成功后最终出水氨氮的平均去除率为57.3%,47 d以后去除率大幅上升,最高达到71.2%,最终出水氨氮日均质量浓度为3.43~6.51 mg/L,主要通过挥发、填料本身的物理化学吸附和填料表面微生物的硝化/反硝化作用去除^[18]。总体来说,由于所配制的初期雨水径流中氨氮浓度并不高,所以氨氮的去除效果并不显著。从图5的时间变化来看,4种填料层出水的氨氮浓度变化趋势大致相同,各层对氨氮去除发生在38 d以后。

方差分析发现,与COD的去除类似,也是沸石、炉渣和砾石可以显著降低初期雨水径流中的氨

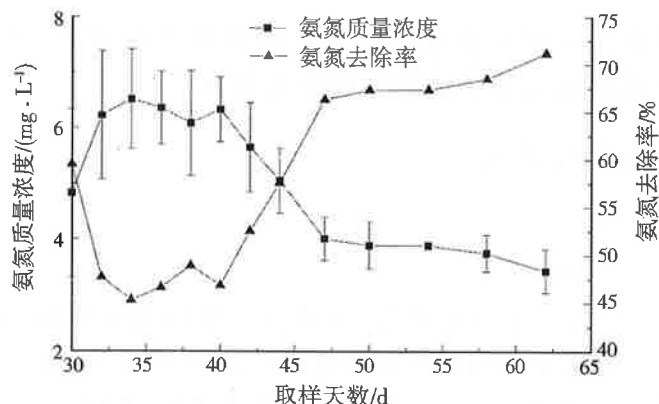


图4 多层复合渗滤系统对氨氮的去除效果

Fig.4 Removal effect on ammonia nitrogen by multi-layer composite infiltration system

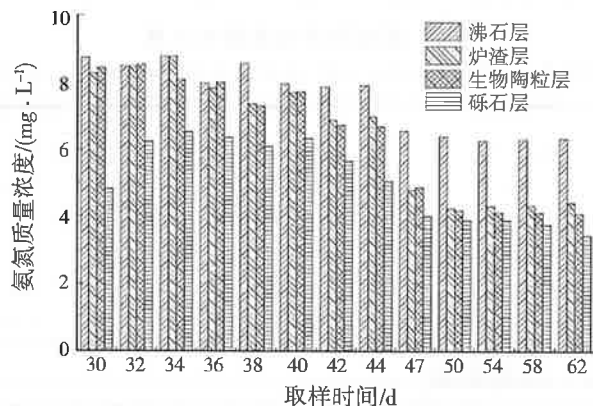


图5 各层出水的氨氮质量浓度变化

Fig.5 Change of ammonia nitrogen mass concentration in each layer effluent

氮,但炉渣层和生物陶粒层出水之间并没有显著差异,说明生物陶粒对氨氮的净化效果较为有限,因此对氨氮的去除主要也靠沸石、炉渣和砾石。本研究设计的多层复合渗滤系统中微生物量也有明显的分层,沸石层溶解氧含量高,形成好氧单元,同时沸石内部发达的孔隙结构为微生物的附着和生长提供了良好的场所,因此硝化细菌生长旺盛,通过硝化反应或亚硝化反应把氨氮转化为硝酸盐或亚硝酸盐,加之沸石具有较大的静电引力,对 NH_4^+ 有着较强的吸附功能^[19]。因此,沸石也是最主要的氨氮去除填料。

2.3 TN的去除效果

如图6所示,挂膜成功后最终出水TN的平均去除率为54.3%,日均质量浓度为6.33~10.66 mg/L。TN主要靠氨氮的挥发以及微生物的反硝化作用将 NO_3^- 转化为 N_2 、 N_2O 等去除^{[16]296}。由于本研究是模拟实验,进水水力负荷较低,因而有机负荷相应较低,反硝化碳源不足,导致TN去除率上不去。从各填料层出水的TN浓度时间变化看(见图7),TN发生去除在44 d以后。

方差分析发现,沸石和砾石能够显著降低初期雨水径流中的TN浓度,但是炉渣和生物陶粒对

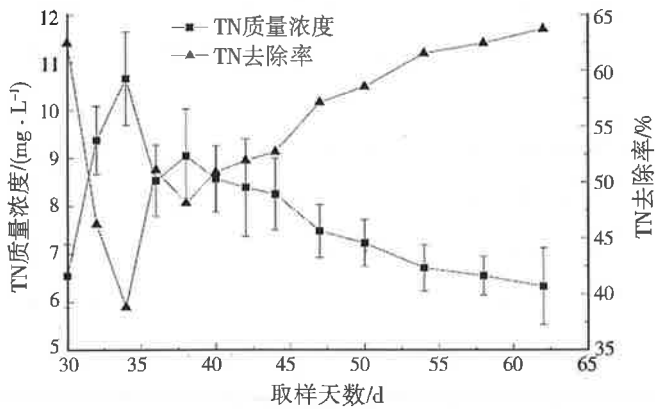


图6 多层复合渗滤系统对TN的去除效果

Fig.6 Removal effect on TN by multi-layer composite infiltration system

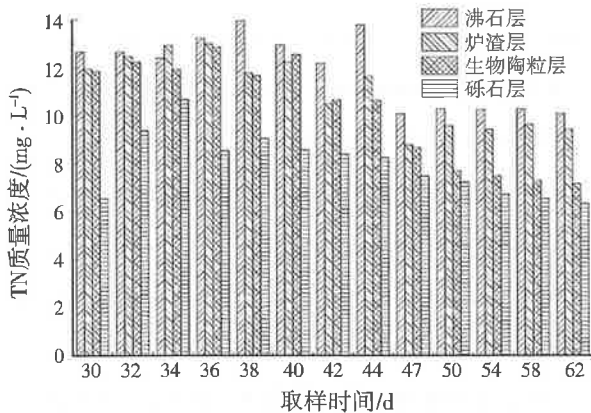


图7 各层出水的TN质量浓度变化

Fig.7 Change of TN mass concentration in each layer effluent

TN的去除效果较差,因此对TN的去除主要靠沸石和砾石。最主要的是得益于沸石层的好氧环境,硝化细菌生长旺盛,促进了氨氮的去除,然而厌氧环境下由于反硝化碳源匮乏,反硝化能力不强,因此TN的去除率低于氨氮,这与LUO等^[20]的研究结果一致。

2.4 TP的去除效果

如图8所示,挂膜成功后最终出水TP的平均去除率为67.6%,日均质量浓度为0.39~0.74 mg/L。TP主要靠各层填料的吸附、化学沉淀以及微生物的作用去除,其中填料的吸附和化学沉淀是最主要的去除机理^[21-22]。研究发现,很多填料对磷有吸附/解吸功能,与填料本身的吸附容量和pH有很大关系^[23-24]。由于模拟实验的pH比较稳定,因此主要是各填料的吸附容量影响了TP的去除效果。从各层填料出水的TP浓度时间变化看(见图9),TP的去除主要发生在36 d以后,在吸附容量达到饱和以后,TP浓度出现了反弹,44 d以后又有增加趋势。

方差分析发现,沸石、炉渣和生物陶粒能够显著降低初期雨水径流中的TP,但是生物陶粒层和砾

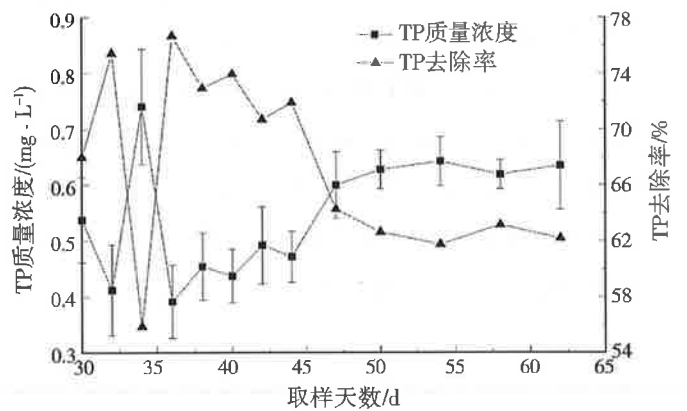


图8 多层复合渗滤系统对TP的去除效果

Fig.8 Removal effect on TP by multi-layer composite infiltration system

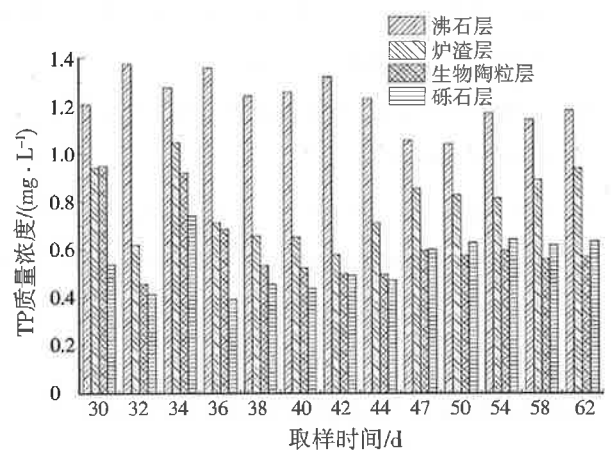


图9 各层出水的TP质量浓度变化

Fig.9 Change of TP mass concentration in each layer effluent

石层出水并没有显著差异,说明砾石对TP的去除效果较差,因此对TP的去除主要靠沸石、炉渣和生物陶粒。炉渣粗糙多孔,具有较大的比表面积,炉渣中的活性氢氧化铁(或铝)基团可与磷酸根反应,能形成难溶化合物^[25],所以炉渣层的总体除磷效果最好。

3 结论

(1) 本研究构建的沸石、炉渣、生物陶粒、砾石4层复合渗滤系统对初期雨水径流中COD、氨氮、TN、TP的平均去除率分别为92.5%、57.3%、54.3%、67.6%。

(2) COD和氨氮的去除主要靠沸石、炉渣和砾石,TN的去除主要靠沸石和砾石,TP的去除主要靠沸石、炉渣和生物陶粒。炉渣的除磷能力最强,沸石对氮和有机物的去除效果最好。

参考文献:

- [1] 徐文强.长江中下游区域土地利用时空变化及其影响因素分析[D].淄博:山东理工大学,2020.

- [2] 钟登杰,张湖川,李林澄,等.城市初期雨水污染及处理措施综述[J].环境污染与防治,2019,41(2):224-230.
- [3] MÜLLER A,ÖSTERLUND H,MARSALEK J,et al.The pollution conveyed by urban runoff:a review of sources[J].Science of the Total Environment,2020,709:136125.
- [4] 宫永伟,张贤巍,翟丹丹,等.简单式绿色屋顶对雨水径流水质的影响规律研究[J].环境污染与防治,2020,42(3):264-267,274.
- [5] FAN G,LIN R S,WEI Z Q,et al.Effects of low impact development on the stormwater runoff and pollution control[J].Science of the Total Environment,2022,805:150404.
- [6] 徐玮瞳,王建龙,武彦杰,等.雨水花园对雨水径流热污染控制效果试验研究[J].水利水电技术,2020,51(9):162-167.
- [7] 黄晨哲.城市雨水人工土壤渗滤技术实验与应用研究[D].北京:北京建筑大学,2012.
- [8] HE Q M,LIN Z Z,DONG P,et al.Decontamination performance of a bioretention system using a simple sand-based filler proportioning method[J].Environmental Technology,2022,43(5):709-717.
- [9] 李丽,陆兆华,王昊,等.新型混合填料人工快渗系统处理污染河水的试验研究[J].中国给水排水,2007,23(11):86-89.
- [10] 卢少勇,刘学欣,李珂,等.模拟生态种植槽去除雨水径流中的磷[J].环境工程学报,2016,10(7):3434-3438.
- [11] 刘学欣,李珂,陈学平,等.模拟生态种植槽对雨水径流的净化[J].环境工程学报,2015,9(6):2681-2686.
- [12] 陈辉霞,刘翔.沸石渗滤床在城市初期雨水径流污染控制的应用研究[J].环境工程学报,2012,6(2):519-522.
- [13] 熊家晴,赵泽宁,葛媛,等.不同基质垂直流人工湿地对高污染河水中磷的去除效果[J].环境化学,2014,33(7):1208-1213.
- [14] CHAI H,CHEN Z,SHAO Z,et al.Long-term pollutant removal performance and mitigation of rainwater quality deterioration with ceramsite and *Cyperus alternifolius* in mountainous cities of China[J].Environmental Science and Pollution Research,2019,26(32):32993-33003.
- [15] 高旺,康威,江强,等.砾石人工湿地处理小区雨水径流的试验研究[J].中国给水排水,2017,33(7):153-156.
- [16] 张毓媛,曹晨亮,任丽君,等.不同基质组合及水力停留时间下垂直流人工湿地的除污效果[J].生态环境学报,2016,25(2).
- [17] 郭俊元,周禹伶,江世林,等.多级土壤渗滤系统处理农村生活污水[J].中国环境科学,2018,38(9):3380-3390.
- [18] COOKE J G.Nutrient transformations in a natural wetland receiving sewage effluent and the implications for waste treatment[J].Water Science and Technology,1994,29(4):209-217.
- [19] WIDIASTUTI N,WU H,ANG M,et al.The potential application of natural zeolite for greywater treatment[J].Desalination,2008,218(1/2/3):271-280.
- [20] LUO W,YANG C,HE H,et al.Novel two-stage vertical flow biofilter system for efficient treatment of decentralized domestic wastewater[J].Ecological Engineering,2014,64:415-423.
- [21] BALLANTINE D J,TANNER C C.Substrate and filter materials to enhance phosphorus removal in constructed wetlands treating diffuse farm runoff:a review[J].New Zealand Journal of Agricultural Research,2010,53(1):71-95.
- [22] HSIEH C,DAVIS A P,NEEDELMAN B A.Bioretenention column studies of phosphorus removal from urban stormwater runoff[J].Water Environment Research,2007,79(2):177-184.
- [23] 罗艳红,李海燕,陈富强.双层填料生物滞留设施对磷的去除效果研究[J].环境污染与防治,2017,39(1):7-10,15.
- [24] RICHARDSON C J.Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands[J].Science,1985,228(4706):1424-1427.
- [25] 袁廷香.城市生活垃圾焚烧炉渣对水质除磷效果研究[J].环境污染与防治,2016,38(7):77-81,92.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2022-04-26)

(上接第505页)

- [18] ZHANG Z M, QIU J X, XIANG R H, et al. Organic loading rate (OLR) regulation for enhancement of aerobic sludge granulation: role of key microorganism and their function[J]. Science of the Total Environment, 2019, 653: 630-637.
- [19] ADOM F, DUNN J B. Material and energy flows in the production of macro and micronutrients, buffers, and chemicals used in biochemical processes for the production of fuels and chemicals from biomass[EB/OL]. [2022-3-15]. <https://greet.es.anl.gov/publication-fuel-chemicals-biomass>.

编辑:陈泽军 (收稿日期:2022-03-18)