

针对西北村镇生活灰水的多介质庭院生态处理技术

曹思雨¹, 狄彦强¹, 冷娟¹, 刘建国², 郑天龙³, 韩云平³, 申晋榕²

- (1. 中国建筑科学研究院, 北京 100013;
2. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051;
3. 中国科学院生态环境研究中心水污染控制实验室, 北京 100085)

摘要: 我国西北地区干旱缺水, 作为非传统水源的生活灰水资源化利用率普遍偏低。针对我国西北村镇居民生活灰水的收集排放情况和水质特点, 结合土壤和多介质滤料对水中污染物的去除效果, 设计多介质庭院生态处理技术, 将处理后居民生活灰水作为农田灌溉水进行利用。设计实验装置以内蒙古呼和浩特市某村居民生活灰水为进水, 连续运行 28 d, 对处理效率进行研究。结果表明, 装置对 COD_{Cr} 的去除率维持在 65% 左右, 阴离子表面活性剂去除率维持在 60% 左右, SS 去除率达到 50% 以上, 并且灰水中的氮元素得到了保留, 用于灌溉可为农作物增添肥效, 论证了该技术在处理西北农村灰水方面的可行性。

关键词: 生活灰水; 多介质滤料; 生态处理; 水处理技术; 西北村镇

中图分类号: X610

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022060014

Multi-media ecological courtyard treatment technology for domestic grey water in villages and towns of Northwest China

CAO Siyu¹, DI Yanqiang¹, LENG Juan¹, LIU Jianguo², ZHENG Tianlong³, HAN Yunping³, SHEN Jinrong²

- (1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Department of Water Pollution Control Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: As a non-traditional water source, the utilization rate of domestic grey water resources is generally low in northwest China due to drought and water shortage. According to the collection and discharge of domestic grey water and water quality characteristics in northwestern villages and towns in China, the multi-medium courtyard ecological treatment technology combining with the effect of soil and multi-media filter material on the removal of pollutants in water was designed. The treated domestic grey water was used as the farmland irrigation water. The experimental device was designed to take the domestic grey water of a village in Hohhot, Inner Mongolia as the inlet water. It operated continuously for 28 days to study the treatment efficiency. The results showed that the removal rate of COD_{Cr} was maintained at about 65%, and the removal rate of anionic surfactant was maintained at about 60%. The SS removal rate reached more than 50%, and the nitrogen element in the grey water was retained, which could increase the fertilizer efficiency of crops for irrigation. The experiment demonstrated the feasibility of the technology in the treatment of grey water in the villages and towns of Northwest China.

Keywords: grey water; multi-media filter media; ecological treatment; water treatment technology; villages and towns of Northwest China

CLC number: X610

随着人民生活水平的提高和“乡村振兴”的大力推进, 近年来我国农村生活污水排放量呈现出飞速增长的趋势, 年排放量达到 202 万吨, 如果不加

治理任其排放, 会对环境带来极大的污染。我国西北地区干旱和半干旱地区面积广大, 河湖稀少, 水资源贫乏, 生活污水未得到有效的资源化利用。同

收稿日期: 2022-06-10 录用日期: 2022-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1100500)

作者简介: 曹思雨(1995—), 女, 硕士、助理工程师。研究方向: 生活污水处理。E-mail: 479776443@qq.com

通信作者: 狄彦强(1980—), 男, 博士、正高级工程师。研究方向: 环境污染控制。E-mail: yanqiangdi@126.com

引用格式: 曹思雨, 狄彦强, 冷娟, 等. 针对西北村镇生活灰水的多介质庭院生态处理技术[J]. 环境保护科学, 2023, 49(3): 62-66.

时,西北地区农村居民居住较为分散,排水管网等设施的建立还不够完善,污水接入管网比例较低,大多生活污水直接排放,需要一种成本低、运维简单方便的处理工艺针对分散式居民生活污水进行适当的处理。目前针对农村生活污水的治理,大多还停留在照搬城市污水处理模式的层面,存在污水处理工艺复杂、基建和运维成本较高等问题^[1]。

国外发达国家已针对分散式农村生活污水进行了大量的实验和研究。美国农村地区分散式污水处理技术包括传统土地处理系统^[2]、生物膜系统、SBR系统、厌氧流化床系统、土地渗滤和人工湿地等,实际应用中多为2种或多种技术组合,以应对不同污水水质、水量情况^[3-4]。欧美发达国家研发的高效藻类塘技术是一种具有自我净化能力的生态系统,其施工投资及运行费用少、便于管理和维护,适用于处理分散式生活污水,但处理效果易受环境影响^[5]。日本研发的净化槽系统简单实用,发展已相当成熟,并根据不同应用场景开发出多种单元工艺的净化槽,包括生物转盘、接触、活性炭吸收和硝化液循环式活性污泥法^[6]等工艺。澳大利亚的分散式生活污水处理技术 FILTER (Filtration and Irrigated cropping for Land Treatment and Effluent Reuse)污水土壤处理系统,能够高效处理生活污水,出水可用于灌溉和地下水补充^[7],但造价较高,推广应用受到限制^[8]。

目前我国针对分散式农村生活污水的处理技术主要有以下类型:人工湿地^[9]、土地处理^[10]、稳定塘、净化沼气池及其他一体化小型污水处理装置。处理分散式农村生活污水,如果一味追求高标准的处理出水水质,需要大量的资金投入,这与我国农村实际经济状况等条件不符。如果将农村生活污水进行就地资源化,与农村水资源实际需求相结合,就能在开发农村生活污水处理模式与解决部分地区农村水资源短缺方面找到突破口。

农村的生活污水主要包括黑水和灰水,灰水产生量最大而污染程度较低,处理后可进行资源化回用。农村常见的厌氧沉淀池、沼气池等处理方式虽然造价低廉、施工简单,但是日常使用中存在处理效果不佳、异味明显的问题^[11];膜生物反应器工艺处理效果较好,但是后期维护成本较高^[12]。且现有的处理工艺较少针对生活灰水进行单独处理,未能形成有效的农村生活污水资源化利用模式^[13]。

本研究设计一种多介质庭院生态处理技术,该技术将微生物代谢和滤料过滤吸附处理机理相结合,以农村居民生活灰水为处理对象,以农田灌溉回用为排放情景。处理装置主要由土壤层和多介质滤料层构成,上层土壤还可种植植物,美化庭院的同时加强污水处理效果。该技术有利于解决西北村镇污水治理率不高且非传统水源利用率普遍偏低的问题,实现良好的节水效果,还可将灰水中利于农作物生长的氮磷元素保留下来,在降低污水处理成本的同时实现资源化利用,带来一定的经济效益。技术针对单户型排水规模进行设计,装置具有模块化特点,可针对具体使用人数组合使用,有助于解决农村居民分散式生活污水难以统一收集处理、水质水量波动大以及缺少专业人员维护水处理设备的问题。

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行方式

为验证处理技术设计的合理性、探究处理装置的污染物去除效率,设计实验室实验进行验证。实验装置由有机玻璃制成,装置具体规格及示意图见图1。其中,滤料区自上而下由砾石(粒径:4~8 mm)、陶粒(粒径:4~8 mm)、沸石(粒径:4~8 mm)按照1:1:1的比例进行填充,底部填充粒径12~14 mm的石英砂作为承托层,由上部多孔配水管进水。顶层填充土壤取自实验基地旁当地土壤。灰水经土壤和滤料的共同处理后,通过底部的出水口进行排水。

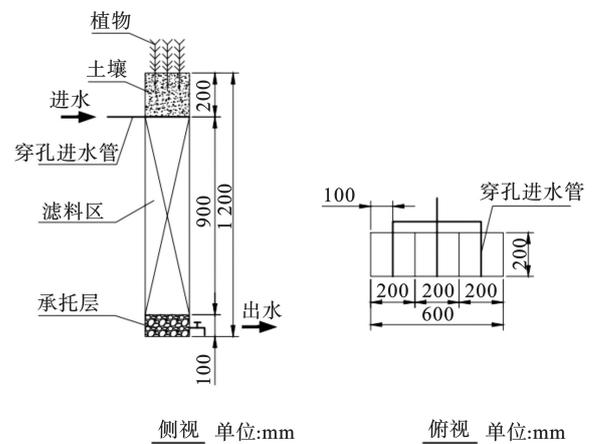


图1 装置具体规格

Fig. 1 Device specifications

装置采用进水-静置反应-出水的方式运行,水力停留时间设置为24 h,实验共运行28 d。每隔3 d

在同一时段取样,进水样本取样后 24 h 对装置出水进行取样,作为一组进出水数据,并进行相关污染物指标的测定,分析装置的污染物去除效果。

1.2 实验用水

本实验用水取自内蒙古呼和浩特市某村居民生活灰水,经沉淀池沉淀后使用,污水水质变化范围见表 1。

表 1 居民生活灰水水质

Table 1 Residential grey water quality $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

检测指标	变化范围
COD	220 ~ 350
氨氮	18 ~ 25
SS	80 ~ 220
阴离子表面活性剂	12 ~ 15
pH	7.5 ~ 7.9

1.3 分析项目及方法

该处理技术针对农村居民生活灰水进行处理,使出水达到《农田灌溉水质标准: GB5084—2021》(下称《标准》),因此实验针对《标准》中的 COD_{Cr} 、SS、阴离子表面活性剂和 pH 进行监测。另外对进出水中的氨氮进行检测,验证装置对进水中氮元素的保留效果。各项指标均采用国家规定的标准方法^[14]进行测定。

2 结果与讨论

2.1 多介质庭院生态处理技术对 COD_{Cr} 的处理

处理装置对进水中 COD_{Cr} 的处理效果,见图 2。

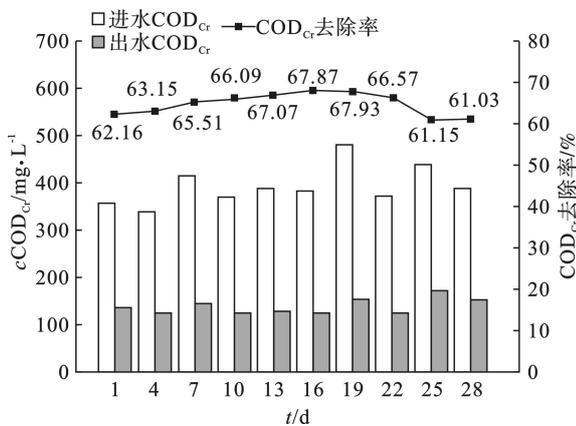


图 2 装置对 COD_{Cr} 的处理效率

Fig. 2 The processing efficiency of the device to COD_{Cr}

图 2 可知,随着实验的进行,装置的处理效果趋于稳定,对进水中 COD_{Cr} 的去除效率略有上升。若仅依靠滤料的吸附作用去除进水中的污染物,随

着时间的推移,滤料的吸附将趋于饱和,装置的去效率应当呈现下降的趋势。而实验结果中 COD_{Cr} 的去除效率并未发生大幅降低,这说明滤料表面在连续运行过程中可能有一定量生物膜的生成,处理过程中,土壤与多介质滤料除了对进水中的污染物进行物理吸附^[15],还通过微生物的代谢作用提升了 COD_{Cr} 去除效率。整个实验过程的最后 2 次取样检测结果发现,装置对 COD_{Cr} 的处理效率略有下降,可能是由于实验基地地区逐渐进入冬季,环境温度的降低影响了装置内部微生物的活性^[16]。实验期间实验基地地区温度日变化,见图 3,实验污染物浓度去除效率变化曲线与其趋势相接近。

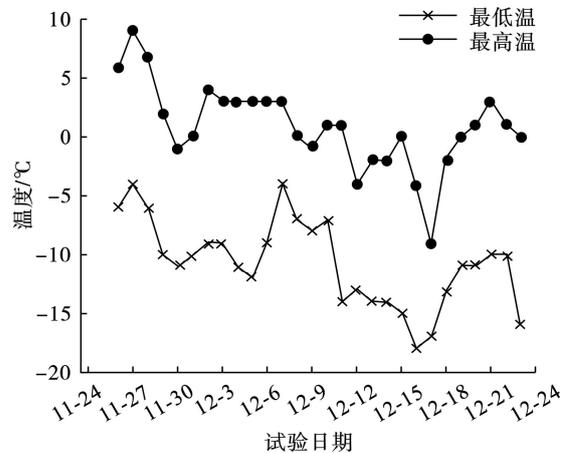


图 3 实验基地温度日变化

Fig. 3 The temperature of the experimental base

与其他带有曝气环节的处理工艺相比,本实验处理装置的 COD_{Cr} 去除率较低,去除率范围在 61% ~ 68%,但出水 COD_{Cr} 浓度能够满足《标准》中灌溉旱作农作物的要求,且由于处理过程中不需要曝气,减少了能源的消耗,较适合西北农村地区应用。通常西北农村居民生活灰水中不包含冲厕带来的粪便水,因而水质中 COD_{Cr} 浓度较低,经本装置处理后的出水能够满足《标准》要求。

2.2 多介质庭院生态处理技术对氨氮的处理

实验装置出水氨氮浓度的变化情况,见图 4。相较于进水氨氮浓度来说,出水氨氮浓度虽然呈现一定波动性的变化,但是就整个实验过程来看,出水氨氮浓度并没有出现较大幅度的下降,这与其他生活污水处理技术的处理效果不同,以往研究中对氨氮的去除率通常在 50% 以上^[17-18]。

有研究表明,氨氮作为一种无机氮,有利于被农作物吸收利用^[19]。因此保留进水中的氨氮并将出水用于农田灌溉,一方面降低了污水处理过程中的能耗,另一方面也使得污水资源得到再次利用。

因为本技术设计的处理流程中不存在曝气环节,装置中的污水始终处在缺氧甚至厌氧的条件下,氨氮的代谢路径缺失,故能够保留进水中的氨氮,利于后续灌溉回用,为农作物增加肥效。由于土壤中含有多种微生物,进水流经土壤时,会发生微生物对氨氮的代谢作用^[20],使氨氮的浓度出现一定波动,当水解酸化总氮生成的氨氮含量低于微生物的代谢吸收量时,就可能会出现出水中氨氮浓度减少的情况,这是本实验中出水氨氮浓度不总是增加的原因。有研究表明,沸石对氮元素具有较好的处理效果。本实验中沸石对氨氮的去除效果并不明显,可能因为多介质滤料中沸石部分的比例仅为 33.3%,另一方面由于实际生活灰水中污染物组成较为复杂,可能造成沸石的吸附点位被其他有机物占据,降低了沸石对氮元素的吸附能力,使得进水中的氮元素作为肥效资源得到了一定程度的保留。吴晓莺等^[18]所研究的人工湿地处理农村生活污水中,氨氮去除率达到 54.2%~69.4%,可能是由于处理过程中能够更多地借助氧气实现硝化作用,因而更多地实现了氨氮的去除而非保留。

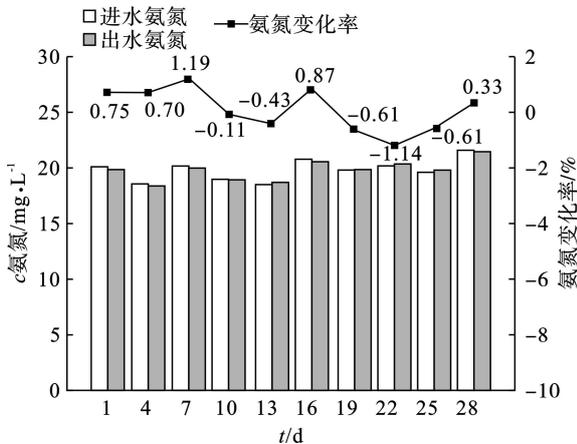


图 4 装置处理前后氨氮浓度变化

Fig. 4 The change in ammonia nitrogen concentration after the device treatment

实验结果表明,经多介质庭院生态处理技术处理后的污水,通过减少处理过程中消耗氨氮的反应路径,能够得到较好地保留进水中的氨氮,增加出水后续灌溉利用的肥效。

2.3 多介质庭院生态处理技术处理灰水的其他指标

实验装置对阴离子表面活性剂的处理效率,见图 5。在实验过程中,装置出水的阴离子表面活性剂浓度能够符合旱田作物的农田灌溉水质标准。

直链烷基苯磺酸盐 (linear alkylbenzene sulfonates, LAS) 应用广泛,是一种典型阴离子表面活性剂^[21],在生活污水中的质量浓度一般为 3~20

mg/L。有研究表明,在污水处理过程中 LAS 会有一定程度的降解,但受自身结构及所处环境(好氧或厌氧)影响,其降解程度不一^[22]。任刚等^[23]通过对 LAS 和浊度、COD 去除相关关系进行分析,认为 LAS 在水中主要以和其他有机物结合的方式存在,因此对污水中 LAS 的去除和对有机物的去除存在统一性。郭伟等^[24]研究认为,在人工快滤系统中,LAS 的去除效果与土层深度有关,因此认为 LAS 的去除主要通过土壤的吸附来实现。

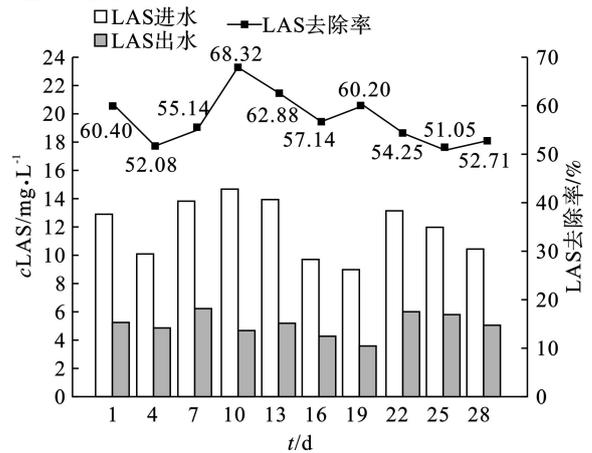


图 5 装置对阴离子表面活性剂的处理效率

Fig. 5 The processing efficiency of the device to LAS

实验装置对 SS 的处理效率,见图 6。在 28 d 的实验过程中,装置出水 SS 在前 7 d 略高于农田灌溉水质标准要求,随后出水 SS 有所下降,初期可能是由于滤料清洗过程中有残留细杂质未冲洗干净,之后随着进水的冲洗,有一定量的微生物生长附着在多介质滤料的空隙处^[25],提高了装置对 SS 的截留效果。但随着微生物的世代更替,可能会有脱落生物膜随出水流出,造成出水 SS 升高,若装置在实际应用中存在 SS 高于标准要求的情况,可以考虑在装置出水口处加装过滤网,或出水经适当的沉淀处理后作为灌溉水使用。

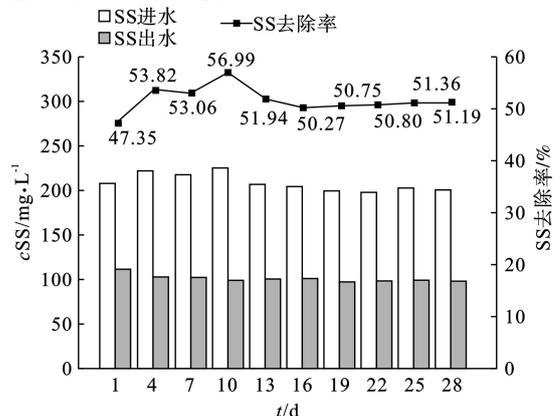


图 6 装置对 SS 的处理效率

Fig. 6 The processing efficiency of the device to SS

3 结论与展望

多介质庭院生态处理技术通过结合微生物代谢和滤料过滤吸附等处理机理,在无需外加药剂及能源投入的情况下,对西北农村分散式居民生活灰水能够实现较好的处理效果, COD_{Cr} 的去除率维持在 65% 左右,阴离子表面活性剂去除率维持在 60% 左右,SS 去除率达到 50% 以上。

该工艺主要针对处理生活灰水进行设计,实际应用中应与“黑灰分离”式污水处理系统相结合进行应用。该工艺建设简单、维护较少,适合于西北农村地区的实际情况,且灰水中有利于农作物生长的氮元素得到了保留,用于灌溉可为农作物增添肥效,带来一定的经济效益。同时,处理装置具有模块化的特点,可根据不同居民排水量的不同进行设计,多个模块进行组合串并联使用,在居民生活灰水量减少的季节,通过控制水阀的开闭选择投入使用的处理模块数量,应对进水水质、水量的波动。

由于西北地区具有冬季气候寒冷,冬寒时间长的特点,而低温状态下由于植物生长停滞和微生物活性降低,该工艺的处理效果会受到影响,在实际应用中还应对设备的保温方面进行考虑。如在地表设置温室大棚,或将地表种植的植物收割后用于覆盖保温。同时也可在大棚中种植经济作物,实现原位资源化利用,同时提升工艺的经济价值。

参考文献

- [1] 万玉山,张平,李定龙,等.农村生活污水处理模式的选择分析[J].农业科学与技术:英文版,2011,12(4):597-599.
- [2] 周莉,王倩,李焱.美国农村分散式污水治理的经验及启示[J/OL].农业资源与环境学报:1-11.[2022-10-31].DOI:10.13254/j.jare.2022.0101.
- [3] CURNEEN S, GILL L. Upflow evapotranspiration system for the treatment of on-site wastewater effluent[J]. *Water*, 2015, 7(12): 2037-2059.
- [4] E ANDA J, LÓPEZ-LÓPEZ A, VILLEGAS-GARCÍA E. High-strength domestic wastewater treatment and reuse with onsite passive methods[J]. *Water (Basel)*, 2018, 10(2): 99.
- [5] DONNA L S, PETER J R. 15 years of research on wastewater treatment high rate algal ponds in New Zealand: discoveries and future directions[J]. *New zealand journal of botany*, 2020, 58(4): 334-357.
- [6] PENG J, YINYAN C, TAO X, et al. Efficient nitrogen removal by simultaneous heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacterium in a purification tank bioreactor amended with two-stage dissolved oxygen control[J]. *Bioresource technology*, 2019, 281: 392-400.
- [7] SHAMSA K, MUHAMMAD S, HAMZA F G, et al. Towards sustainable wastewater management: A spatial multi-criteria framework to site the Land-FILTER system in a complex urban environment[J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 266: 121987.
- [8] 王丽媛,孙洁梅,叶镭.农村生活污水分散式处理现状与思考[J].*四川环境*,2015,34(2):74-75.
- [9] 王文明,危建新,戴铁华,等.人工湿地运行管理关键技术探讨[J].*环境保护科学*,2014,40(3):24-28.
- [10] 艾平,张衍林,袁巧霞.农村生活污水分散式处理技术浅析[J].*环境保护科学*,2008,34(6):8-10.
- [11] 李文凯,郑天龙,刘俊新.农村灰水收集-处理-回用系统现状及应用建议[J].*工业水处理*,2022,42(4):1-6.
- [12] 谭海威.农村生活污水分散式处理系统与实用技术的思考[J].*环境与发展*,2018,30(7):66-67.
- [13] 李无双,王洪阳,潘淑君.农村分散式生活污水现状与处理技术进展[J].*天津农业科学*,2008(6):75-77.
- [14] 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,2002:100-124.
- [15] 武俊梅,王荣,徐栋,等.垂直流人工湿地不同填料长期运行效果研究[J].*中国环境科学*,2010,30(5):633-638.
- [16] 陈翰,马放,李昂,等.低温条件下污水生物脱氮处理研究进展[J].*中国给水排水*,2016,32(8):37-43.
- [17] 古腾,吴勇,王橹橹.曝气生物滤池-模块化人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J].*环境工程*,2018,36(1):20-24.
- [18] 吴晓莺,杜悦矜,周林艳,等.模块化填料人工湿地处理农村生活污水[J].*环境工程学报*,2019,13(3):664-671.
- [19] 孙成斌.什么形态的氮容易被作物吸收[J].*化学教育*,2002(5):3-4.
- [20] 黄玉珠,万红友.污水土地处理技术的优势及其应用前景[J].*环境科学导刊*,2008(6):71-75.
- [21] 郝晓地,杨振理,李季.疫情背景下污水中的表面活性剂对污水处理效果的影响与机理[J].*环境工程学报*,2021,15(6):1831-1839.
- [22] KUMAR M A, KUMAR P. Fate of linear alkylbenzene sulfonates in the environment: A review[J]. *International biodeterioration & biodegradation*, 2009, 63(8): 981-987.
- [23] 任刚,崔福义,林涛,等.常规混凝沉淀工艺对阴离子表面活性剂的去除研究[J].*给水排水*,2004,30(7):1-6.
- [24] 郭伟,李培军,尹炜,等.阴离子表面活性剂(LAS)在人工快滤系统中的去除[J].*辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*,2006,25(2):283-285.
- [25] 郭俊元,周禹伶,江世林,等.多级土壤渗漏系统处理农村生活污水[J].*中国环境科学*,2018,38(9):3380-3390.