

生物滴滤塔/景观滤床工艺高效处理农村污水

刘梦雪, 曾非凡, 文红平, 林学明, 杨小明, 任宗玲, 李永涛, 张振

引用本文:

刘梦雪, 曾非凡, 文红平, 等. 生物滴滤塔/景观滤床工艺高效处理农村污水[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1094–1102.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1311>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

农村生活污水陶瓷膜-生物反应器处理工艺强化脱氮除磷研究

唐舒雯, 纪婧, 王梦娴, 陈佳仪, 李旭东, 邱江平

农业环境科学学报. 2019, 38(5): 1121–1129 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1166>

用于农村污水安全灌溉的新型氮磷无机化反应器的实验研究

周超群, 吴磊, 李先宁, 洪月菊, 张佳杰

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1443–1450 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0231>

黄腐酸钾对植烟土壤氮素转化及 N_2O 排放的影响

李青山, 王德权, 高政绪, 杜传印, 管恩森, 程谊, 王慎强

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1130–1139 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1188>

不同氮钾水平及氮形态差异对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响

夏淑洁, 刘闯, 袁晓良, 李俊雅, 李林洋, 张润琴, 李志国

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1122–1129 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1220>

不同基质厌氧折流-垂直流人工湿地(ABR-VFW)对农村生活污水的处理效果

刘娟, 谢雪东, 张洋, 雷平, 顾儒馨, 倪九派

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1758–1766 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1442>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘梦雪, 曾非凡, 文红平, 等. 生物滴滤塔/景观滤床工艺高效处理农村污水[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1094–1102.

LIU Meng-xue, ZENG Fei-fan, WEN Hong-ping, et al. An efficient trickling filter/landscape biofilter-bed technique for rural domestic sewage treatment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1094–1102.



开放科学 OSID

生物滴滤塔/景观滤床工艺高效处理农村污水

刘梦雪¹, 曾非凡¹, 文红平¹, 林学明¹, 杨小明¹, 任宗玲¹, 李永涛^{1,2}, 张 振^{1*}

(1. 华南农业大学资源环境学院, 中英环境科学研究中心, 广州 510642; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要:农村生活污水处理对于改善农村人居环境具有重要意义。本研究通过“小试-中试-工程应用”尺度下一系列试验研究, 探索出一套新型高效生物滴滤塔/景观滤床污水净化工艺(ETF/LBb)。通过小试吸附和挂膜试验筛选合适的填料, 以实验室模拟生活污水, 进行处理规模为 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的生物滴滤池改良优化中试试验, 继而以学生宿舍区真实生活污水开展处理规模 $50 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的 ETF/LBb 工艺的工程应用试验。小试结果表明: 由工业及建筑废料改性而成的除磷填料和除氮填料具有较强的氮磷吸附能力, 对 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的饱和吸附量分别为 $1.0 \text{ mg N} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $2.3 \text{ mg P} \cdot \text{g}^{-1}$, 泥岩填料具有较好的微生物挂膜能力。中试结果表明: 除磷填料、除氮填料和泥岩在同一条件下对生活污水中的 NH_4^+ 、 COD_Cr 、TP、TN 的去除率在 88.9%、89.9%、67.8%、61.52% 以上。工程应用试验结果表明: 处理后的生活污水可以稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 排放标准, 工艺运行费用 $< 0.10 \text{ 元} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。ETF/LBb 工艺具有造价低、污水处理效率高和节省人工等特点。

关键词:农村生活污水; ETF/LBb; 生物填料; 氮磷吸附; 微生物挂膜

中图分类号: X505 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)05-1094-09 doi:10.11654/jaes.2019-1311

An efficient trickling filter/landscape biofilter-bed technique for rural domestic sewage treatment

LIU Meng-xue¹, ZENG Fei-fan¹, WEN Hong-ping¹, LIN Xue-ming¹, YANG Xiao-ming¹, REN Zong-ling¹, LI Yong-tao^{1,2}, ZHANG Zhen^{1*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Joint Institute for Environmental Research & Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: It is of utmost importance to effectively treat rural domestic sewage to improve the rural living environment. In the present study, a novel technique, i.e., efficient trickling filter/landscape biofilter-bed (ETF/LBb) was explored through a series of experiments conducted at lab scale, pilot scale (simulated domestic wastewater and treatment capacity of $1 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$), and finally at large scale (sanitary sewage from student dormitories and treatment capacity of $50 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$). The lab-scale adsorption and biofilm formation experiments implied that nitrogen- and phosphorus-removal fillers derived from industrial and construction wastes could effectively adsorb nitrogen and phosphorus with maximum adsorption capacities of $1.0 \text{ mg N} \cdot \text{g}^{-1}$ and $2.3 \text{ mg P} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Besides, biofilm was significantly formed in the argillaceous limestone-derived filler. In pilot-scale, the modified biofilters containing nitrogen- and phosphorus-removal fillers, as well as argillaceous limestone, could effectively remove COD_Cr , NH_4^+ , TN, and TP from wastewater with removal efficiencies above 88.9%, 89.9%, 67.8%, and 61.52%, respectively. In the large-scale experiment, the effluent from the ETF/LBb-based sewage treatment chain could effectively meet the stringent national discharge standards (Class I, Grade A) with the investment below $0.1 \text{ yuan} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. It can be concluded that ETF/LBb has promising application prospects in rural areas because of its advantages that include compact space, high treatment efficiency, and labor-saving nature.

Keywords: rural domestic sewage; efficient trickling filter/landscape biofilter-bed (ETF/LBb); bio-filler; nitrogen and phosphorus adsorption; biofilm formation

收稿日期: 2019-11-28 录用日期: 2020-01-21

作者简介: 刘梦雪(1994—), 女, 江苏江都人, 硕士研究生, 研究方向为农村污水处理及面源污染防控。E-mail: 745012064@qq.com

*通信作者: 张 振 E-mail: zzhangal@scau.edu.cn; zhangzhen_23102@163.com

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B020218002); 国家重点研发计划课题(2017YFD0800103)

Project supported: Research & Development Program of Key Field of Guangdong Province, China (2019B020218002); The National Key R&D Program of China (2017YFD0800103)

随着我国农村经济的迅猛发展,农民的生活水平不断提高,然而大部分农村地区仍然没有较为完善的污水收集和处理系统,未经处理的生活污水直接排放至周边自然水体中,对农村环境造成了严重污染^[1-2]。近两年来,农村环境治理已成为国家非常重视的一项工作,2018年《国家乡村振兴战略规划》(2018—2022)明确提出了“以农村垃圾、污水治理和村容村貌提升为主攻方向,全面提升农村人居环境质量”的发展要求^[3]。2019年中央一号文件中更是将农村生活污水的处理列入改善农村人居环境的重要工作内容^[4]。

在国家各项政策的积极扶持下,农村污水处理设施的建设节奏虽得到一定程度的加快,但同时已建成的处理设施又出现了运行率低、处理达标率低等诸多新的问题,而缺少真正适用于我国农村地区的污水处理技术是其主要原因之一。相对于城镇生活污水,农村生活污水具有水量小但排放分散等特点,同时由于技术管理水平和经济水平受限,农村污水处理不能过分依赖现场技术人员,且建设与运维成本不能过高^[5]。A²O工艺因其运行稳定、兼具脱氮除磷功能等优势长期以来广泛被城镇污水处理厂所采用^[6],然而该工艺存在能耗高、需要定期排泥等弊端^[7-8],因而限制了其在农村生活污水处理中的应用^[9]。人工湿地工艺虽能够降低运行维护所需的人工和成本,但容易堵塞、占地面积大^[10],且处理效率往往不能达标^[11]。MBR工艺具有占地面积小,运行维护方便和污泥产量少等特点,近些年,在农业污水处理中逐渐得到重视,但是该工艺存在使用年限短(一般在3~5 a)且除磷效果不理想等问题^[12]。日本久保田净化槽技术在MBR工艺的基础上结合A²O工艺及定期反冲洗等智能化控制,使得这种膜式净化槽处理技术不仅具备了MBR的优点,同时除磷效果大大提高,且膜使用的寿命可以延长至8 a,干钢等^[13]利用该技术处理安吉县山川乡续目村生活污水及餐饮废水,COD_{Cr}、NH₄⁺和TP的平均去除率可以分别达到83.64%、97.94%和94.13%,出水水质符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)规定的一级A标准。然而该工艺的处理量为25 m³·d⁻¹,占地74.4 m²,总造价59.8万元,其运行成本高达0.63元·m⁻³,因而并不适合我国农村地区的经济现状,难以大规模推广应用。

近年来,生物滴滤工艺因其抗冲击负荷能力强、无需人工等优点,逐渐引起国内学者们的兴趣^[14]。陈昉等^[5]通过改变传统生物滴滤池中的滤料,研发了一

种新型的蚯蚓生物滴滤池,将上层设置为蚯蚓分解处理层,蚯蚓可以提高土壤通气透水性能和促进有机物质的分解转化,该工艺对污水中COD_{Cr}、BOD₅和SS去除率分别可以达到80.5%、87.5%和93.2%。目前,生物滴滤工艺中常用的填料对污染物的吸附没有选择性且挂膜能力普遍较低,且单独使用生物滴滤工艺,出水水质无法稳定达到一级A标准^[16]。李星星等^[17]采用以炉渣为填料的塔式生物滤池处理农村生活污水,进水方式采用连续进水,出水的COD_{Cr}、NH₄⁺、TN、TP达到一级A标准。Li等^[18]采用装有生物炭芯片的两相生物滴滤池来处理高氮磷废水,也是通过改变滤池填料来降低污水中的氮磷。因此,本文的主要研究目的为筛选和优化功能性填料,并将生物滴滤工艺与其他工艺相结合,探索出一套适用于农村生活污水处理的新技术。首先通过小试试验,合成并筛选出具有氮磷吸附能力的功能性生物填料;在中试尺度下改良型生物滴滤工艺,并根据小试筛选出的填料进一步进行筛选和效果验证;建立工程应用基地,将中试研究中改良结构的生物滴滤工艺和筛选出的填料组合成高效生物滴滤塔,后端与滤床工艺相结合,形成高效生物滴滤塔/景观滤床污水净化工艺(Efficient trickling filter/Landscape Biofilter-bed,ETF/LBb),评估该工艺在农村生活污水处理方面的应用前景。通过上述研究,预期获得最优的生物滴滤池组合工艺,为生物滴滤池的改良优化提供直接的实践依据,并为推进农村生活污水治理、补齐农村人居环境短板、加快建设美丽宜居乡村提供技术支持和理论基础。

1 材料与方法

1.1 填料选择

通过实验室小试尺度下的静态烧杯试验,以单一目标污染物配制的溶液作为原水,筛选、合成及优化功能性生物填料,筛选填料有火山岩、沸石、生物陶粒、轻质生物陶粒、建筑陶粒、椰壳活性炭、柱状活性炭、松树皮、石英砂、生物陶环、细菌屋、砂岩、泥岩和页岩,填料成本和填料是否可以本土化为主要筛选条件,初步筛选出生物陶粒、建筑陶粒、石英砂、砂岩、泥岩和页岩作为备选填料进行下一步吸附试验及生物挂膜试验。此外课题组自主研发了除磷填料和除氮填料,两种填料主要来源于工业及建筑废料,除磷填料由粉煤灰材料通过CO₂气体活化、在控温条件下添加氧化镁和氯化钙改性而成。除氮填料则由钢渣、铁渣和浮岩以一定比例混合后,混合黏土及水并添加硫

酸亚铁在 500 ℃ 条件下烧制而成。

1.2 小试试验-吸附试验及生物挂膜试验

吸附试验中,需准确称取每种候选填料 10 g,投加至 50 mL 不同浓度的 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 溶液中,将溶液转移至锥形瓶中,在室温 23 ℃、转速 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下,放于恒温摇床中振荡 24 h,静置 15 min 后取上清液过滤,检测吸附后水样的 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 等指标,并根据其残留浓度计算不同填料对每种污染物的吸附量。生物挂膜试验采用活性污泥挂膜,活性污泥采自东莞污水处理厂,将采集的活性污泥放入 200 L 的塑料箱中闷曝 1 d,第 2 d 进 30% 配制的模拟生活污水,驯化 2 d 后进行填料挂膜,将填料和驯化后的活性污泥放入容器中进行连续曝气 2~3 d,填料表面可见到黄褐色絮状物即为挂膜成功,吸附和挂膜试验每组各设置 3 组平行。

1.3 中试试验-生物滴滤塔试验

根据小试(吸附试验及生物挂膜试验)结果,筛选出除磷填料、除氮填料和泥岩开展中试尺度下的生物滴滤塔试验。如图 1 所示,生物滴滤塔的主体呈塔式结构,由上至下为若干个由塑料筐组成的独立单元,这样既有利于好氧段和除磷段的通风,也方便在运行过程中取换填料,使得整个生物滴滤系统不易堵塞。生物滴滤塔的污水处理规模约为 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。塔式结构的顶端安装布水器,从调节池抽出的污水由管道送至布水器,再由布水器均匀喷洒到滴滤池顶部的好氧段。采用实验室配制的模拟生活污水,其中碳源采用葡萄糖,氮源采用氯化铵,磷源采用磷酸氢二钾, C:N:P=100:5:1,试验过程中收集并分析进出水中的

COD_{Cr} 、 NH_4^+ 、TN 和 TP。

1.4 工程应用试验-污水净化技术工程应用基地的实验设置

基于小试筛选出的填料以及中试下的改良型生物滴滤塔,结合生物滤床工艺形成一套新型的高效生物滴滤池/景观滤床污水净化工艺(ETF/LBb),并据此建立污水净化技术工程应用基地,原水采用 3—6 月期间华南农业大学校园学生公寓的真实生活污水,气温在 22~26 ℃,原水水质的 COD_{Cr} 为 $60 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 BOD_5 为 $31.4 \sim 35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 NH_4^+ 为 $48 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TN 为 $55 \sim 85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 NO_3^- 为 $0.75 \sim 1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TP 为 $3.0 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、SS 为 $89.2 \sim 90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 值为 6.5~7.5。

工程应用基地的实体及工艺示意图如图 2 所示,ETF/LBb 系统污水处理规模为 $50 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,占地面积约



图 1 改良型生物滴滤塔中试反应器

Figure 1 Picture of the pilot-scale modified biofilter reactor

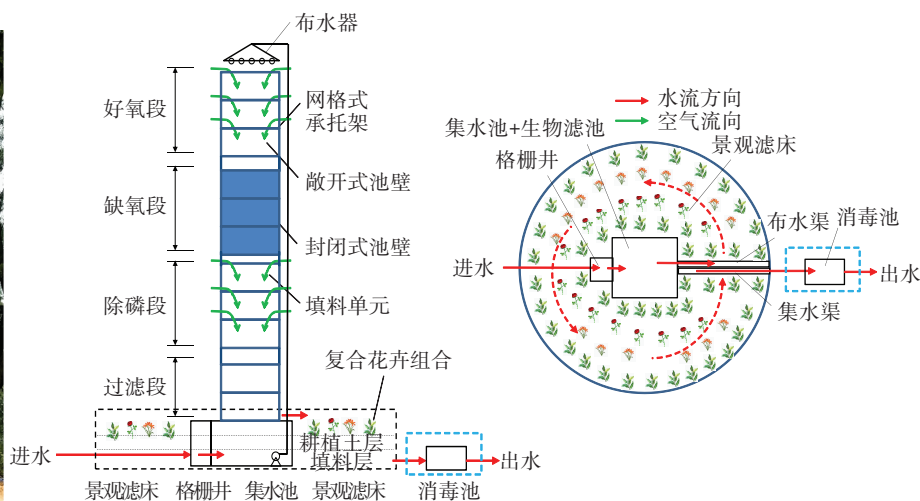


图 2 高效生物滴滤塔/景观滤床工艺示意图

Figure 2 The schematic diagram of ETF/LBb process

为52.8 m²,共分为3级处理单元,其中一级处理单元为人工格栅和调节池,人工格栅作为物理拦截,对污水中的漂浮物、较大悬浮物进行初步的拦截处理,调节池用于调节原水的水质水量,调节时间为14.7 h;二级处理(生化处理)单元为改良型的高效生物滴滤塔,采用除磷填料、除氮填料和泥岩作为组合填料,填料总体积为12.34 m³,容积负荷为1.62 m³·m⁻³·d⁻¹,启动过程中采用活性污泥进行挂膜;三级处理(深度处理)单元为景观滤床,滤床创新采用环状的主题设计,显著缩小了占地面积,有效容积为24.9 m³,水力停留时间为29.9 h,滤床下层采用筛选出的除磷填料,上层以鸢尾、菖蒲和美人蕉组合作为滤床植物。工程应用基地运行情况基本稳定后开始对进水、生物滴滤池出水 and 滤床出水进行采样研究,采样频率为每日采样一次,测定参数主要包括COD_{Cr}、BOD₅、NH₄⁺、TN、TP和SS。

1.5 试验检测项目与方法

水质检测指标中COD_{Cr}采用重铬酸钾法测定、NH₄⁺采用纳氏试剂分光光度法测定、NO₃⁻采用紫外分光光度法测定、TN采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定、TP采用钼锑抗分光光度法测定、pH采用玻璃电极法测定,均依据《水和废水监测分析方法》^[19],此外,

填料的表征分析采用能量色散X射线光谱仪(Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS)和扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)^[20]。

2 结果与讨论

2.1 小试尺度下的吸附试验及生物挂膜试验结果

图3为小试尺度下各填料的吸附试验结果。对于NH₄⁺而言,页岩的吸附能力相对最强,吸附量约为0.7 mg N·g⁻¹,其次是除氮填料和火山岩。对于NO₃⁻而言,除氮填料的吸附能力明显优于其他备选填料,对NO₃⁻吸附量约为1.0 mg N·g⁻¹,次之为除磷填料、页岩以及泥岩;除磷填料对PO₄³⁻的吸附效果最好,吸附量可以达到2.3 mg P·g⁻¹;其次是除氮填料,对PO₄³⁻的吸附量也可达到1.0 mg P·g⁻¹;各填料生物挂膜的试验结果见图3,可以看出,单位质量的填料挂膜后泥岩的微生物量达到41.4 nmol P·g⁻¹,这说明泥岩的生物挂膜能力优于其他备选填料。

如图4所示,除磷填料中含有大量的Al³⁺、Ca²⁺等阳离子,这些阳离子能够与污水中的PO₄³⁻发生反应,形成难溶解性的磷酸盐沉淀物^[21]。此外除磷填料还具有较高的孔隙率,因此,除磷填料对PO₄³⁻具有显著

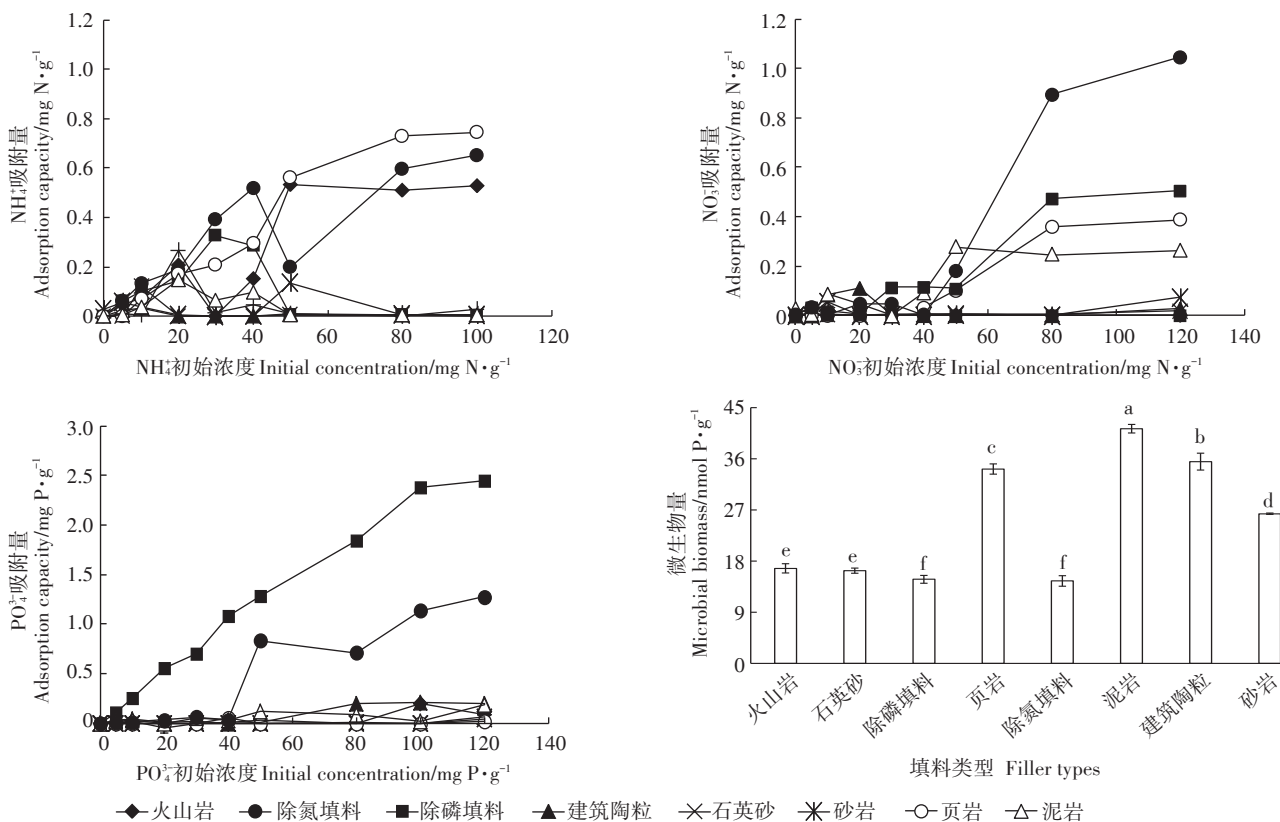


图3 不同备选填料对NH₄⁺、NO₃⁻及PO₄³⁻的吸附量和生物挂膜能力

Figure 3 The adsorption capacities and biofilm capacity of NH₄⁺, NO₃⁻, and PO₄³⁻ by different fillers

的吸附效果;除氮填料中 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 的含量高, Al^{3+} 和 Fe^{2+} 被广泛应用在污水的脱氮除磷的处理上^[22], 除氮填料在处理污水过程中发生了大量的化学置换反应。泥岩是一种碳酸盐矿物, 其主要成分白云岩 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 所占比例约为 25.6%^[23], 黏土矿物约占 12.2%, 吸附试验发现泥岩对 NO_3^- 具有一定的吸附能力, 但对 PO_4^{3-} 和 NH_4^+ 的吸附不显著。泥岩所含黏土矿物的晶体结构有利于微生物附着, 且从图 4(c) 可知, 泥岩富含大量微生物所需的微量矿物元素^[24], 因此泥岩的微生物挂膜能力显著优于其他备选填料。

对比石英砂和火山岩等广泛使用的传统填料而言, 课题组所研发的除磷填料及除氮填料不仅可以更加高效地吸附 NH_4^+ 、 NO_3^- 及 PO_4^{3-} , 而且具有较好的专性吸附能力(即除磷填料主要针对 PO_4^{3-} 的吸附, 而除氮填料主要针对 NO_3^- 和 NH_4^+ 的吸附), 因而可以结合不同地区污水中氮磷浓度特点有针对性地配比除磷及除氮填料以达到最佳的污水处理效果, 再结合两种填料成本低、容易本地化等优势, 因此具备了替代传统填料的可能性。此外, 泥岩、砂岩和页岩也展示了其在

不同方面优越性, 这些岩石矿物在环境中大量存在, 容易取得且加入到环境中不会产生二次污染等问题, 因此在污水处理领域同样具有潜在的应用价值, 有待于进一步的研究。

2.2 中试尺度下的生物滴滤塔试验结果

图 5 为中试尺度下的生物滴滤塔运行结果, 其中滤塔 1# 采用除磷填料, 滤塔 2# 采用除氮填料, 滤塔 3# 采用泥岩, 3 种填料经驯化后的活性污泥进行挂膜后开始运行, 3 种填料对 COD_{Cr} 和 NH_4^+ 的去除效果均较好, 出水 COD_{Cr} 和 NH_4^+ 均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 规定的一级 A 标准。从本次中试滴滤试验结果来看, 试验运行约一周后, 3 种填料表面均发现了浅白色黏膜, 这说明 3 种填料挂膜成功, 3 种填料在同一条件下对 COD_{Cr} 的高效去除效果也证实了这种结果, 采用活性污泥挂膜技术可以使填料表面有效形成一层富含异养硝化细菌的生物膜, 这也意味着试验中微生物在对模拟生活污水的处理中起着重要作用, 生物滴滤塔对污水的高效处理可能是因为硝化细菌等功能性微生物和填料本身在化

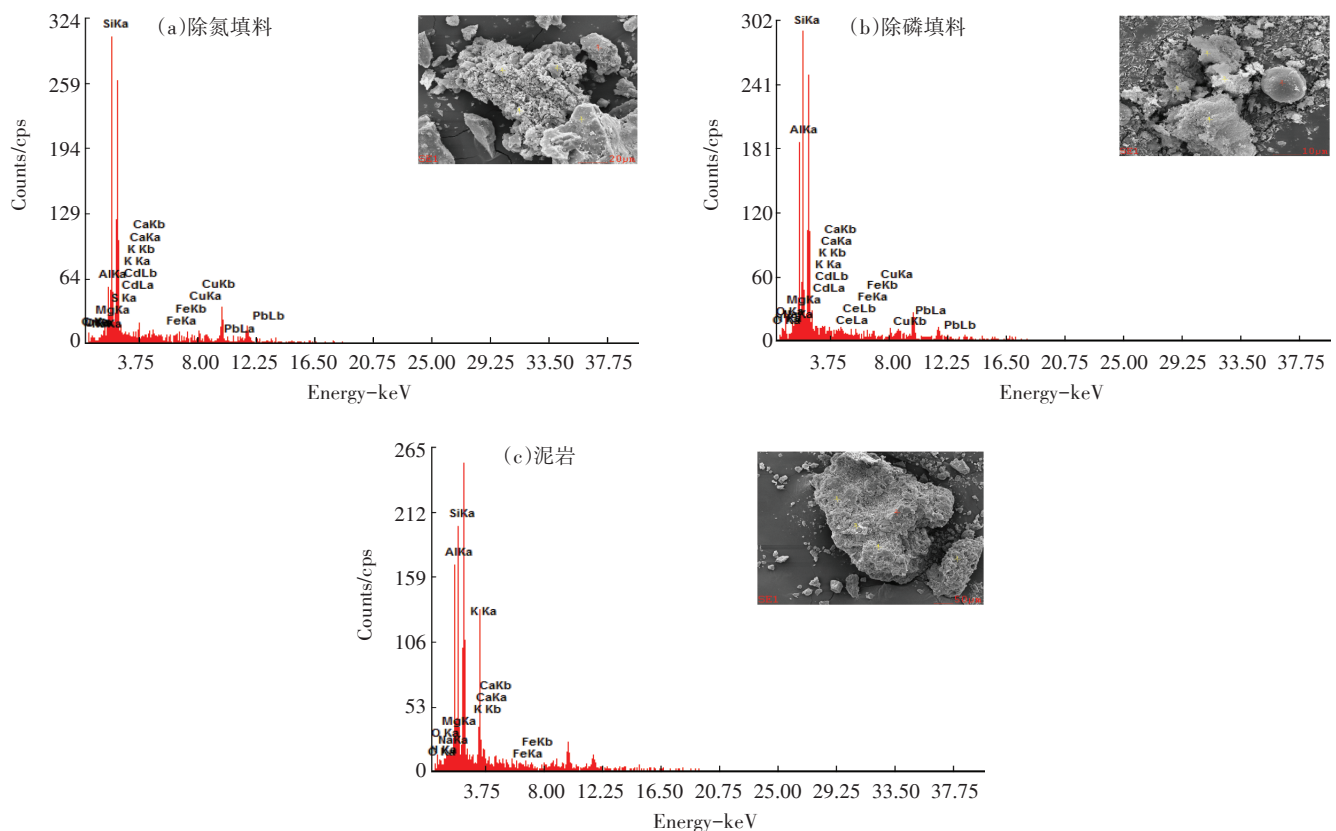


图4 (a)除氮填料、(b)除磷填料及(c)泥岩的SEM和EDS图

Figure 4 Scanning electron microscope image and energy dispersive spectrometer analysis graphs: (a) nitrogen-removal filler, (b) phosphorus-removal filler and (c) argillaceous limestone

学吸附下的共同作用^[25-27]。传统生物滴滤池技术对TN和TP的去除效果往往不够理想,在 NH_4^+ 和TN的去除方面,除磷填料和除氮填料的表现均优于泥岩填料,出乎意料的是,除磷填料对于 NH_4^+ 和TN的去除效果更优,平均去除率分别为92.14%和79.6%,这可能是因为:(1)除磷填料当中的主要成分与除氮填料类似,因此对 NH_4^+ 和TN也具有较好的化学吸附能力;(2)除磷填料表面富集了更多的硝化及反硝化微生物,因而表现出更优的硝化及反硝化能力,这一方面有待于进一步的试验验证(对填料表面洗脱下来的微生物的硝化势及反硝化势的分析);在TP的去除方面,除磷填料的去除效果最高,为84.45%,这是因为除磷填料中的 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 等阳离子对 PO_4^{3-} 的去除能力。滤池1#~3#对TN的去除效果优于一级A排放标准,对TP的去除效果优于一级B排放标准。除氮及除磷填料条件下的生物滴滤塔对于氮磷的处理优势与前期小试尺度下实验室的烧杯吸附试验结果相吻合,泥岩对氮磷的去除效果可能源于其高效的生物挂膜能力。通过小试尺度下的筛选和中试尺度下的验证,工程应用试验中的ETF/LBb工艺确定仍然以除磷填料、

除氮填料和泥岩作为主要生物填料。

2.3 工程应用尺度下的污水净化技术工程应用试验结果

基于小试尺度下的吸附及挂膜试验结果以及中试尺度下改良型生物滴滤试验结果,在工程应用尺度下将高效生物滴滤工艺和景观滤床工艺相结合形成新型ETF/LBb污水净化工艺。其中生物滴滤单元整体为一个塔状结构,采用敞开+封闭+敞开式的分段结构设计,并将3种填料进行组合,使其在功能方面相互补充:以泥岩为主要填料的好氧段主要针对有机污染物及 NH_4^+ 在硝化作用下的去除,由上述2.2中可知,泥岩填料具有显著的微生物挂膜能力;硝化作用产生的硝态氮通过缺氧段的反硝化作用得到进一步的去除,同时对于上一硝化处理阶段残留的有机污染物也可在缺氧段得到进一步的去除,缺氧段以除氮填料为主,采用封闭式结构设计;而污水中的磷可以在除磷段中除磷填料表面附着的聚磷菌(PAO)的微生物作用下以及除磷填料对磷的化学吸附作用下得到高效去除,此外除磷填料的粒径较小,在对磷进行吸附去除的同时还可以有效过滤掉污水中的固体悬浮

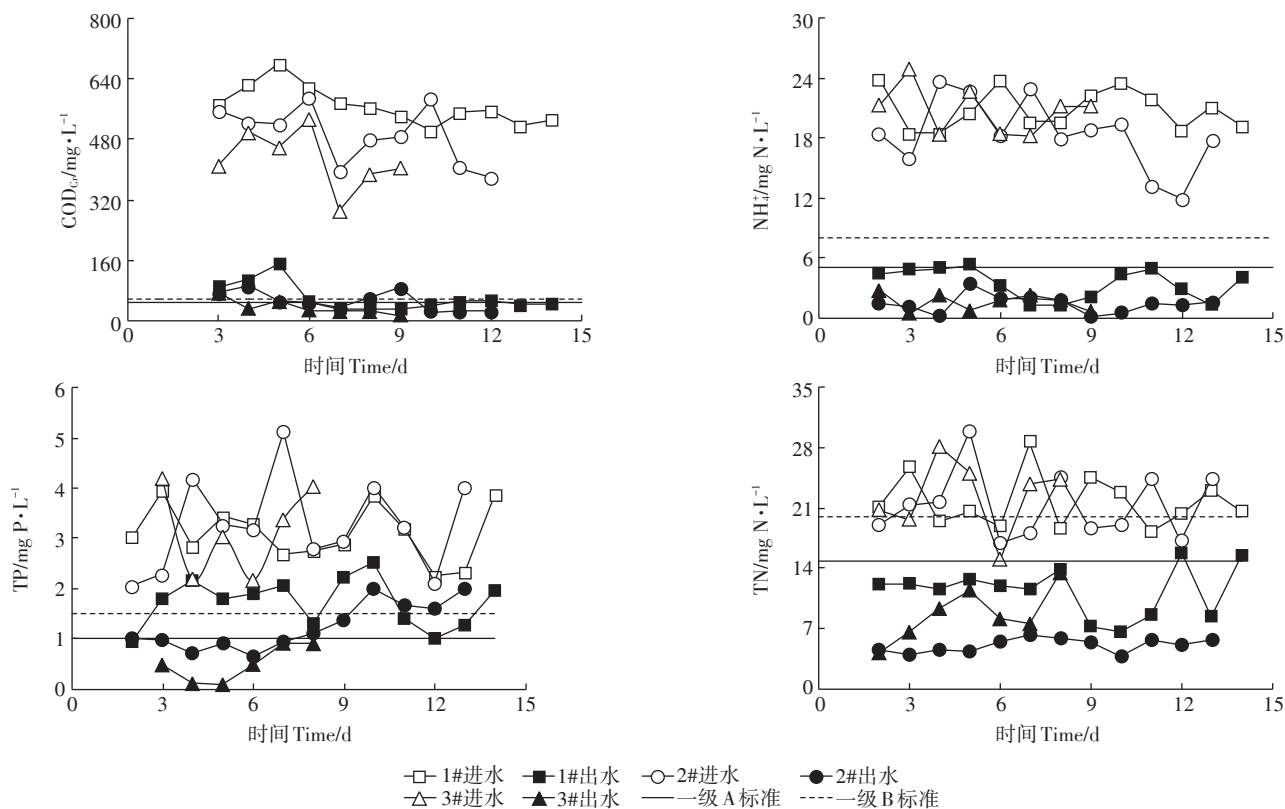


图5 滤塔1#(除磷填料)、滤塔2#(除氮填料)、滤塔3#(泥岩)运行效果

Figure 5 Filter tower 1# (phosphorus-removal filler), Filter tower 2# (Nitrogen-removal filler), Filter tower 3# (argillaceous limestone) operation effect

物以及拦截从上层脱落的生物膜等。可以看出,通过好氧段和缺氧段的设置有利于形成一个“硝化-反硝化”的完整体系,这一体系可以有效提高污水中有机物和TN的处理效率;缺氧段和除磷的设置有利于形成“释磷-聚磷”的完整体系,这一体系可以有效提高污水中TP的去除效率;而好/缺氧段和除磷段的设置又形成了一个“生物/吸附-吸附/过滤”的处理体系。景观滤床的单元创新采用环状的主题结构设计,污水绕调节池及生物滴滤塔形成一个环状流动,同时内部采用复合流形式,通过从下部进水上部出水以及设置隔墙等形式,使得景观滤床的占地面积远小于传统湿地的占地面积,并且达到充分时长和更佳效果的污水净化处理;同时,环状的滤床系统分布在生物滴滤塔

的四周,上层为鸢尾、菖蒲和美人蕉的组合滤床植物,下层设置除磷填料,通过填料层和耕植层进一步吸附氮磷以达到污水深度处理的目的。

由图6可以看出,生活污水经ETF/LBb污水净化工艺处理后, COD_{Cr} 的平均浓度值可降至 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, COD_{Cr} 的平均去除率可达75%;出水 BOD_5 的平均浓度值可降至 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,平均去除率约为84.3%,出水 COD_{Cr} 和 BOD_5 均可以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,说明ETF/LBb污水净化工艺可以有效去除生活污水中的有机污染物。由图6可以看出,ETF/LBb工艺对 NH_4^+ 和TN也具有高效的处理效果,ETF/LBb工艺对 NH_4^+ 和TN的去除主要发生在高效生物滴滤塔阶段,去除

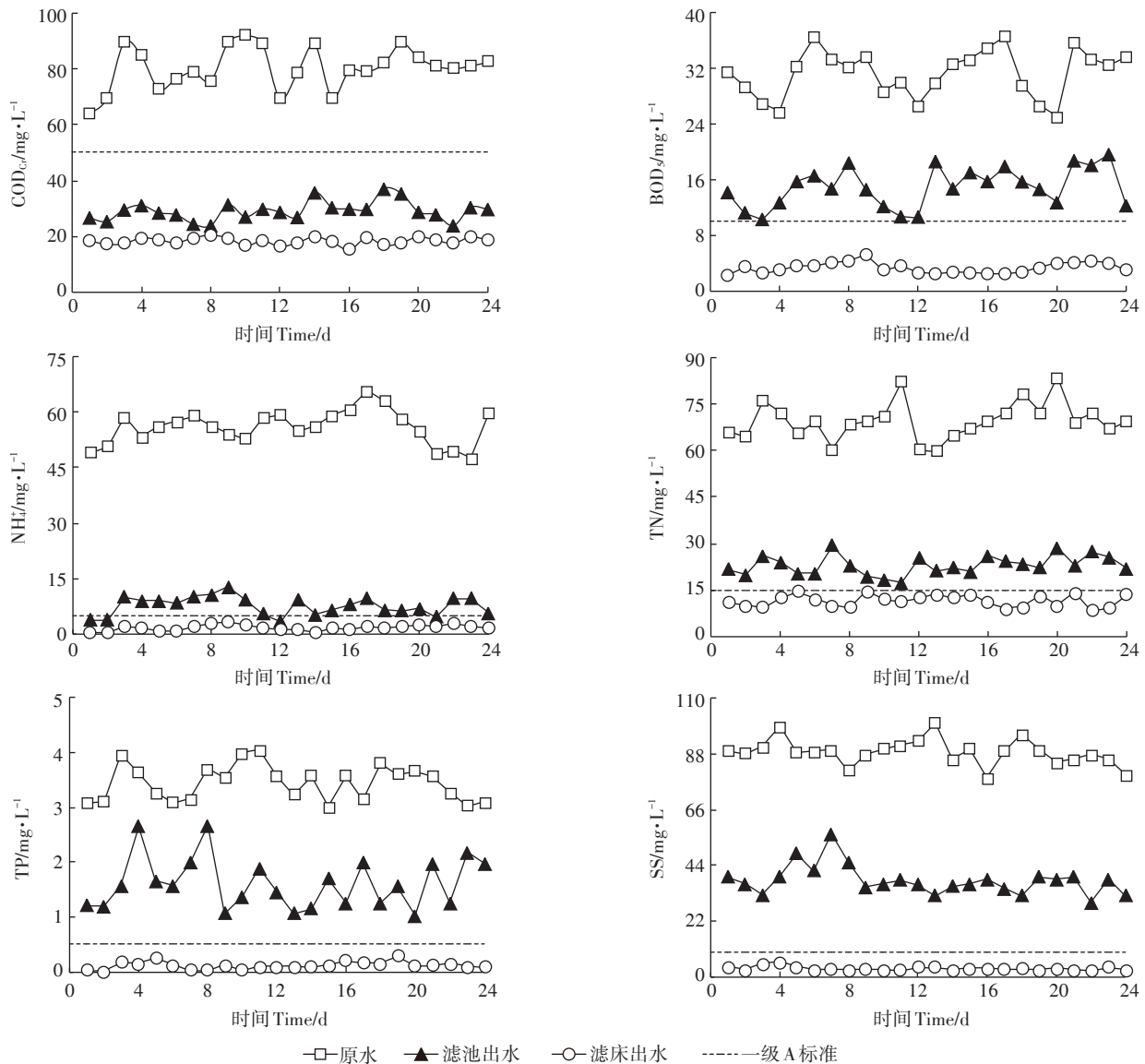


图6 污水净化技术工程应用基地 COD_{Cr} 、 BOD_5 、 NH_4^+ 、TN、TP和SS历时变化曲线

Figure 6 Demonstration base of wastewater treatment technology COD_{Cr} , BOD_5 , NH_4^+ , TN, TP and SS duration curve

率分别为83.3%和81.25%。通过中试阶段的试验可以得出,生物滴滤塔对于 NH_4^+ 的去除可能主要依靠硝化细菌以及填料吸附的共同作用。生物滴滤塔单元和滤床单元对于TP和SS均具有较明显的去除效果,原水中TP的平均浓度约为 $3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,SS的平均浓度为 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,经生物滴滤塔处理后,TP和SS可以达到一级B标准,而经滤床深度处理后,出水TP和SS可以稳定达到一级A标准,出水TP浓度多在 $0.1 \sim 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,SS浓度在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右浮动,可以看出,生物滴滤塔下部的除磷段以及滤床单元下层的除磷填料对于磷的去除达到了预期效果,与小试吸附试验以及中试生物滴滤塔试验的结果相吻合,而且对水中的固体悬浮物具有显著的拦截能力。

综合上述试验效果验证,ETF/LBb工艺至少具有如下优势:(1)节省占地面积,传统人工湿地系统一般占地面积为污水处理规模的4倍以上,ETF/LBb工艺由于生物滴滤塔较高的容积负荷($1.62 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)以及环状设计的滤床水力条件,其占地面积比可以达到吨水处理所需面积小于 1.1 m^2 ;(2)污水处理效率高,传统处理工艺的出水水质一般只能达到二级,而该技术的出水各项指标均可以稳定达到一级A标准;(3)节省人工且运行稳定,传统工艺如 A^2O 需要较多的运维人员,而ETF/LBb工艺因无需加药且无需经常排泥,整个系统中只涉及污水提升泵等若干简易设备,因此基本无需运维人员,同时由于上述原因,吨水的处理成本远低于大部分传统工艺,具体成本有待于进一步核算。结合上述农村生活污水的特点可以看出,ETF/LBb工艺在农村污水处理领域具有显著的应用前景和推广价值。

3 结论

(1)通过小试尺度下吸附试验和挂膜试验可得,页岩对于 NH_4^+ 的吸附能力最佳,由工业及建筑废料改性而成的除氮填料和除磷填料分别对 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的吸附效果最好,其吸附量分别为 $1.0 \text{ mg N} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $2.3 \text{ mg P} \cdot \text{g}^{-1}$;此外,泥岩所含黏土矿物的晶体结构使得其具有较好的微生物挂膜能力。

(2)中试尺度下,改良型生物滴滤塔的结构设计具有较好的通风性能且不易堵塞,除磷填料、除氮填料和泥岩条件下的3组生物滴滤塔均可以有效处理污水中 COD_{Cr} 、 NH_4^+ 、TN和TP等各项污染物。所筛选的具有吸附氮磷功能及微生物挂膜能力较强的填料,结合活性污泥挂膜技术可将微生物作用和物理

化学吸附作用有效地结合,最终实现生活污水的高效处理。

(3)工程应用试验发现,新型ETF/LBb工艺对于生活污水中 COD_{Cr} 、 BOD_5 、 NH_4^+ 、TN、TP及SS的去除率分别可以达到72.85%、71.33%、95%、76.3%、84.3%、91.6%、94.3%。经ETF/LBb工艺处理后的生活污水可以稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A排放标准。相对于其他传统污水处理技术而言,ETF/LBb工艺具有节省占地面积、污水处理效率高、节省人工和运行稳定等特点,适用于农村生活污水的处理,符合我国现阶段对农村生活污水治理的需求。

参考文献:

- [1] 谢林花, 吴德礼, 张亚雷. 中国农村生活污水处理技术现状分析及评价[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(10): 865-870.
XIE Lin-hua, WU De-li, ZHANG Ya-lei. Analysis and evaluation of China's rural domestic sewage treatment technology[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(10): 865-870.
- [2] 杨 扬. 农村生活污水分散式处理工艺及在广东省的应用情况[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(12): 38-40.
YANG Yang. Decentralized treatment process of rural domestic sewage and its application in Guangdong Province[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2018, 36(12): 38-40.
- [3] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 关于实施乡村振兴战略的意见[R]. 北京: 中共中央办公厅, 国务院办公厅, 2018.
General Office of the CPC Central Committee, General Office of the State Council of the People's Republic of China. Opinions on the implementation of the strategy of rural vitalization[R]. Beijing: General Office of the CPC Central Committee, General Office of the State Council of the People's Republic of China, 2018.
- [4] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 农村人居环境整治三年行动方案[R]. 北京: 中共中央办公厅, 国务院办公厅, 2018.
General Office of the CPC Central Committee, General Office of the State Council of the People's Republic of China. Three year action plan for rural human settlements improvement[R]. Beijing: General Office of the CPC Central Committee, General Office of the State Council of the People's Republic of China, 2018.
- [5] Wang L M, Guo F H, Zheng Z, et al. Enhancement of rural domestic sewage treatment performance, and assessment of microbial community diversity and structure using tower vermifiltration[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(20): 9462-9470.
- [6] 夏 兴. 我国农村生活污水处理技术的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(9): 84-86.
XIA Xing. Research progress of rural domestic sewage treatment technology in China[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2019, 37(9): 84-86.
- [7] 陈永志, 彭永臻, 王建华, 等. A^2O -曝气生物滤池深度生物脱氮除磷工艺分析[J]. 中国给水排水, 2011, 27(10): 29-32.

- CHEN Yong-zhi, PENG Yong-zhen, WANG Jian-hua, et al. Advanced biological phosphorus and nitrogen removal by combined process A²/O and BAF[J]. *China Water & Waste Water*, 2011, 27(10):29-32.
- [8] 李炳荣, 曹特特, 王 林, 等. 低氧条件下 A²/O 工艺对城市污水脱氮处理的中试研究[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(1):134-140.
- LI Bing-rong, CAO Te-te, WANG Lin, et al. A pilot-scale study on nitrogen removal of municipal wastewater by A²/O process under low dissolved oxygen condition[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(1):134-140.
- [9] Ali M, Wang Z W, Salam K W, et al. Importance of species sorting and immigration on the bacterial assembly of different-sized aggregates in a full-scale aerobic granular sludge plant[J]. *Environ Science Technology*, 2019, 53(14):8291-8301.
- [10] 柳 俊. 农村生活与农田灌溉混合污水人工湿地处理模式与效果分析[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2015.
- LIU Jun. Rural domestic sewage and agricultural irrigation combined sewage treatment effect of constructed wetland research[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2015.
- [11] 欧文韬. 组合式分层生物滤池与人工湿地联合工艺处理农村生活污水的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2010.
- OU Wen-tao. Treatment of rural sewage by using combined processes of multi-layered biological filter and constructed wetland[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.
- [12] Wang X L, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Influence of wastewater composition on nitrogen and phosphorus removal and process control in A²O process[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2006, 28(6):397-404.
- [13] 干 钢, 唐 毅, 郝晓伟, 等. 日本净化槽技术在农村生活污水处理中的应用[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(5):1791-1796.
- GAN Gang, TANG Yi, HAO Xiao-wei, et al. Application of Japanese Johkasou technology in treatment of rural domestic sewage[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(5):1791-1796.
- [14] 孙亚平, 林运通, 梁瑜海, 等. 组合工艺对高浓度猪场废水的深度处理[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(增刊2):169-174.
- SUN Ya-ping, LIN Yun-tong, LIANG Yu-hai, et al. Research on advanced treatment of piggery wastewater with high concentration by combined process[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(Suppl 2):169-174.
- [15] 陈 畅, 肖亿群, 邱江平. 蚯蚓生物滤池处理城市污水初步试验[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2003, 21(4):336-344.
- CHEN Yang, XIAO Yi-qun, QIU Jiang-ping. Primary study of vermicbiofilter in city sewage treatment[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2003, 21(4):336-344.
- [16] 黄 霞, 曹 斌, 文湘华, 等. 膜-生物反应器在我国的研究与应用新进展[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(3):416-432.
- HUANG Xia, CAO Bin, WEN Xiang-hua, et al. State-of-the-art of membrane bioreactors: Research and application in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3):416-432.
- [17] 李星星, 刘俊良, 张铁坚, 等. 塔式生物滤池处理农村生活污水研究[J]. *水处理技术*, 2015, 41(8):96-98.
- LI Xing-xing, LIU Jun-liang, ZHANG Tie-jian, et al. Tower biological filter for rural domestic sewage treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(8):96-98.
- [18] Li W Y, Carlos L L, et al. Performance of a two-phase biotrickling filter packed with biochar chips for treatment of wastewater containing high nitrogen and phosphorus concentrations[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016:150-158.
- [19] 国家环境保护局. 水和废水的监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- National Environmental Protection Agency of the People's Republic of China. Monitoring and analysis methods of water and waste water [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [20] He S R, Li Y T, Weng Li-Ping, et al. Competitive adsorption of Cd²⁺, Pb²⁺ and Ni²⁺ onto Fe³⁺-modified argillaceous limestone: Influence of pH, ionic strength and natural organic matters[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637/638:69-78.
- [21] 赵亚丽, 宋永会, 钱 峰, 等. 不同 Ca/P 比下碳酸根对磷酸钙沉淀反应回收磷的影响[J]. *环境工程*, 2014, 8(5):1755-1760.
- ZHAO Ya-li, SONG Yong-hui, QIAN Feng, et al. Effect of carbonate on calcium phosphate precipitation at different Ca/P ratios for phosphorus recovery[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(5):1755-1760.
- [22] 王苏艳. 亚铁强化潜流人工湿地反硝化作用及机制[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- WANG Su-yan. The influences of Fe²⁺ on denitrification in subsurface flow constructed wetlands and its mechanism[D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [23] Pehlivan E, Ozkan A M, Dinc S, et al. Adsorption of Cu²⁺ and Pb²⁺ ion on dolomite powder[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1/2/3):1044-1049.
- [24] 陈国海, 马永玉, 蒋先军. 黏土矿物对污水中可溶态 N、P 的吸附研究[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(13):349-353.
- CHEN Guo-hai, MA Yong-yu, JIANG Xian-jun. Research about clay minerals on removal soluble nitrogen and phosphorus in polluted water[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(13):349-353.
- [25] 张文坤, 欧阳矜盈, 潘劫皓, 等. 新型组合式分层生物滴滤池启动性能研究[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2013, 29(3):287-291.
- ZHANG Wen-kun, OUYANG Jin-ying, PAN Jie-hao, et al. Performance of novel multilayered biological filter in early operation[J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)*, 2013, 29(3):287-291.
- [26] 唐舒雯, 纪 婧, 王梦娴, 等. 农村生活污水陶瓷膜-生物反应器处理工艺强化脱氮除磷研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(5):1121-1129.
- TANG Shu-wen, JI Jing, WANG Meng-xian, et al. Enhancement of nitrogen and phosphorus removal in ceramic membrane bioreactor for rural sewage treatment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5):1121-1129.
- [27] 许东阳. 改进生物滤池/人工湿地组合工艺处理农村生活污水的试验研究[D]. 扬州:扬州大学, 2017.
- XU Dong-yang. Experimental study on rural sewage treatment of biological filter/artificial wetland[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.