

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.17.009

不同生物慢滤滤料对微污染窖水的处理效能

张国珍¹, 卢兆明^{1,2}, 王超^{1,2}, 武福平^{1,2}, 周添红^{1,2}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 甘肃兰州 730070)

摘要: 针对西北干旱地区集雨窖水的水质问题,以含有不同元素的沸石、改性沸石、石英砂、火山岩和麦饭石作为生物慢滤滤料,通过对比实验,考察各慢滤柱挂膜时间以及稳定运行后对浊度、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 的去除效果,并探讨其机理。结果表明,当滤速控制在0.2 m/h时,各滤柱对浊度的去除率均在90%以上;火山岩滤柱对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 的去除效果最好,平均去除率分别为97.07%、43.20%;滤料中的Na、K、Ca、Mg、Al、Fe元素对窖水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 的去除具有促进作用,其中Mg、Ca、Fe不仅具有离子交换能力,还对微生物的生长聚集和部分优势菌种富集具有促进作用;滤柱对污染物的去除主要集中在上层。采用生物慢滤技术处理西北村镇微污染窖水时,建议天然滤料选择火山岩;若对滤料进行改性,建议优先选择含有Fe元素的改性剂。

关键词: 微污染窖水; 生物慢滤; 滤料元素组成; 滤层厚度

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)17-0063-06

Treatment Efficiency of Various Biological Slow Filtration Media on Micro-polluted Cellar Water

ZHANG Guo-zhen¹, LU Zhao-ming^{1,2}, WANG Chao^{1,2}, WU Fu-ping^{1,2},
ZHOU Tian-hong^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Yellow River Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In response to water quality issue in rainwater collection cellars in the arid regions of Northwest China, various materials—including zeolite, modified zeolite, quartz sand, volcanic rock, and tourmaline with different elemental compositions—were employed as biological slow filtration media, and a series of comparative experiments were conducted to evaluate the biofilm formation time of each filtration column, as well as the removal efficiencies of turbidity, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and COD_{Mn} under stable operating conditions. Furthermore, the underlying mechanisms were analyzed. When the filtration velocity was maintained at 0.2 m/h, the turbidity removal efficiency of each filter column exceeded 90%. Among them, the volcanic rock filter column demonstrated the highest removal efficiency for $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and COD_{Mn} , with average removal efficiencies of 97.07% and 43.20%, respectively. The presence of Na, K, Ca, Mg, Al, and Fe in the filter media promoted the removal of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and COD_{Mn} from cellar water. In particular,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1100103); 国家自然科学基金资助项目(52060012); 甘肃省教育厅产业支撑项目(2022CYZC-40); 兰州交通大学天佑创新团队项目(TY202005)

通信作者: 周添红 E-mail: Zhouth@163.com

Mg, Ca, and Fe not only possessed ion exchange capacity but also facilitated microbial growth and aggregation, as well as the enrichment of certain dominant bacterial strains. The removal of pollutants primarily occurred in the upper layer of the filter column. When applying biological slow filtration technology to treat micro-polluted cellar water in rural and small towns of Northwest China, it is advisable to select volcanic rock as the preferred natural filter media. If the filter media require modification, it is recommended to prioritize the use of modifiers containing Fe element.

Key words: micro-polluted cellar water; biological slow filtration; element composition of filtration medium; filter layer thickness

我国西北干旱缺水地区水资源匮乏,尤其是西北偏远村镇,由于地理位置偏僻,居民住所分散,导致给水管网修建困难,并且无可利用的地下水资源,只能以水窖来贮存雨水作为饮用水源。为解决西北干旱缺水地区人民的饮用水问题,我国开展了如“121雨水集流工程”“母亲水窖”“甘露工程”等雨水利用工程,据统计仅甘肃省新建集雨水窖就达300余万眼,解决了260多万人民的饮用水问题。但是雨水在收集入窖的过程中会受到如固体废物、大气沉降物、化肥农药等的污染,导致窖水中浊度、氨氮、有机物等超标严重,部分地区还存在重金属污染^[1]。

为改善微污染窖水水质,目前大多采用预处理、深度处理和强化传统工艺处理技术^[2],但这些技术的适用性各有局限。生物慢滤是一种将过滤技术与生物技术相结合的水体处理技术,待处理水以缓慢的流速流经滤料层以实现净化,具有操作简便、运行成本低、无需投药等优点,可以高效去除水中浊度、色度、有机物等,因此在水资源匮乏的村镇具有广阔的应用前景^[3-4]。

笔者通过对比生物慢滤装置中不同滤料的挂膜时间,以及挂膜成功后对微污染窖水中浊度、 NH_4^+-N 、有机物的去除效果,分析其去除机理以及去除效果存在差异的原因,进而筛选出适合处理微污染窖水的滤料,以期生物慢滤应用于西北村镇微污染窖水处理提供一定的技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验用滤料

根据不同的元素组成挑选沸石、石英砂、火山岩、麦饭石4种天然滤料作为实验用滤料。其中,沸石中主要含有C、O、Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Mn、Fe元素,含量分别为9.13%、39.98%、0.12%、0.26%、

7.34%、35.52%、4.71%、0.77%、0.67%、1.50%;石英砂主要含有O和Si元素,含量分别为23.04%和76.96%;火山岩主要含有O、Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Fe元素,含量分别为34.74%、1.62%、5.46%、6.81%、25.85%、0.68%、8.86%、15.98%;麦饭石主要含有O、Na、Al、Si、K、Fe元素,含量分别为36.67%、7.62%、3.02%、41.09%、7.62%、3.98%。

为了增强元素含量不同产生的对比性,采用 FeCl_3 对普通沸石进行改性,增加Fe元素含量,改变其原本的表面构型,使得改性后的沸石在中性水环境下带正电。具体制作方法:将普通沸石清洗干净置于纯水中浸泡12h,烘干后与浓度为2mol/L的 FeCl_3 溶液按照固液比为1:3混合均匀,再使用10mol/L的NaOH溶液调节pH至6后放置于烘箱中烘干,最后于550℃的马福炉中高温煅烧3h。

1.2 实验装置

实验装置见图1。采用5根内径均为60mm的有机玻璃柱作为滤柱,分别填装700mm不同滤料,上覆水深为350mm,在滤柱侧面间隔100mm设置取样口。1~5号滤柱分别装填沸石、改性沸石、石英砂、火山岩、麦饭石,滤料粒径分别为0.25~0.5、0.25~0.5、0.2~0.4、0.2~0.4、0.2~0.4mm。

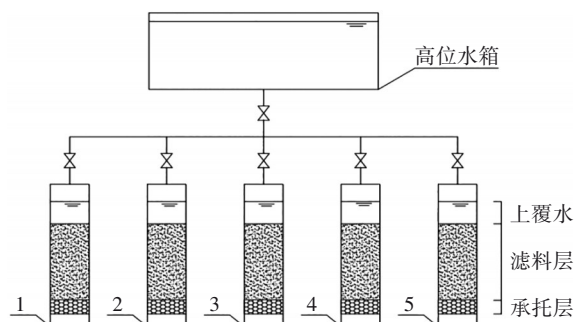


图1 实验装置

Fig.1 Diagram of experimental device

1.3 实验用水

实验用水根据西北村镇窖水实际水质进行人工配制,具体参数如下:pH为7.30~8.20,温度为13~28℃,浊度为3.26~23.90 NTU, COD_{Mn}为2.5~6.5 mg/L, NH₄⁺-N为0.4~1.2 mg/L。

1.4 实验方法

各慢滤柱均采用自然挂膜方式,模拟窖水通过高位水箱自上而下分别流入5根滤柱,控制各滤柱流速为0.2 m/h,并在装置运行期间保证水流24 h不间断进入滤柱,挂膜期间定时从各出水口取样,测定NH₄⁺-N和COD_{Mn}浓度。挂膜成功后,取样测定浊度、NH₄⁺-N、COD_{Mn}浓度。水质指标均采用国家标准方法进行测定。

2 结果与讨论

2.1 不同滤料的挂膜时间

滤柱挂膜期间,每天取样测定NH₄⁺-N和COD_{Mn}浓度,当两者去除率达到稳定时即表明挂膜成功。结果表明,沸石、改性沸石、石英砂、火山岩、麦饭石滤柱的挂膜时间分别为36、30、43、29、37 d,其中,火山岩滤柱的挂膜时间最短,并且对NH₄⁺-N、COD_{Mn}的去除效果最稳定,挂膜期间对NH₄⁺-N、COD_{Mn}的平均去除率分别为97.07%、43.20%;石英砂滤柱的挂膜时间最长。相比其他滤料,火山岩中的Fe、Mg、Ca元素含量更高,其中Fe元素可以促进硝化菌和反硝化菌的增殖,进而有利于硝化和反硝化过程的进行^[5],并且可促使微生物生长富集^[6];Mg元素可对微生物活性有积极影响的酶起到重要的激活作用,从而促进生物量的增加^[7];Ca元素可以促使微生物胞外聚合物(EPS)中产生更多的蛋白质,而这些蛋白质的增加可以增强邻近细胞间的相互作用,并通过有机和无机吸附形成细胞交联^[7]。而石英砂滤料中没有Mg、Ca、Fe元素,麦饭石滤料中仅含有Fe元素而没有Mg、Ca元素,故两者的挂膜时间明显要长于其他滤料;改性沸石滤料由于采用FeCl₃改性,增加了Fe元素的含量,更有利于挂膜,因此其挂膜速度仅次于火山岩滤料。

2.2 挂膜成功后各滤柱对污染物的去除效果

2.2.1 对浊度的去除效果

各滤柱对浊度的去除效果见图2。可知,在平均进水浊度为13.58 NTU的条件下,5个滤柱对浊度的去除率均在90%以上,平均出水浊度均低于

1.0 NTU,满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求,去除效果从高到低依次为:改性沸石滤柱、火山岩滤柱、沸石滤柱、麦饭石滤柱、石英砂滤柱。生物慢滤技术主要通过滤料的过滤截留作用将大部分悬浮颗粒和胶体截留从而降低浊度,另外其还存在一定的絮凝吸附和生物降解作用,通过微生物分泌的具有黏性的聚合物形成生物絮体,并利用微生物将截留的污染物进行有效降解^[8]。当装置自然挂膜成功后,各滤柱去除浊度一方面依靠其本身的吸附截留能力,另一方面生物膜的生长也可有效阻碍悬浮颗粒穿透滤层^[9]。改性沸石滤柱对浊度的去除效果较其他滤柱要好,是因为沸石经改性后其表面在水环境中带正电,可与水中阴离子发生配位体交换和离子吸附作用^[10]。

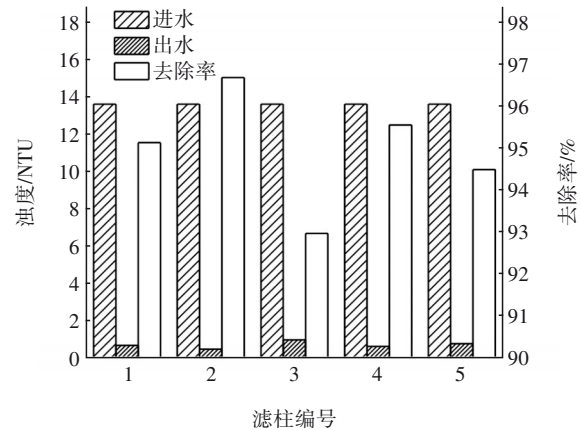


图2 浊度去除效果

Fig.2 Removal effect of turbidity

2.2.2 对NH₄⁺-N的去除效果

各滤柱对NH₄⁺-N的去除效果见图3。可知,在进水NH₄⁺-N平均浓度为0.8 mg/L时,火山岩滤柱对NH₄⁺-N的去除效果最好,平均去除率可以达到97.07%;各滤柱对NH₄⁺-N的去除效果从高到低依次为:火山岩滤柱、改性沸石滤柱、沸石滤柱、麦饭石滤柱、石英砂滤柱。生物慢滤技术去除水中NH₄⁺-N的途径:在前期主要依靠滤料本身的吸附作用,稳定运行后则主要依靠微生物降解作用。滤料中含有的Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Al³⁺等阳离子,可以与溶液中的NH₄⁺进行离子交换;低价Fe是自养菌的供氢体,可加快自养菌化能合成过程^[11],此外,铁离子作为化学催化剂可以增大细胞膜的渗透性,对硝化反应有较好的促进作用^[12-13];而Mg元素作为微生物生长所必需的微量元素,参与了微生物细胞的新陈代

谢,可促进硝化菌的硝化作用^[14],同时Mg元素可以增强细胞间的范德华力,促进微生物的能量代谢^[15];另外,Ca²⁺、Mg²⁺可以促进生物膜中参与脱氮过程的优势菌种的富集^[16]。5种滤料中,火山岩的Mg、Ca元素含量最高,其次是沸石,石英砂和麦饭石中不含Mg、Ca元素;Fe元素含量由高到低依次为火山岩、麦饭石、沸石。石英砂作为一种硅酸盐矿物,几乎不含Mg、Ca、Fe元素,因此对NH₄⁺-N的去除效果最差;改性沸石因改性负载了氧化铁薄膜,故其对NH₄⁺-N的去除效果优于普通沸石。

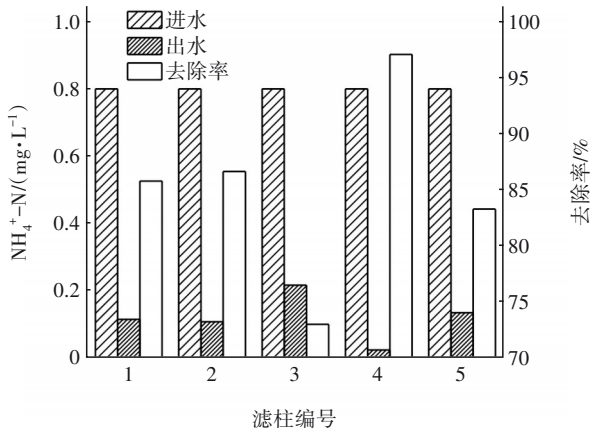


图3 NH₄⁺-N去除效果

Fig.3 Removal effect of NH₄⁺-N

2.2.3 对COD_{Mn}的去除效果

各滤柱对COD_{Mn}的去除效果见图4。可知,火山岩滤柱对COD_{Mn}的去除效果最好,平均去除率为43.20%;各滤柱对COD_{Mn}的去除率从高到低依次为:火山岩滤柱、改性沸石滤柱、沸石滤柱、麦饭石滤柱、石英砂滤柱,与NH₄⁺-N去除效果类似。在生物膜形成前,慢滤柱去除有机物主要依靠吸附截留作用,有研究表明,阳离子对有机物的吸附率为Al³⁺>Ca²⁺>Na⁺^[17];当生物膜形成后,对有机物的去除以生物降解作用为主。火山岩和改性沸石滤柱对COD_{Mn}的去除效果较其他滤柱更好,其中,火山岩中的Fe元素含量较高,改性沸石负载了氧化铁薄膜,异养菌以系统中的有机物作为碳源,而Fe元素可以促进异养菌的电子传递过程,提高异养菌活性^[11];同时,Fe作为递氢物质可以促进烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NAD⁺)的合成,而NAD⁺可以提高物质和能量代谢,促进污染物的降解^[11]。此外,金属离子(如Ca²⁺、Mg²⁺)能够参与调节细胞内外的渗透压,同时,还可以激活某些酶的活性,促进微生物的生长^[16,18];

Ca²⁺、Mg²⁺共存时可以提高生物膜中拟杆菌门的相对丰度,进而增强对有机物的降解能力^[19]。火山岩中的Fe、Mg、Ca元素含量最高,故其对有机物的去除效果最好。

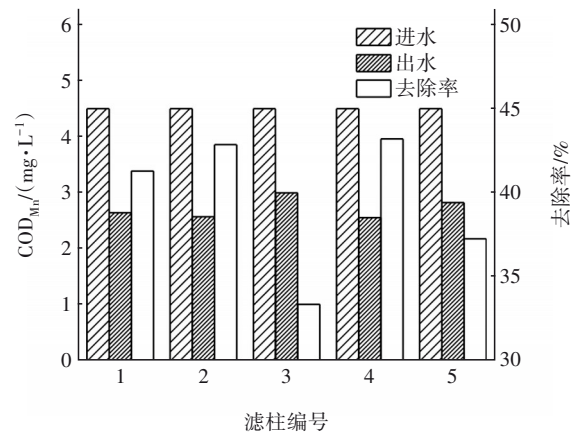


图4 COD_{Mn}去除效果

Fig.4 Removal effect of COD_{Mn}

2.3 滤层沿程对污染物的去除效果

滤层沿程对浊度的去除效果见图5。可知,5种滤柱对浊度的去除率均随滤层厚度的增加而增加,其中,0~100 mm滤层浊度的去除率增长最快,当滤层厚度>300 mm时,各滤柱对浊度的去除率均达到80%以上,此时出水浊度均在1.0 NTU以下。这说明慢滤柱对浊度的去除是一个逐渐积累的过程,并且浊度去除主要集中在滤柱上层,是因为生物膜的生长使得滤料颗粒之间的空隙变小,在表层即可将大部分悬浮物、胶体等物质截留。

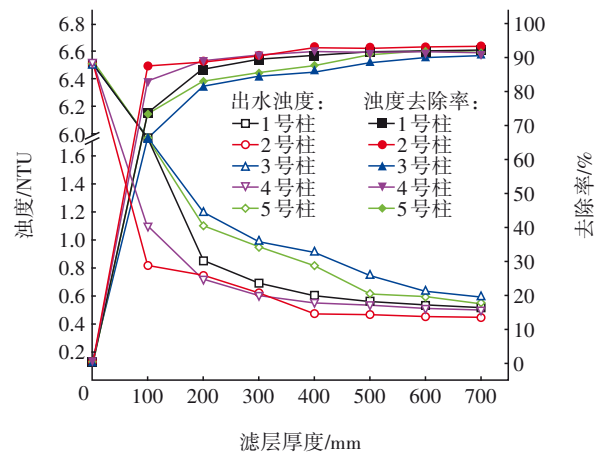


图5 滤层沿程对浊度的去除效果

Fig.5 Removal effect of turbidity along filters

慢滤柱沿程对NH₄⁺-N和COD_{Mn}的去除效果变化趋势与浊度相似,均随滤层厚度的增加而增加,

但去除效率逐渐减小。0~200 mm 滤层对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 的去除效率最高;在 200 mm 处,5 种滤柱的出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为 0.126、0.105、0.251、0.047、0.170 mg/L,均已经达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求,对 COD_{Mn} 的去除率均达到 30% 以上,说明慢滤柱对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 去除主要集中在滤料上层。分析其原因,滤料上层的营养物质和溶解氧浓度高,为微生物生长提供了良好的条件,微生物的生长代谢活动比较旺盛^[20];而随着滤层厚度的增加,水中溶解氧和营养物质逐渐减少,导致生物量和生物活性降低,因此对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 的去除效率降低。

3 结论

① 各滤柱稳定运行后,对浊度的去除率均在 90% 以上;对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 去除效果最好的是火山岩滤柱,平均去除率分别为 97.07% 和 43.20%;火山岩滤料挂膜最快,处理效果最稳定,挂膜时间为 29 d。

② 滤料中含有的 Na、K、Ca、Mg、Al、Fe 元素对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 的去除具有促进作用。金属阳离子可以通过离子交换和吸附作用去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD_{Mn} ,并且 Mg、Ca 元素可以促进具有去除有机物和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 功能的优势菌种的生长;Fe 元素作为供氢体可以提高部分微生物的活性。火山岩中的 Na、K、Ca、Mg、Al、Fe 元素的综合含量远高于其他 4 种滤料,因此其处理效果最好。

③ 生物慢滤柱对污染物的去除率随滤层厚度的增加而逐渐提高,但增速渐缓,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 的去除主要集中在上层 0~200 mm 段。

④ 当采用生物慢滤技术处理微污染窖水时,建议天然滤料优先考虑火山岩,改性滤料优先选择含有 Fe 元素的改性剂进行改性。

参考文献:

- [1] 杨浩,张国珍,杨晓妮,等. 粗滤/生物慢滤技术在集雨窖水处理中的生产应用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(23): 47-51.
YANG Hao, ZHANG Guozhen, YANG Xiaoni, *et al.* Application of rough and slow filtration techniques to treatment of water in rainwater harvesting pits [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(23): 47-51 (in Chinese).
- [2] 王郑. 我国微污染水源水处理技术研究进展[J]. 工业水处理, 2012, 32(10): 1-3, 71.
WANG Zheng. Research progress in the treatment processes of micro-polluted source water in China [J]. Industrial Water Treatment, 2012, 32(10): 1-3, 71 (in Chinese).
- [3] MATUZAHROHN, FITRIANIN, ARDIYANTIPE, *et al.* Behavior of *schmutzdecke* with varied filtration rates of slow sand filter to remove total coliforms [J]. Heliyon, 2020, 6(4): e03736.
- [4] 鲁金凤,王斌,郑亮,等. 生物慢滤技术在水处理中的应用现状及进展[J]. 中国给水排水, 2018, 34(8): 31-35.
LU Jinfeng, WANG Bin, ZHENG Liang, *et al.* Review on the application of biological slow filtration in the treatment of water purification [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(8): 31-35 (in Chinese).
- [5] 吕冉,李彬,肖盈,等. 铁对废水微生物脱氮的影响研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(2): 709-719.
LÜ Ran, LI Bin, XIAO Ying, *et al.* Research progress on the effects of iron on microbiological nitrogen removal in wastewater [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(2): 709-719 (in Chinese).
- [6] GAO F, ZHANG H M, YANG F L, *et al.* The effects of zero-valent iron (ZVI) and ferrous oxide (Fe_3O_4) on anammox activity and granulation in anaerobic continuously stirred tank reactors (CSTR) [J]. Process Biochemistry, 2014, 49(11): 1970-1978.
- [7] CAO X, SHENG Y, CAO H, *et al.* Comparison of Mg^{2+} and Ca^{2+} enhancing anaerobic granulation in an expanded granular sludge-bed reactor [J]. Science China: Chemistry, 2014, 57(11): 1596-1601.
- [8] 李鹏,赵元忠,郑勇,等. 家用型生物慢滤装置在窖水处理中的应用[J]. 甘肃农业大学学报, 2012, 47(6): 139-145, 150.
LI Peng, ZHAO Yuanzhong, ZHENG Yong, *et al.* Effects of household biological filtration device in the treatment of cellar water [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2012, 47(6): 139-145, 150 (in Chinese).
- [9] 李丽,王琳,李文露,等. 生物慢滤对污染物的去除效果研究[J]. 化学与生物工程, 2012, 29(1): 76-78.
LI Li, WANG Lin, LI Wenlu, *et al.* Study on removal efficiency of slow biofiltration for pollutants [J]. Chemistry & Bioengineering, 2012, 29(1): 76-78 (in Chinese).

- [10] 王丹赫,张宏华,林建伟,等. 四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 5024-5035.
WANG Danhe, ZHANG Honghua, LIN Jianwei, *et al.* Adsorption of phosphate from aqueous solutions on sediments amended with magnetite-modified zeolite [J]. Environmental Science, 2018, 39(11): 5024-5035 (in Chinese).
- [11] 蒋杭城,马艺鸣,刘秀红,等. Fe对污水和污泥处理过程中微生物和工艺性能的影响[J]. 环境工程, 2016, 34(11): 1-6, 54.
JIANG Hangcheng, MA Yiming, LIU Xiuhong, *et al.* The effect of Fe on microbe and process property in wastewater and sludge treatment process [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(11): 1-6, 54 (in Chinese).
- [12] 王亚娥,李杰,翟思媛,等. Fe⁰对SBBR工艺处理腈纶废水性能影响[J]. 化工学报, 2013, 64(8): 2996-3002.
WANG Ya'e, LI Jie, ZHAI Siyuan, *et al.* Effect of Fe⁰ on acrylic fiber wastewater treatment in SBBR [J]. CIESC Journal, 2013, 64(8): 2996-3002 (in Chinese).
- [13] 万琼,吴仪,王信,等. 海绵铁和陶粒填料生物膜净化微污染河水实验研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(11): 34-40.
WAN Qiong, WU Yi, WANG Xin, *et al.* Experimental research of micro-polluted river water purification by sponge iron/ceramsite filler biofilm [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(11): 34-40 (in Chinese).
- [14] 肖蓬蓬,曹德菊,李浩,等. 3种金属离子对好氧颗粒污泥形成及污染控制影响[J]. 四川农业大学学报, 2012, 30(3): 342-347.
XIAO Pengpeng, CAO Deju, LI Hao, *et al.* Effects of three heavy metals on formation of aerobic granular sludge and related population control [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2012, 30(3): 342-347 (in Chinese).
- [15] 肖本益,王瑞明,贾士儒. 二价金属离子对UASB颗粒污泥的影响[J]. 中国给水排水, 2002, 18(6): 26-28.
XIAO Benyi, WANG Ruiming, JIA Shiru. Effect of divalent metal ion on UASB granular sludge [J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(6): 26-28 (in Chinese).
- [16] 张兰河,赵倩男,郑晶,等. Ca²⁺、Mg²⁺共存对SBR工艺生物脱氮和微生物群落结构的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(10): 3256-3264.
ZHANG Lanhe, ZHAO Qiannan, ZHENG Jing, *et al.* Effect of the coexistence of Ca²⁺ and Mg²⁺ on the biological denitrification and microbial community structure [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(10): 3256-3264 (in Chinese).
- [17] 郑红,鲁安怀,张焱,等. 富含Na⁺、Ca²⁺、Al³⁺、Cr³⁺蒙脱石对垃圾渗滤液中有机物的吸附[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 528-532.
ZHENG Hong, LU Anhuai, ZHANG Qian, *et al.* The sorption of organic contaminants by Na⁺, Ca²⁺, Al³⁺ and Cr³⁺ saturated montmorillonite from refuse percolate [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(4): 528-532 (in Chinese).
- [18] 杨红薇,陈佼,张建强. K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺对高盐肝素废水处理的影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(10): 4267-4272.
YANG Hongwei, CHEN Jiao, ZHANG Jianqiang. Effects of K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ on high salt heparin wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(10): 4267-4272 (in Chinese).
- [19] 刘沛然. Ca²⁺、Mg²⁺对垃圾渗滤液厌氧生物处理及微生物群落的影响研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2017.
LIU Peiran. Effects of Ca²⁺ and Mg²⁺ on Anaerobic Biological Treatment of Landfill Leachate and Microbial Communities [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2017 (in Chinese).
- [20] 付建林. 微生物在生物慢滤技术处理微污染水中的作用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
FU Jianlin. The Role of Microorganisms in the Treatment of Micro-polluted Water by Biological Slow Filtration Technology [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015 (in Chinese).

作者简介:张国珍(1969-),男,甘肃靖远人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水处理技术与水环境综合整治。

E-mail: guozhenzhang126@126.com

收稿日期:2023-04-17

修回日期:2023-05-21

(编辑:刘贵春)