



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201911049

中图分类号 X703

文献标识码 A

曾洁, 陈正福, 吴尚书, 等. 炭砂滤池对农村饮用水中浊度及细菌的去除效果[J]. 环境工程学报, 2020, 14(10): 2736-2741.
ZENG Jie, CHEN Zhengfu, WU Shangshu, et al. Removal effect of turbidity and bacteria in rural drinking water by GAC-sand filter[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(10): 2736-2741.

炭砂滤池对农村饮用水中浊度及细菌的去除效果

曾洁¹, 陈正福², 吴尚书³, 叶成松¹, 于鑫¹, 王蕾⁴, 张胜华^{1,*}

1. 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2. 武汉市江夏区水务和湖泊局, 武汉 430200

3. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 抚顺 113001

4. 厦门理工学院, 福建省农村污水处理与用水安全工程研究中心, 厦门 361021

第一作者: 曾洁(1993—), 女, 硕士研究生。研究方向: 饮用水处理工艺。E-mail: jzeng19@hotmail.com

*通信作者: 张胜华(1971—), 女, 博士, 研究员。研究方向: 环境微生物学等。E-mail: shzhang@iue.ac.cn

摘要 粗滤-炭砂过滤是简单实用的农村水处理工艺。通过中试装置, 检测了滤池对浊度、细菌总数和大肠杆菌的去除效果, 研究了炭砂滤池出水安全性。结果表明: 炭砂滤池能进一步降低粗滤池出水浊度, 并将其控制在 0.7~2.2 NTU; 砂层作为保证出水浊度的屏障, 其浊度去除率在炭层基础上可再增加 11.1%; 炭砂滤池对大肠杆菌的平均去除率随着滤速的降低而增大, 且该差异主要是由炭层贡献的; 当滤速为 5 m·h⁻¹ 时, 炭砂滤池对大肠杆菌平均对数去除率为 0.79; 但滤池运行过程中会产生微生物泄露的现象, 对细菌总数基本无去除作用。因此, 为保障出水的微生物安全性, 炭砂滤工艺后须增加行之有效的消毒工艺。

关键词 炭砂滤; 浊度; 细菌总数; 大肠杆菌; 农村供水

自 2006 年全面实施农村安全供水建设以来, 我国农村供水安全问题得到了极大改善。但由于管理不到位、水源污染等原因, 农村饮用水水质合格率低等问题依然突出, 其中水质超标的指标多为浊度等感官性状指标以及总大肠菌群和菌落总数等微生物指标^[1-3]。

农村供水管理环节薄弱, 可以选择简单实用且易于管理的饮用水处理工艺。炭砂双层滤池是一种深度处理工艺, 可去除水源水中的微污染物, 应对农村水源水污染问题; 其处理效果好且工艺简单, 成本低^[4], 能实现全自动化管理, 适宜农村供水。炭砂滤池能去除绝大部分浊度和氨氮, 对有机物去除效果优于普通砂滤池, 其去除效果有时可达到 40%~50%^[5-6]; 对消毒副产物生成势也有一定的去除效果^[7]。炭砂滤池也可以用来代替活性炭滤池, 利用增加的砂垫层截留细菌^[8]和无脊椎动物^[9], 从而提高活性炭滤池出水生物安全性。生物粗滤池结构简单、不易堵塞, 被视为混凝-沉淀工艺的替代工艺^[10], 且与混凝沉淀相比, 粗滤无须添加药剂, 运行管理简单。粗滤池可作为炭砂滤池的预处理工艺, 延长炭砂滤池的使用寿命, 提高其出水水质。此外, 农村水处理多采用介质过滤工艺, 很容易改造成炭砂滤池, 其在农村具有较广阔的应用前景。

本研究以粗滤池代替混凝沉淀作为炭砂滤池的前处理工艺, 考察炭砂滤池对农村饮用水常见

收稿日期: 2019-11-11; 录用日期: 2020-03-01

基金项目: 福建省中科院 STS 计划配套项目(2018T3102); 福建省农村污水处理与用水安全工程研究中心开放研究基金(RST201806)

超标项——浊度以及细菌总数的去除效果，并通过模拟实验考察了其在大肠杆菌的去除效果，以期为评价炭砂滤池出水安全性提供参考。

1 装置与方法

1.1 实验装置

炭砂滤池实验装置如图 1 所示。炭砂滤池由 2 根直径 10 cm 的有机玻璃柱组成，采用双层滤料结构，上层填充 1.5 mm 柱状颗粒活性炭，填充高度为 60 cm；下层填充 0.5~1 mm 石英砂，填充高度为 40 cm。炭砂滤池设计为下向流，运行流速为 $80 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ (即 $10 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$)，停留时间约为 6 min。炭砂滤池采用自来水反洗，反洗水量为 $6\sim 7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (即 $12\sim 15 \text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$)，反冲周期参照活性炭滤池，约为 2 周左右。原水为中国科学院城市环境研究所园区景观河河水，炭砂滤池进水为粗滤池出水，水质见表 1。运行期间水温为 $16\sim 21 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

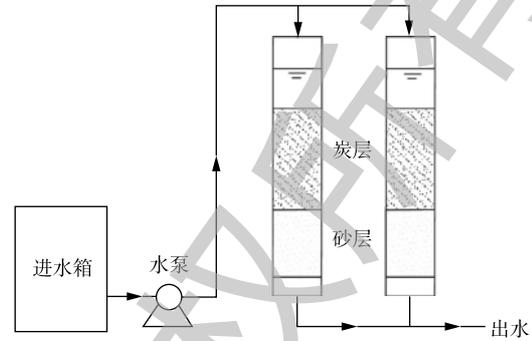


图 1 炭砂滤池实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of GAC-Sand filter

表 1 原水和炭砂滤池进水水质

Table 1 Water quality of raw water and influent of GAC-sand filter

水样	浊度/ NTU	氨氮/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总有机碳/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	细菌总数/ ($\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$)
原水	3.1~7.7	0.1~1.0	3.6~5.0	900~2 400
粗滤池出水	0.7~3.2	0.1~0.6	3.6~4.7	500~1 500

1.2 水质测定与分析方法

实验采用便携式浊度仪 (Thermo, Orion AQ 4500, 美国) 测定浊度。细菌总数和大肠杆菌的测定方法参照《生活饮用水标准检验方法微生物指标》(GB/T 5750.12-2006)。所用微生物培养基都购自青岛海博生物技术有限公司。浊度及细菌总数去除率的计算方法见式 (1)。

$$Q = \frac{C_0 - C_T}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中： Q 为去除率； C_0 为进水中的浓度，NTU 或 $\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ ； C_T 为出水中的浓度，NTU 或 $\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

1.3 大肠杆菌去除实验

实验微生物为大肠杆菌 (CMCC 44103)，购自广东省微生物菌种保藏中心，菌株保存在 $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱。使用前，从冰箱取出菌种，用 LB 肉汤活化过夜，培养条件为 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。活化后，取 1 mL 菌液接入新鲜培养液中，培养 24 h 左右。 $7 800 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 (HERMLE, Z 326 K, 德国) 5 min，收集菌体，用无菌生理盐水重悬至浓度约为 $1\times 10^9 \text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，作为储备菌液。

将大肠杆菌储备菌液用蠕动泵加入粗滤池出水中，使得炭砂滤池进水中大肠杆菌浓度约为 $1\times 10^3 \text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，2 h 后开始采集进出水样品，之后每个滤柱每隔 1~2 h 各采集 1 次样品，共采集 4~5 次，样品总数为 8~10 个。样品采集后放置在 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱保存，用于后续检测。大肠杆菌对数去除率的计算方法见式 (2)。

$$R = \lg\left(\frac{N_0}{N_t}\right) \quad (2)$$

式中： R 为大肠杆菌对数去除率； N_0 和 N_t 分别为进水和出水中大肠杆菌数量， $\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 炭砂滤池对浊度的去除效果

实验考察了炭砂滤池对浊度的去除效果。如图 2 所示，炭砂滤池的待滤水 (粗滤池出水)

浊度较低(1~4 NTU),出水浊度为0.7~2.2 NTU。滤池对颗粒物的去除效果受进水中悬浮物浓度、粒径大小以及沉淀特性等因素影响。根据报道^[6, 11-12],以沉淀池出水为待滤水时,炭砂滤池出水平均浊度小于0.3 NTU,浊度去除率为60%~95%。本实验中滤池的出水浊度较文献报道偏高,可能是因为水源水水质不同(进水未经混凝或絮凝处理,低浊水等)造成的。

当以地表水或浅井水为水源时,农村水厂进水浊度易受暴雨等条件影响,从而出现短期的高浊度进水。粗滤池由于填充粗颗粒介质,对高浊原水的浊度去除效果很好,却也很难将浊度控制在较低水平。而炭砂滤池虽然对低浊水去除作用不是特别理想,但在进水浊度较高时,其浊度去除率可能会有较大提升,并在控制工艺出水浊度方面起屏障作用。

2.2 炭层和砂层对浊度去除效果的贡献度

本研究还考察了炭层和砂层对浊度去除的贡献度(图3)。进水流经炭层后,16.5%的浊度被去除,流经砂层后,浊度去除率增加至27.6%。以炭层出水为进水,砂层的平均浊度去除率为13.5%,在控制出水浊度方面起到了重要作用。刘阳等^[13]对比了单层活性炭滤池和双层炭砂滤池对浊度的去除效果,结果表明,与单层活性炭滤池相比,炭砂滤池出水浊度降低了20%。

2.3 炭砂滤池对大肠杆菌的去除效果

生物滤池可以通过吸附和物理截留作用去除进水中的病原菌等微生物。农村地区水源水易受人畜及野生动物粪便污染,且保护力度不够,大肠菌群数量超标较为常见。而饮用水中病原微生物的存在会提高饮用水的生物风险,危害人们身体健康。因此,本实验以大肠杆菌为考察对象,研究了炭砂滤池对大肠杆菌群的去除效果,结果如图4所示。

在 $10\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 条件下,炭砂滤池对大肠杆菌的去除效果波动范围较大,最低对数去除率仅为0.19,而最高对数去除率高达1.09,平均对数去除率为0.37。而在滤速为 $5\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 条件下,炭砂滤池对大肠杆菌的对数去除率为0.35~1.33,平均对数去除率为0.79。本实验中滤池对大肠杆菌的去除效果虽然波动较大,但极差值仍小于1,波动范围与已有研究^[14-15]相近。滤池对大肠杆菌的去除率随着滤速的降低而增大。增大流速会降低滤池对细菌的吸附能力,也可能使已截留的细菌重悬,导致出水细菌数量增加,细菌去除率降低。LI等^[14]的研究结果也表明,流速大小会影响滤池对大肠杆菌群的去除效果。

截留或吸附在滤层内部的大肠杆菌可在滤池中积累,甚至在生物膜中存活下来,在后续运行时逐渐释放到出水中^[15-16]。因此,虽然炭砂滤池对大肠杆菌去除效果较好,但截留在滤层内或生长在滤料生物膜内的大肠杆菌也可能会成为滤后水微生物风险来源。

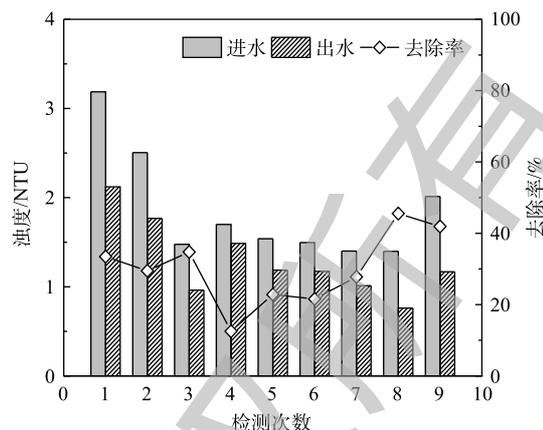


图2 炭砂滤池对浊度去除效果

Fig. 2 Turbidity removal efficiency of GAC-sand filter

其在控制工艺出水浊度方面起屏障作用。

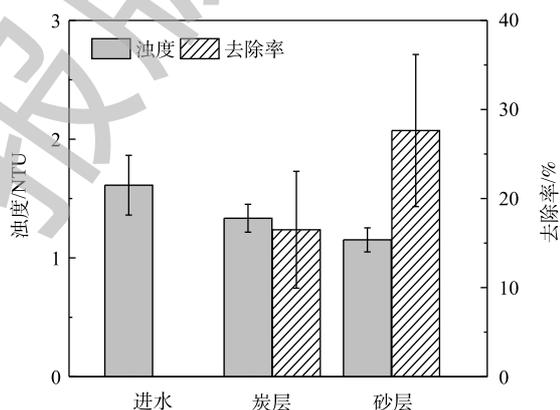


图3 炭层和砂层对浊度的去除效果

Fig. 3 Turbidity removal efficiency of GAC-layer and sand-layer

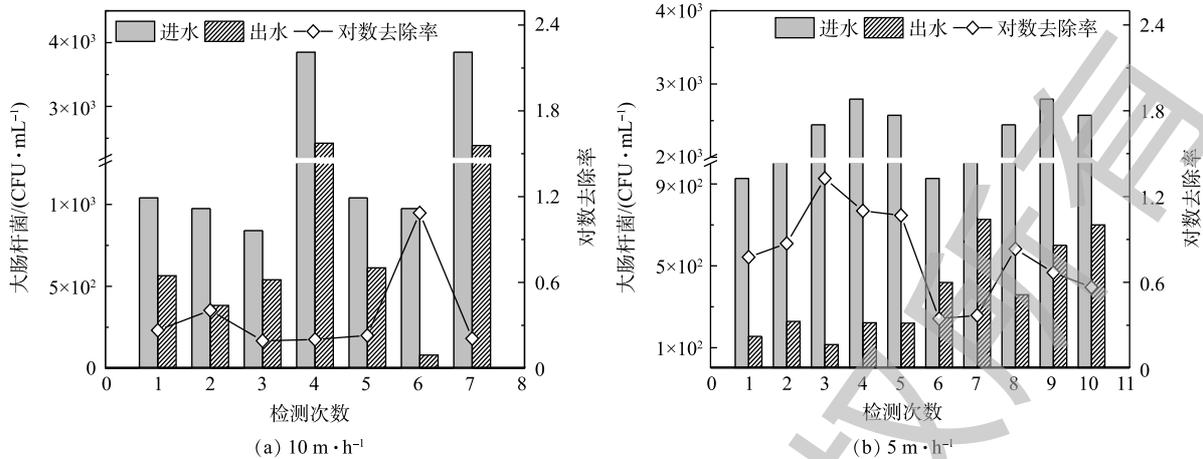


图 4 10 m·h⁻¹ 和 5 m·h⁻¹ 条件下炭砂滤池对大肠杆菌的去除效果
 Fig. 4 *E. coli* removal efficiencies by GAC-sand filter at 10 m·h⁻¹ and 5 m·h⁻¹

2.4 炭层和砂层对大肠杆菌的去除效果

砂层不仅在出水浊度保障方面起重要作用，而且对大肠杆菌去除效果明显(图 5)。在 10 m·h⁻¹ 时，炭层对大肠杆菌的平均对数去除率为 0.21，经砂层过滤后，大肠杆菌对数去除率提高了 0.19。1 cm 高度炭层对大肠杆菌的对数去除率为 3.5×10⁻³，低于 1 cm 高度砂层对数去除率 4.8×10⁻³。在 5 m·h⁻¹ 时，约 86% 的大肠杆菌去除率是由炭层完成的(炭层的对数去除率为 0.80，砂层仅为 0.13)，1 cm 高度炭层和砂层对大肠杆菌的对数去除率分别为 1.3×10⁻² 和 3.3×10⁻³。

当接触时间足够长时(5 m·h⁻¹)，炭层截留的大肠杆菌数量远超砂层，且 1 cm 高度炭层的对数去除率是砂层的 4 倍左右。其原因可能是细菌截留主要是发生在滤层上部，中下层进水细菌浓度下降，对大肠杆菌的截留率也较低^[15]。但当滤速较高时，炭层去除率显著降低，砂层对降低出水大肠杆菌数量起到了重要作用。

与砂层相比，炭层对大肠杆菌的去除率受滤速的影响更大。这可能是因为当滤速提高时，炭层不仅对细菌“胶体颗粒”的截留率会降低，而且对微生物的吸附能力也大大降低，而吸附是粒径较大的活性炭滤料除菌的重要机理。而砂层填料粒径更小，对细菌的物理截留作用强于炭层，受接触时间的影响相对较小。

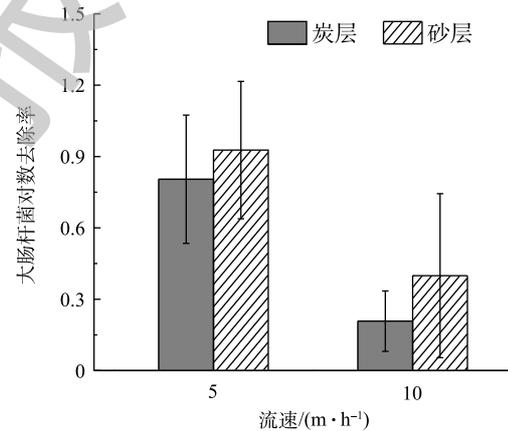


图 5 炭层和砂层对大肠杆菌的去除效果

Fig. 5 *E. coli* removal efficiency by GAC-layer and sand-layer

2.5 滤池出水中的细菌总数

炭砂滤池对细菌总数的去除效果如图 6 所示。可以看出，炭砂滤池对细菌总数的去除基本没有作用，反而会经常出现细菌数量放大的情况。在反冲洗后采样检测，发现出水细菌数量依然可能大于进水细菌数。滤池进水中有一定水平的可生物利用有机物，可支持微生物在滤池内生长繁殖，使得滤池填料表面形成生物膜。活性炭滤料是适合微生物挂膜生长的载体，生物量大，生物膜老化脱落进入出水使得出水细菌数量增大。虽然砂层可以截留部分细菌，但炭砂滤池仍然可能会出现出水细菌数量多于进水的情况^[4]。已有研究结果^[17-18]也表明，炭砂滤池在挂膜成熟后会出现微生物泄露现象。但也有研究^[8]表明，在滤速为 8 m·h⁻¹，反冲周期为 48 h 条件下运行时，炭砂滤池

对细菌总数的去除率约为60%，且不会引起出水细菌数量的增加。因此，关于炭砂滤池对细菌总数的去除特性仍须进一步研究。

不同于砂滤池能有效控制出水微生物数量，炭砂滤池出水细菌数量可能会增大，具有一定的微生物风险。炭砂滤池后的消毒工艺必须行之有效。但在农村供水工程中，消毒一直是薄弱环节，常因消毒失败而导致微生物超标。因此，若采用炭砂过滤器，操作简单、易于管理的紫外线消毒器可能更为适宜。

3 结论

1) 以粗滤为前处理工艺，炭砂滤池出水浊度为0.7~2.2 NTU，浊度去除率不高。炭砂滤池浊度处理虽达不到预期效果，但当农村水厂进水浊度较高、粗滤处理后不能达标时，其对出水浊度的控制尤为重要。

2) 砂滤池对大肠杆菌去除效果较好，在实验滤速下对大肠杆菌对数去除率为0.19~1.33。但炭砂滤池出水可能会出现细菌数量放大的现象，具有一定的微生物风险。

3) 炭砂滤池在农村水处理中具有良好的应用前景。为保障出水微生物安全性，炭砂滤池后必须接消毒工艺，且应重视消毒效果，以确保消毒工艺行之有效。

参考文献

- [1] 杨越, 杨天琳, 王学军, 等. 2008—2017年武威市农村生活饮用水水质监测分析[J]. 疾病预防控制通报, 2018, 33(5): 72-75.
- [2] 孙熙珍, 王宝强, 杨培军, 等. 2016年定西市生活饮用水水质卫生监测分析[J]. 疾病预防控制通报, 2018, 33(4): 68-71.
- [3] 王龄庆, 王金玉, 李盛, 等. 2016年兰州市农村环境卫生状况调查[J]. 疾病预防控制通报, 2017, 32(6): 70-73.
- [4] 冯硕. 炭砂滤池的构建技术、处理效果和工艺特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [5] TAN W C, WANG T, WANG Y B, et al. Experimental study on GAC-sand filter for advanced treatment in drinking water[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 726-731: 3044-3047.
- [6] 刘清华, 丁卫, 陈丽珠, 等. 炭砂滤池与砂滤池在水厂实际运行过程中的比较研究[J]. 城镇供水, 2015(2): 74-76.
- [7] MOHAMED M A, HASSAN A H, EL MESSIRY M A, et al. Removal of trihalomethanes by dual filtering media (GAC-sand) at El-Manshia water purification plant[J]. *Journal of the Egyptian Public Health Association*, 2006, 81(3/4): 241-258.
- [8] 田家宇, 陈伟雄, 王威, 等. 滤料粒径对生物活性滤池除污染效能的影响[J]. 工业水处理, 2007, 27(11): 15-18.
- [9] 尹文超, 张金松, 刘丽君, 等. 砂垫层控制活性炭滤池无脊椎动物穿透研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(2): 41-46.
- [10] OKAMOTO T, OGURA K, KOBAYASHI Y, et al. Development of biological roughing filter as an alternative to coagulation-sedimentation process[C]//International Water Association. Proceedings of the Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes: Further Developments and Applications, 2014: 465-472.
- [11] 何嘉莉, 张晓娜, 陈丽珠, 等. 炭砂滤池长期运行效果研究[J]. 给水排水, 2017, 53(2): 18-20.
- [12] 张硕, 王如华, 蔡报祥. 处理沉后水的炭砂滤池优化研究[J]. 环境科技, 2015, 28(6): 48-52.

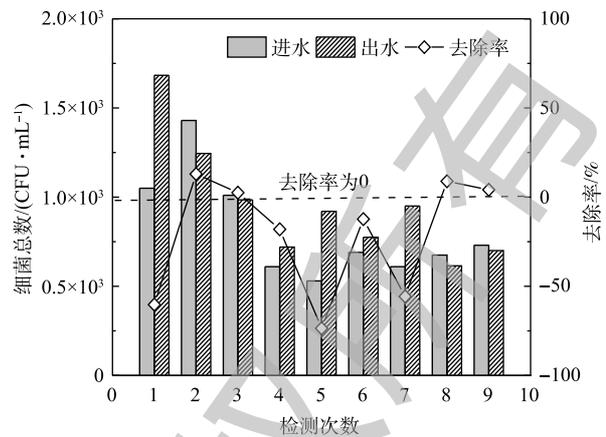


图6 炭砂滤池对细菌总数的去除效果

Fig. 6 Total bacteria count removal efficiency by GAC-sand filter

- [13] 刘阳, 张燕. 活性炭柱中砂垫层在微污染水源水处理工艺中的应用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 3822-3826.
- [14] LI Y, YU J J, LIU Z G, et al. Estimation and modeling of direct rapid sand filtration for total fecal coliform removal from secondary clarifier effluents[J]. Water Science & Technology, 2012, 65(9): 1615-1623.
- [15] 刘丽君, 李拓, 张金松. 生物活性炭对典型水媒病原菌的去除作用及其迁移特征[J]. 净水技术, 2019, 38(2): 36-41.
- [16] LI J, MCLELLAN S, OGAWA S. Accumulation and fate of green fluorescent labeled *Escherichia coli* in laboratory-scale drinking water biofilters[J]. Water Research, 2006, 40(16): 3023-3028.
- [17] 黄孟斌, 王长平, 邵志昌, 等. 村镇水厂工艺升级改造及运行效果[J]. 水处理技术, 2018, 44(9): 40-426.
- [18] 邵志昌, 王长平, 黄孟斌, 等. 老旧水厂深度处理改造工程实践[J]. 中国给水排水, 2018, 34(2): 81-85.

(本文编辑: 郑晓梅)

Removal effect of turbidity and bacteria in rural drinking water by GAC-sand filter

ZENG Jie¹, CHEN Zhengfu², WU Shangshu³, YE Chengsong¹, YU Xin¹, WANG Lei⁴, ZHANG Shenghua^{1*}

1. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2. Wuhan Jiangxia District Bureau of Water and Lakes Affairs, Wuhan 430200, China

3. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China

4. Fujian Engineering and Research Center of Rural Sewage Treatment and Water Safety, Xiamen University of Technology, Xiamen 361021, China

*Corresponding author, E-mail: shzhang@iue.ac.cn

Abstract Roughing filtration-GAC-sand filtration is a simple and practical rural drinking water treatment process. The removal effects of turbidity, total bacteria count and *Escherichia coli* were tested for the pilot-scale unit, and effluent safety of -GAC-sand filter was studied. Results indicated GAC-sand filter could further reduce the effluent turbidity of roughing filter to around 0.7~2.2 NTU. As a barrier for ensuring effluent turbidity, the turbidity removal efficiency of sand layer increased by 11.1% compared with that of the GAC layer. The average removal efficiency of *Escherichia coli* by GAC-sand filter increased with the decrease of filtration rate, which was dominated by GAC layer. The average log removal rate of *Escherichia coli* was 0.79 for GAC-sand filter at filtration rate of 5 m·h⁻¹. However, microbial leakage phenomenon occurred during GAC-sand filter running, which had almost no removal effect for total bacterial counts. Thus, effective disinfection treatment should be added and guaranteed after GAC-sand filter to ensure the microbial safety of drinking water.

Keywords GAC-sand filtration; turbidity; total bacterial count; *Escherichia coli*; rural water supply