

技术总结

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.15.007

地下水源除铁锰滤池调试运行实践及思考

袁雅姝¹, 陈正洋¹, 傅金祥¹, 冯殿和², 年 新², 李 欣¹, 张丽伟¹

(1. 沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳市辽中区供水管理处, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 为了解决沈阳市辽中区西水厂出水锰含量长期超标问题,对该水厂除铁除锰滤池进行调试。采用扫洗、翻砂和添加 10~15 cm 成熟滤料等措施对滤池进行调试,68 d 后出水 Mn^{2+} 浓度低于 0.1 mg/L,滤池恢复期为 68 d;只采用扫洗、翻砂措施时,滤池恢复期为 80 d;未进行调试滤池的出水锰浓度会逐渐升高,可达到 0.48~0.61 mg/L,出水铁、锰不达标。用高压水枪对滤层表面进行扫洗和翻砂能够有效解决滤池堵塞问题,调试成熟且稳定以后的滤池过滤周期可达 25~30 h。水厂成功运行时滤池的平均滤速为 7~14 m/h、反冲洗强度为 11~12 L/(s·m²)、反冲洗时间为 20~25 min、过滤周期为 24 h,滤池出水水质能够达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。

关键词: 地下水; 除锰; 除铁; 反冲洗; 调试

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)15-0035-06

Practice and Consideration of Commissioning and Operation of Iron and Manganese Removal Filter Treating Groundwater in Liao zhong District of Shenyang City

YUAN Ya-shu¹, CHEN Zheng-yang¹, FU Jin-xiang¹, FENG Dian-he², NIAN Xin², LI Xin¹, ZHANG Li-wei¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. Water Supply Management Office of Liao zhong District, Shenyang 110168, China)

Abstract: An iron and manganese removal filter of the West Waterworks in Liao zhong District of Shenyang City was debugged to solve the problem of excessive manganese content in effluent for a long time. The filter was debugged by cleaning, sanding and adding 10-15 cm mature filter materials. After 68 days, Mn^{2+} in the effluent was lower than 0.1 mg/L, and recovery period of the filter was 68 days. The recovery period of the filter was 80 days when only cleaning and sanding were adopted. The effluent manganese concentration of the filter without commissioning gradually increased and it eventually reached 0.48-0.61 mg/L, and the effluent iron and manganese concentration couldn't meet the standard. Using a high-pressure water gun to clean and scrape the surface of the filter layer could effectively solve the problem of filter blockage. The filtration period reached 25-30 hours after successfully commission of

the filter. During the operation of the waterworks, average filtration velocity of the filter was 7–14 m/h, backwash intensity was 11–12 L/(s·m²), backwash time was 20–25 min, and filtration period was 24 hours. The effluent quality could meet *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749–2006).

Key words: groundwater; manganese removal; iron removal; backwash; commissioning

地下水是北方地区重要的生活和生产用水水源。地下水含有较高的铁、锰元素,如何降低地下水中 Fe²⁺ 和 Mn²⁺ 浓度以达到饮用水标准,一直以来都是饮用水除铁除锰研究领域的难点。20 世纪 80 年代初,中国市政工程东北设计研究院在长期的工程实践中发现了生物除锰技术。20 世纪 90 年代,提出了生物机理以及化学与生物共同作用机理。在张杰院士及其团队长期的探索和努力下,生物固锰除锰机理与工程技术已经逐渐完善。铁、锰是多价态元素,二价的铁、锰溶于水,所以天然水中尤其是地下水常常含有铁、锰。在有 Fe²⁺ 存在的情况下,铁锰氧化细菌对铁、锰始终具有高效而稳定的去除能力。水中 Fe²⁺ 的氧化还原电位比 Mn²⁺ 低,所以在单级滤层除铁除锰时,应是 Fe²⁺ 先被大量氧化去除,当水中 Fe²⁺ 浓度降至足够低的程度时,二价锰才有可能被氧化去除,即滤层上部为除铁带,下部为除锰带。锰砂滤料在实际除铁除锰的生产活动中得到了广泛应用。由于锰砂滤料的产地和种类众多,实际效果有很大差异。

近年来,我国科研人员对除锰的研究大多是从生物学角度进行分析,缺乏对工程技术的研究。原水铁、锰浓度及其比例是影响滤层成熟期的重要因素之一^[2]。笔者以沈阳市辽中区西水厂为研究对象,其地下水中铁、锰含量的比例趋近于 1:1,泥沙含量大,锰不容易被去除,出水水质长期不合格,在当今对水质要求越来越高的形势下,解决水厂出水水质不达标的问题迫在眉睫。

1 材料与方法

1.1 西水厂基本情况

沈阳市辽中区西水厂的区域供水人口数量约为 10 万人。该地区没有建设地表水蓄水工程,供水水源为地下水。水厂水源井共 4 眼,设计供水能力为 0.5×10⁴ m³/d,井深为 100 m,净水间设有 3 座普通快滤池,实际供水能力为 1.5×10⁴ m³/d,目前该水厂日供水能力处于超负荷运行状态。水厂原设计采用跌水曝气—锰砂滤池除铁除锰工艺,如图 1 所示。原水由深井泵提升进入水厂,采用两级跌水曝气,跌

水高度为 2 m,单池流量为 180~360 m³/h。除铁除锰滤池为普通快滤池,单池面积为 24.75 m²,滤速为 7~14 m/h,工作周期为 24 h。滤池填料为颗粒级配较为均匀的锰砂滤料,滤层厚度为 1 200 mm。当滤池水头损失达到限值时进行反冲洗,反冲洗强度为 16~18 L/(s·m²),设计反冲洗历时约为 10 min。反冲洗水由反冲洗泵直接自清水池内吸水,反冲洗废水通过洗砂排水槽进入排水渠后排入排污池中,同时不能满足饮用水要求的初滤水一并排至排污池,沉淀后的上清液经排水管排出厂区。

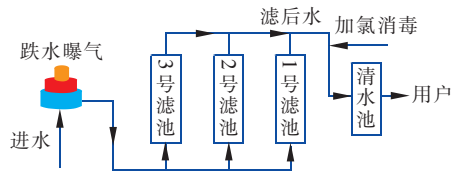


图1 工艺流程示意

Fig.1 Schematic diagram of treatment process

1.2 原水水质

该水厂原水浊度为 6~42 NTU,平均值为 15 NTU;色度为 40~160 度,平均值为 95 度;铁浓度为 1.01~1.32 mg/L,平均值为 1.2 mg/L;锰浓度为 1.0~1.4 mg/L,平均值为 1.18 mg/L;氨氮为 1.0~1.32 mg/L,平均值为 1.1 mg/L;pH 值为 6.8;跌水曝气后溶解氧为 8~9 mg/L;水温为 8~10℃。

根据《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017),判定该水源为地下水环境标准中的 V 类水(色度和浊度较高,但其他指标包括铁、锰、氨氮等均在 IV 类水限值内)。

1.3 调试方案

将 1 号滤池和 2 号滤池作为主要调试对象。针对滤池运行存在的问题,提出以下几点改善措施:①灵活错峰反冲洗,合理满足冲洗水量和供水量以保证反冲洗质量;②采用表面辅助冲洗,针对滤料表面板结问题,并考虑到现场实际情况,采用高压喷头喷水,对滤池表面进行辅助冲洗,目的是将滤料表层堆积的泥块冲碎,使原本正常反冲洗不掉的泥块变成体积较小的悬浮泥块,随着滤池反冲洗水排出;③控

制好过滤时最低初始水位,以保证提供最大的恒速过滤时段;④尽量不要靠开启滤池出水阀控制滤池水位,池内达到最高水位后立刻进行反冲洗。

水厂滤速变化较大,一天之内滤速的变化范围为7~14 m/h。调整水厂的运行参数:反冲洗强度为11~12 L/(s·m²),反冲洗时间为20~25 min,过滤周期为24 h。在1号滤池表层添加10~15 cm的成熟滤料。

1.4 分析检测项目及方法

铁浓度采用二氮杂菲分光光度法测定,锰浓度采用过硫酸铵分光光度法测定,氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定,DO采用溶解氧测定仪测定,pH值采用pH计测定,温度采用玻璃温度计测定。

2 结果与讨论

2.1 对铁的去除

当pH值为中性时,水中铁很容易经曝气接触氧化而被去除。辽中西水厂滤池进水pH值为6.8,在此环境下Fe²⁺很容易被氧化成Fe³⁺而从水中去除,生物滤层对进入滤层前已氧化为Fe³⁺的胶体颗粒也有很好的截留作用。Fe³⁺虽然不能被滤料表面活性滤膜所捕捉,但能被滤层的筛滤作用截留。有研究表明,生物氧化作用对铁的去除贡献率仅约为6%,微生物对除铁的贡献并不高。地下水中铁的去除基本靠化学氧化作用,而生物去除作用较小。

图2为滤池进出水铁浓度的变化(7月—10月,此时段正值夏季用水高峰期)。调试期间反冲洗方式:1、2号滤池采用高压水枪扫洗表面和减小反冲洗强度的反冲洗方式;3号滤池按照水厂原有反冲洗强度进行反洗;反冲洗历时15~20 min,各滤池的滤速为7~14 m/h。

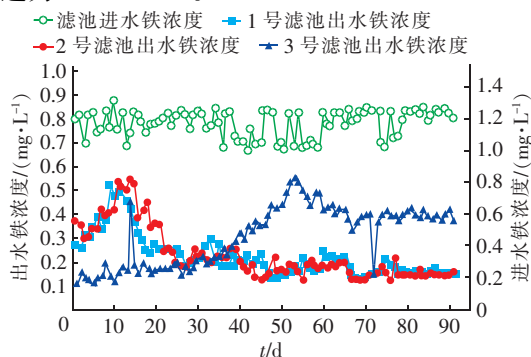


图2 滤池进出水铁浓度的变化

Fig. 2 Change of influent and effluent iron concentration of filter

从图2可以看出,0~10 d,1、2号滤池出水铁浓度逐渐升高,并超过了0.3 mg/L,最高达到0.54 mg/L。由于出水铁浓度没有减小反而增加,因此延长1、2号滤池的反冲洗时间到20~25 min。第10天以后出水铁浓度逐渐降低,至第16天,1号滤池出水铁浓度小于0.3 mg/L,达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。2号滤池到第22天以后,出水铁浓度小于0.3 mg/L。之后1、2号滤池出水铁浓度逐渐降低,最终稳定在0.14~0.21 mg/L。调试初期,3号滤池出水铁浓度为0.11~0.19 mg/L,低于0.3 mg/L。但随着时间的推移,出水铁浓度呈逐渐升高的趋势,第40天时超过了0.3 mg/L。第53天时最高达到了0.55 mg/L,之后逐渐降低,第66天以后趋于稳定,出水铁浓度在0.35~0.42 mg/L之间。经过长期观察,1、2、3号滤池的滤速基本一致。但是3号滤池在进行反冲洗时滤层表面的结垢泥块并不能被冲出滤池。由于滤池反冲洗水分布不均匀,大多数滤料未能完全膨胀,颗粒碰撞和水流的剪切力作用没有得到完全发挥,导致滤层内污染物得不到去除。在夏季,滤池避免不了超负荷运行,各滤池运行中只要管理妥善,超负荷问题并不会影响出水水质。

2.2 对锰的去除

原水锰浓度波动较大,长期观察发现,该水厂滤池长期的高强度反冲洗对滤池中的生物膜产生了较大影响。有研究表明,滤池反冲洗后总生物量去除率约为7%~19%,由此延长了滤池的成熟期。在保证出水铁、锰合格的条件下,滤层厚度为1500 mm的过滤柱最高滤速达到16.5 m/h,反冲洗周期为8 h^[3]。辽中西水厂滤池的滤层厚度设计为1200 mm,水厂超负荷运行导致滤池的滤速达到12~14 m/h,各滤池反冲洗周期均为24 h。滤速增大,相应的反冲洗周期没有缩短,长期运行使滤层出现了不同程度的板结。

由于1号滤池的滤料比较细,其表层滤料孔隙率为12.53%,表层截留能力较强。采用高压水枪对表层滤料进行翻砂、扫洗。在对1号滤池进行调试时,由于滤料为新换的滤料,换料以后没有经过培养便投入使用。所以决定在滤层表面投加10~15 cm的成熟滤料,成熟滤料取自邻近某城市水厂。经过运行调试,出水锰浓度的变化如图3所示。可以看出,初始阶段1号滤池出水锰浓度呈增加的趋势,

滤池出水锰浓度在 $0.17 \sim 0.30 \text{ mg/L}$ 之间;第48天开始,滤池的出水锰浓度逐渐降低,调试68 d以后,滤池出水锰浓度 $< 0.1 \text{ mg/L}$,达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。

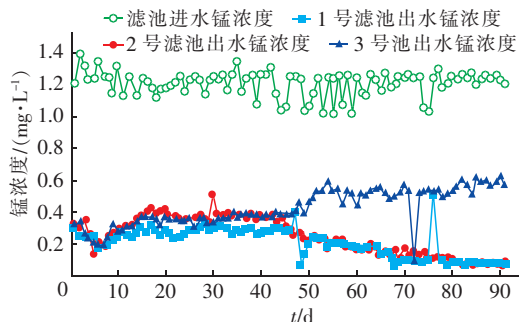


图3 滤池进出水锰浓度

Fig. 3 Change of influent and effluent manganese concentration of filter

2号滤池的滤料不如1号滤池均匀,其表层滤料的孔隙率为25.72%。与1号滤池相比,2号滤池的滤层比1号滤池厚50 cm,调试时未投加成熟滤料,仅用高压水枪对表层滤料进行翻砂、扫洗。0~5 d,2号滤池出水锰浓度逐渐降低,第5天出水锰浓度为 0.13 mg/L ,已接近达标,但是第6天以后,出水锰浓度逐渐升高。这可能是由于用高压水枪对滤池表面进行扫洗和翻砂,改变了表层滤料的滤层结构,加上反冲洗水分布不均匀,未能将滤料表面冲洗下来的氧化膜冲出滤池,影响了过滤效果。14~47 d,出水锰浓度稳定在 $0.26 \sim 0.50 \text{ mg/L}$ 之间。第48天以后出水锰浓度逐渐降低。直到第80天,出水锰浓度为 0.09 mg/L ,并且第80天以后1、2号滤池的出水锰浓度均保持在 0.1 mg/L 以下。观察捞取出的表层滤料,其表面已有褐色膜形成。2号滤池最终恢复期为80 d。

3号滤池未进行调试,按照水厂原来执行的运行方式正常运行。3号滤池出水锰浓度一直高于 0.1 mg/L ,且呈现逐渐增加的趋势。第50~90天,出水锰浓度稳定在 $0.48 \sim 0.61 \text{ mg/L}$ 之间。观察发现,滤池周边有多处水流冲刷形成的缝隙,但是滤料仍然有菌泥形成,这可能是由于滤池反冲洗水分布不均匀和冲洗强度过大,且滤池冲洗不干净造成的。

3号滤池出水锰浓度不达标,并且出水锰浓度持续上升主要是由于2019年3月份更换了锰砂滤料。滤池的下层为600 mm的新滤料,上层为600 mm从2号滤池中捞取的成熟滤料,粒径均为 $0.8 \sim$

2.0 mm 。这就造成了滤池滤料的除锰层与除铁层混淆,除锰能力短时间内不能恢复,同时滤池更换滤料后未按照生物除锰原理对滤料进行慢速培养,而是直接投入正常的生产运行中,难以形成具有稳定除锰效果的生物膜。滤料更换前后滤池出水中铁和锰的变化如图4所示。

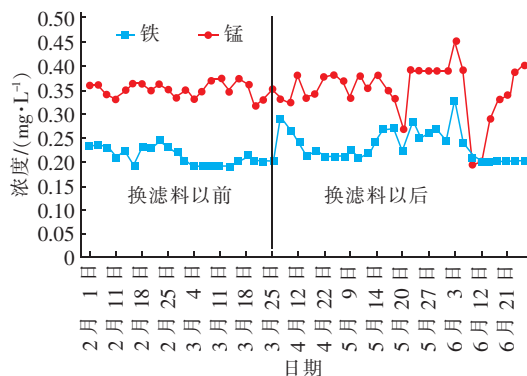


图4 滤料更换前后滤池出水中铁和锰的变化

Fig. 4 Change of effluent iron and manganese concentrations before and after filter replacement

从图4可以看出,更换滤料以后滤池出水中铁和锰没有降低的趋势。由于水厂只有3个滤池,随着城市化进程的加速,对饮用水的需求量逐渐增加,致使滤池滤速随时都在变化,当滤速增大时,除铁滤层的向下移动也对除锰造成了一定影响;在保证反冲洗周期为24 h的条件下,最大滤速可达 13 m/h ^[3]。该滤池的反冲洗周期为24 h,滤速为 $12 \sim 14 \text{ m/h}$,所以势必会对除锰造成影响。

2.3 对浊度的去除

图5为滤池进出水浊度的变化。可以看出,进水浊度变化较大,在6~20 NTU之间。调试初期,1号滤池出水浊度不稳定,为 $0.6 \sim 2.01 \text{ NTU}$,第21天以后,出水浊度基于小于1 NTU。2号滤池出水浊度同样也不稳定,最小为 0.42 NTU ,最大为 2.54 NTU ,第48天以后,出水浊度均小于1 NTU,达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的限值。0~50 d,2号滤池出水浊度比1号滤池高,是由于1号滤池投加了成熟滤料,成熟的生物膜具有很好的拦截能力。50 d以后,1号滤池和2号滤池的出水浊度均小于1 NTU,说明2号滤池的生物膜也在慢慢形成,并逐渐达到成熟。3号滤池的出水浊度变化很大,第35天时出水浊度大幅上升。由于反冲洗时间越短,出水浊度越高^[4],因此将反冲洗时间延

长5 min,即反冲洗时间为30 min,第48天以后,出水浊度基本小于1 NTU。

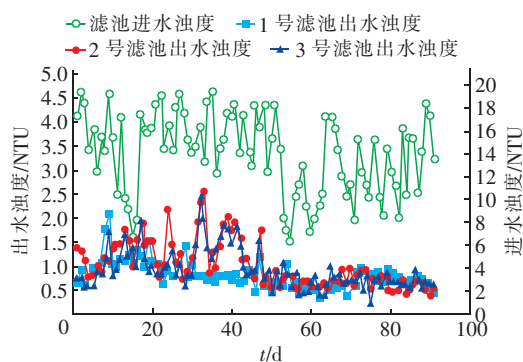


图5 滤池进出水浊度的变化

Fig. 5 Change of influent and effluent turbidity of filter

2.4 对氨氮的去除

地下水中通常含有铁、锰和氨氮。当氨氮与铁、锰共存时,其对地下水中铁、锰的氧化去除具有较大的阻碍作用^[5]。地下水中 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 可以通过单级生物滤池实现同步氧化去除。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 通过生物硝化作用最终转化为硝态氮^[6]。相对其他污染物,地下水中的氨氮比较容易去除。当进水氨氮浓度为1.0~1.32 mg/L时,原水经过滤层过滤后,各滤池出水氨氮浓度均在0.3 mg/L以下,达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。冬季时,随着温度的降低,滤池出水氨氮浓度会稍微增高,第47天以后,出水氨氮浓度增加到0.15 mg/L以上,最高达到0.26 mg/L,变化范围不大。

2.5 反冲洗强度以及扫洗、翻砂对滤池的影响

现场观察发现,水厂滤池常常处于变滤速过滤状态,滤料及滤床没有得到有效再生,过滤层表面存在板结、滤池时常有堵塞现象,过滤周期只有10~12 h。滤池过滤截留能力超过了设计水平,导致铁、锰流失,过滤效果减弱,处理效果不佳,出现浊度、铁、锰处理效果变差的情况。当滤池反冲洗强度较大时,滤料膨胀率可达到20%以上。反冲洗强度和时间是影响滤层成熟的重要因素,过高的反冲洗强度会导致滤料表面的微生物脱落,进而导致出水铁、锰不达标,同时反冲洗强度过低也会导致浊度难以达标。辽中西水厂调试以前滤池的反冲洗强度为16~18 $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$,通常锰砂滤池的反冲洗强度为11~13 $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ^[4],较大的冲洗强度和较长的冲洗历时必然会将锰砂表面存在的二氧化锰等化合物冲洗干净,从而影响滤料表面活性滤膜的形成^[7]。

有研究表明,正常反冲洗后,生物滤池在10 min内即能恢复处理能力,保证出水水质;冲洗时间的长短对成熟滤池的去除效果影响较小^[4],但是对于超负荷运行的影响较大,在滤料并未成熟的前提下,冲洗时间的确定极其重要。

该水厂各滤池均存在超负荷问题,但不应该影响滤料的成熟度。辽中西水厂滤料表面包裹的主要是铁氧化物,生物膜基本没有形成。故调试时将反冲洗强度降低至12 $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$,在清洗滤料的同时减少生物膜的损耗,促进滤池除锰能力的提高。滤池的超负荷运行使滤池滤料上层除铁带滤料堵塞较快,需较频繁地进行反冲洗,而频繁反冲洗会使下层除锰带滤料表面新生成的锰质活性滤膜受到损坏,使成熟期增加。用高压水枪对滤料表层进行翻砂和扫洗,消除滤料表层和内层的泥球、延长滤池的过滤周期,滤层堵塞问题可得到改善,60 d以后滤池过滤周期可以达到25~30 h。用高压水枪对表层滤料进行清洗,滤料表面附着的铁氧化物得到了很好的去除,有利于生成新的铁质滤膜,这种新生成的铁质滤膜具有巨大的表面积和较强的催化活性,有利于滤料对 Fe^{2+} 的氧化吸附,促进了 Fe^{2+} 在水中的去除。对表层滤料进行翻砂和扫洗增强了表层滤料的附着和拦截能力,浊度有明显的降低。滤料成熟的整个过程中都存在对锰的吸附和生物氧化过程,随着时间的推移水钠锰矿(Birnessite)从主要由生物形成的化合物转变为由物理化学形成的化合物,而Birnessite由蓬松的板状结构转变为海绵或珊瑚结构^[8]。所以滤料的及时更新对滤池除锰效率的保持和提升显得极为重要。

总之,辽中西水厂因为运行操作管理的问题导致锰质活性滤膜不断受到二价铁污染,而一旦污染后其除锰能力便会丧失,活性滤膜除锰能力的恢复需要相对较长的时间,如此恶性循环必然导致出水锰浓度增加。

3 结论

① 采用高压水枪扫洗、翻砂和投加10~15 cm的熟料,同时保证滤层厚度达到1 200~1 300 mm,对锰砂滤池进行调试后,滤池恢复期为68 d。在第16天时出水铁浓度已经低于0.3 mg/L。第21天以后,滤池出水浊度均小于1 NTU。恢复期间滤池出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度<0.5 mg/L。

② 采用单独扫洗、翻砂,需调整滤池运行参

数。锰砂滤池成熟期为80 d,第16天时出水铁含量低于0.3 mg/L。第48天后,滤池出水浊度均低于1 NTU,达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。滤池出水氨氮浓度 <0.5 mg/L。

③ 未调试滤池在调试期间出水指标未见好转。出水铁、锰浓度呈逐渐增加的趋势,水质指标达不到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。第48天以后,出水浊度 <1 NTU。

④ 用高压水枪对表层滤料进行扫洗和翻砂能有效解决滤层堵塞问题,扫洗前滤池过滤周期只有10~12 h,60 d以后滤池过滤周期可达25~30 h。

⑤ 在超负荷运行条件下,合理调整运行参数能够解决水厂出水水质不合格的问题。

参考文献:

- [1] 刘亚君. 生物除铁除锰滤池工程调试及锰氧化菌的多样性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
Liu Yajun. Project Commissioning of Biofilter for Removling Iron and Manganese and the Study on Diversity of Manganese-oxidizing Bacteria [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2012(in Chinese).
- [2] 李冬,张杰,王洪涛,等. 生物除铁除锰滤池的快速启动研究[J]. 中国给水排水,2005,21(12):35-38.
Li Dong,Zhang Jie,Wang Hongtao,*et al.* Quick start-up of filter for biological removal of iron and manganese[J]. China Water & Wastewater, 2005, 21 (12): 35-38 (in Chinese).
- [3] 李冬,路健,梁雨雯,等. 低温生物除铁除锰工艺快速启动与滤速的探求[J]. 中国环境科学,2016,36(1):82-86.
Li Dong,Lu Jian,Liang Yuwen,*et al.* Quick start-up and filter speed searching of biological iron and manganese removal process [J]. China Environmental Science, 2016,36(1):82-86(in Chinese).
- [4] Cheng Q F,Li D,Li X K,*et al.* Influence of backwashing time on iron, manganese, ammonia and turbidity removal using a pilot-scale biological filter [J]. Advanced Materials Research,2013,807/809:1097-1102.
- [5] 赵玉华,李妍,刘芳蕊,等. 有机物与氨氮污染对含铁锰地下水接触氧化过滤的影响[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2011,27(4):746-750.
- Zhao Yuhua, Li Yan, Liu Fangrui, *et al.* Effect of grounder water containing iron and manganese with ammonium and organics pollutants on the contact oxidation filter treatment[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2011, 27 (4): 746-750 (in Chinese).
- [6] 李冬,梁雨雯,杨航,等. 净化铁锰氨生物滤池内氨氮转化途径[J]. 环境科学研究,2016,29(2):240-245.
Li Dong, Liang Yuwen, Yang Hang, *et al.* Ammonia conversion process in a biofilter for iron and manganese removal[J]. Research Environmental Sciences, 2016, 29 (2): 240-245 (in Chinese).
- [7] 郭峰,李星,杨艳玲,等. 滤料特性对锰砂滤池启动期除铁除锰效能的影响[J]. 中国给水排水,2018,34(7):16-20,25.
Guo Feng, Li Xing, Yang Yanling, *et al.* Effect of filter material characteristics on iron and manganese removal efficiency during start-up period of manganese sand filter [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (7): 16-20, 25 (in Chinese).
- [8] Bruins J H, Petrusevski B, Slokar Y M, *et al.* Biological and physico-chemical formation of Birnessite during the ripening of manganese removal filters [J]. Water Res, 2015, 69: 154-161.



作者简介:袁雅姝(1964—),女,辽宁抚顺人,硕士,副教授,主要研究方向为生活饮用水水质安全保障理论与技术、水污染控制理论与技术、生物技术在水处理工程中的研究与应用等。

E-mail: yuanyashu2007@163.com

收稿日期:2020-02-25