

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.21.005

## 两级生物强化过滤处理低温微污染地下水中试研究

李伟光<sup>1,2</sup>, 吕龙义<sup>3</sup>, 金佳林<sup>1</sup>, 张多英<sup>4</sup>, 张淑梅<sup>5</sup>, 孟利强<sup>5</sup>, 王广智<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学 水资源国家工程研究中心有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 河北工业大学能源与环境工程学院 天津市清洁能源利用与污染物控制重点实验室, 天津 300401; 4. 黑龙江大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 5. 黑龙江省科学院 微生物研究所, 黑龙江 哈尔滨 150010)

**摘要:** 针对低温微污染地下水,设计开发了两级生物强化过滤工艺,研究了生物强化作用对污染物去除效果的影响。结果表明:最佳工艺流程为原水→一级跌水曝气→一级生物强化过滤(无烟煤+锰砂)→二级鼓风曝气→二级生物强化过滤(活性炭+无烟煤)→出水,稳定出水浊度为0.2 NTU、色度为3度、锰含量为0.03 mg/L、铁含量为0.01 mg/L、COD<sub>Mn</sub>为1.9 mg/L、氨氮为0.05 mg/L,远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)限值;生物强化作用可以显著提升对氨氮和有机物的去除效果,大部分有机物在二级生物强化过滤单元被去除;“活性炭+无烟煤”的滤料组合相对“无烟煤+锰砂”滤料组合的生物量及生物活性更高,更适合微生物的负载。

**关键词:** 微污染地下水; 生物强化; 两级过滤工艺; 低温; 有机物

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)21-0026-07

## Pilot-scale Study on Treatment of Low-temperature and Micro-polluted Groundwater by Two-stage Bio-enhanced Filtration

LI Wei-guang<sup>1,2</sup>, LÜ Long-yi<sup>3</sup>, JIN Jia-lin<sup>1</sup>, ZHANG Duo-ying<sup>4</sup>, ZHANG Shu-mei<sup>5</sup>, MENG Li-qiang<sup>5</sup>, WANG Guang-zhi<sup>1</sup>

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Water Resources National Engineering Research Center Co. Ltd., Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Clean Energy and Pollution Control, School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 4. School of Civil Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; 5. Institute of Microbiology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150010, China)

**Abstract:** Aiming at the low-temperature and micro-polluted groundwater, a two-stage bio-enhanced filtration process was developed, and the effect of biological enhancement on pollutant removal was studied. The results showed that the optimum technological process was as follows: raw water → primary drop aeration → primary bio-enhanced filtration (anthracite + manganese sand) → secondary blast aeration → secondary bio-enhanced filtration (activated carbon + anthracite) → effluent. The turbidity of 0.2 NTU, chromaticity of 3 degrees, manganese content of 0.03 mg/L, iron content of 0.01 mg/L,

COD<sub>Mn</sub> of 1.9 mg/L, ammonia nitrogen of 0.05 mg/L in stable effluent were much lower than the limit of *Standard for Drinking Water Quality* (GB 5749 - 2006). Biological enhancement could significantly improve the treatment efficiency of ammonia nitrogen and organic matters, and most of the organic matters were removed in the secondary bio-enhanced filtration unit. The biomass and biological activity of the filter media of “activated carbon + anthracite” were higher than those of “anthracite + manganese sand”, and the filter media of “activated carbon + anthracite” was more suitable for the loading of microorganisms.

**Key words:** micro-polluted groundwater; biological enhancement; two-stage filtration process; low temperature; organic matter

地下水作为人类重要的淡水资源,与人类活动息息相关。由于过度开采,以及人类生活生产造成的污染,使得地下水的水质变差,较大地影响了人类健康与发展<sup>[1]</sup>。近年来,地下水微污染问题在我国普遍存在,一般呈现氨氮、有机物、金属等的复合型污染,特别是在冬季低温条件下,常规工艺难以取得较为理想的处理效果<sup>[2]</sup>。

生物强化过滤技术综合了常规过滤和微生物处理技术,以常规过滤技术为基础,将微生物在滤料表面进行培养,通过微生物代谢协同过滤作用,使水中污染物得到更加高效的去除<sup>[3]</sup>。由于环境温度越低,微生物活性越差,因此对于低温微污染地下水的处理,应接种适合低温条件下生存的菌剂<sup>[4-5]</sup>。本

研究采用两级生物强化过滤工艺处理低温微污染地下水,考察生物作用强化去除污染物的能力,以期为东北高寒地区净水厂的改造提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 中试装置

中试装置搭建在东北某净水厂内,整体采用“两级曝气+两级过滤”工艺,设置两组试验装置,一组进行生物强化(A组),另一组未进行生物强化(B组)。同时每组二级滤柱分别设置“活性炭+无烟煤”与“无烟煤+锰砂”两组滤料,分别形成生物强化A组1#和2#流程及未生物强化B组1#和2#流程。中试规模每组为3.5 m<sup>3</sup>/d。中试工艺流程如图1所示。

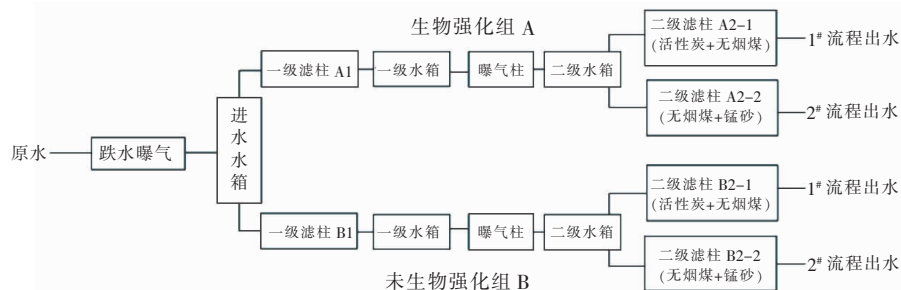


图1 中试工艺流程

Fig. 1 Flow chart of pilot-scale process

装置由有机玻璃制成,一级滤柱的内径为210 mm,高为2 900 mm;二级滤柱的内径为150 mm,高为2 900 mm。一级滤柱上层铺设无烟煤,粒径为0.5~1.0 mm,厚度为500 mm;下层铺设锰砂,粒径为0.6~1.8 mm,厚度为1 000 mm。1#流程二级滤柱上层铺设10×40目活性炭,厚度为700 mm;下层铺设无烟煤,粒径为0.5~1.0 mm,厚度为800 mm。2#流程二级滤柱上层铺设无烟煤,粒径为0.5~1.0 mm,厚度为700 mm;下层铺设锰砂,粒径为0.6~

1.8 mm,厚度为800 mm。

各滤柱滤速均为4.5 m/h。一级滤柱的反冲洗强度设为18 L/(s·m<sup>2</sup>),反冲洗时长为8 min,反冲洗周期为24 h;1#流程二级滤柱的反冲洗强度设为9 L/(s·m<sup>2</sup>),反冲洗时长为8 min,反冲洗周期为50 d;2#流程二级滤柱的反冲洗强度设为14 L/(s·m<sup>2</sup>),反冲洗时长为8 min,反冲洗周期为50 d。

### 1.2 中试用水

中试原水采用东北某净水厂的水源水,该水厂

因取水井选址不当,造成水源水水质较差,呈现多种污染物的复合污染,具体水质如下:浊度为3~5.5 NTU,色度为20~25度,铁为3.5~5.5 mg/L,锰为0.8~1.1 mg/L,氨氮为1.2~1.8 mg/L,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为3.5~5.5 mg/L,温度为2~5℃。

### 1.3 生物强化方法

生物强化负载菌为该水厂滤池的自生菌和嗜冷菌组成的复合菌,保证了对水环境的适应以及低温下对污染物的降解。菌剂组成主要包括低温异养硝化菌 *Acinetobacter* HITLi 7<sup>T</sup>,该菌株是课题组命名的一种新型高效的低温硝化菌<sup>[6]</sup>。菌剂接种量要保证载体上的生物量达到  $1 \times 10^6$  CFU/g 以上。首先,按照设定循环周期进行菌液循环负载:循环6 h、间歇2 h,共循环3个周期;在循环负载结束后,继续循环18~20 h,直至菌液完全负载至滤料上;最后,对滤柱进行弱强度反冲洗,强度为  $8 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,持续6 min。

### 1.4 分析项目及方法

浊度:哈希2100N台式浊度仪;色度:目视比色法;铁:原子吸收法;锰:原子吸收法;氨氮:纳氏试剂分光光度法; $\text{COD}_{\text{Mn}}$ :高锰酸钾滴定法;水温:温度计;三维荧光光谱采用Jasco FP-6500荧光分光光度计检测;采用比色法测定磷脂含量,绘制总磷标准曲线间接测定生物量;TTC脱氢酶活性采用分光光度法检测<sup>[7]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物强化与未生物强化的处理效能对比

中试工艺经生物强化后,先进行5 d慢速过滤调整期,之后继续运行一个月,出水水质达到稳定,表明此时已进入稳定期。选取运行稳定期45 d的水质数据进行对比分析,主要考察浊度、色度、铁、锰、氨氮及  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  六个水质指标,样品包括:原水、A组一级滤柱出水(A1)、A组1#二级滤柱出水(A2-1)、A组2#二级滤柱出水(A2-2)、B组一级滤柱出水(B1)、B组1#二级滤柱出水(B2-1)、B组2#二级滤柱出水(B2-2)。

#### 2.1.1 浊度去除效果

生物强化A组和未生物强化B组的1#和2#流程对浊度的去除效果如图2所示。原水中的大部分悬浮颗粒经一级滤柱过滤去除,一级滤柱出水浊度已基本低于0.5 NTU,满足水质标准要求。再经二级滤柱处理后,1#流程生物强化组A2-1与未强化

组B2-1的处理效果基本相同,出水浊度在0.2 NTU左右,总体去除率达93%左右。2#流程A2-2与B2-2出水浊度也无明显差异,均稳定在0.25 NTU左右,总体去除率约为90%。综上所述,生物强化组与未生物强化组对浊度的去除效果基本相同,这主要是因为浊度的去除主要与滤料的机械截留和吸附等作用有关。虽然生物同样具有吸附能力,但并没有表现出显著优势。而且浊度的去除机理与浊度的来源密切相关,需结合浊度的前驱物作进一步分析。1#流程的浊度去除效果稍优于2#流程,主要是因为“活性炭+无烟煤”滤料组合的吸附能力更强。

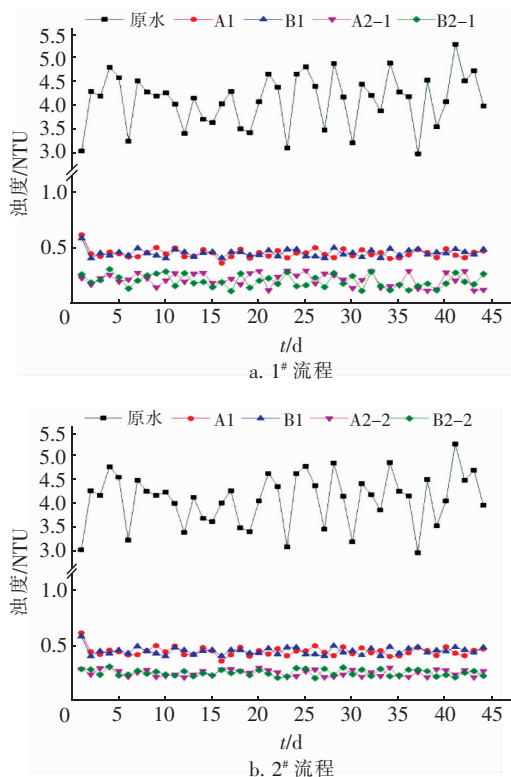


图2 生物强化A组和未生物强化B组对浊度的去除效果

Fig. 2 Turbidity removal effects of group A and B

#### 2.1.2 色度去除效果

在系统稳定运行期间,A、B组一级滤柱出水色度相近,为6~8度,低于水质标准要求(15度),去除率达70%左右。经二级滤柱处理后,生物强化组A2-1与未生物强化组B2-1的去除效果无明显差异,出水色度均为2~3度,总体去除率达88%左右。同样,A2-1与B2-2也无明显差异,出水色度也为2~3度。综上,在对原水色度的去除上,生物强化组与未生物强化组无明显差异,两组不同滤料

配置之间亦无明显差异。需要指出的是,色度采用目视比色法测量,在色度较低的情况下误差会较大。

### 2.1.3 铁去除效果

生物强化 A 组和未生物强化 B 组的除铁效果如图 3 所示。原水中铁平均浓度为 4.2 mg/L,经跌水曝气后,在一级滤柱中大部分二价铁经接触氧化作用生成三价铁析出并被截留在滤层中,因此 A1 和 B1 对铁的去除率均高达 99%,出水铁浓度约为 0.04 mg/L,远低于水质标准(0.3 mg/L)。一级滤柱出水经鼓风机曝气后进入二级滤柱,铁离子被进一步去除,A2-1、B2-1、A2-2、B2-2 出水铁含量无较大差异,均低至 0.01 mg/L 左右。综上,生物强化组与未生物强化组对铁的去除效果基本相同,可知铁离子的去除主要为化学接触氧化作用,生物氧化起辅助作用。因为出水铁浓度皆处于极低的范围,两组滤料配置之间的差异也不明显。

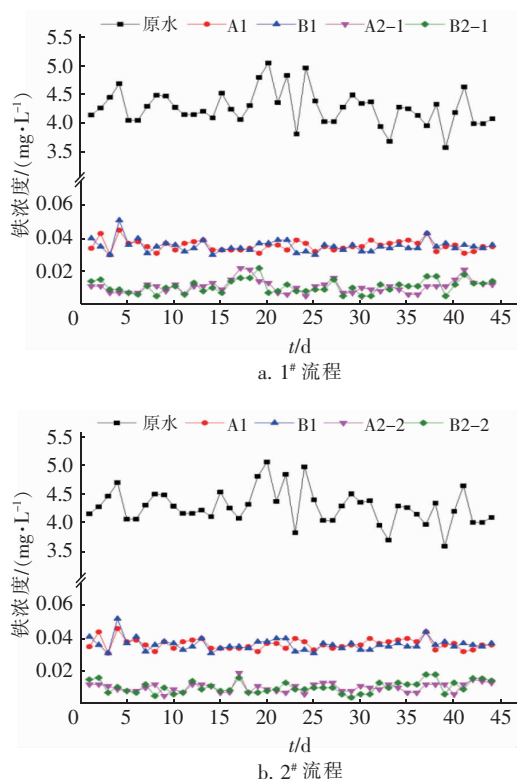


图3 生物强化 A 组和未生物强化 B 组对铁的去除效果

Fig.3 Iron removal effects of group A and B

### 2.1.4 锰去除效果

生物强化 A 组和未生物强化 B 组的除锰效果如图 4 所示。锰主要也是通过接触氧化法去除,但锰的氧化还原电位高于铁,故铁要优先锰被氧化,故一级滤柱以除铁为主,二级滤柱以除锰为主<sup>[8]</sup>,但

一级滤柱下端仍有一定的除锰能力。由图 4 可知,在一级滤柱处理前期,A、B 组出水锰浓度均较高,为 0.55 mg/L 左右,后期锰浓度开始下降,稳定在 0.3 mg/L 左右。这是因为,与铁相比,锰的氧化膜形成较慢,当锰的接触氧化膜形成后,锰的氧化速率有很大的提高。二级滤柱出水锰浓度则一直保持相对稳定状态,A2-1、B2-1、A2-2、B2-2 的处理效果相近,均能保持在 0.1 mg/L 以下。说明二级滤柱中锰的接触氧化膜已基本形成,处理效果比较稳定。生物强化组与非生物强化组对锰的去除效果相近,说明锰离子的去除主要也是化学接触氧化作用,生物氧化起辅助作用。另外,两组滤料配置之间的差异也不明显。虽然锰砂滤料的除锰能力较强,但由于生物强化前,滤料表面都已形成稳定的锰氧化膜,再加上一级滤柱出水锰含量较低,使得锰砂滤料对于锰的去除没有表现出较大的优势。

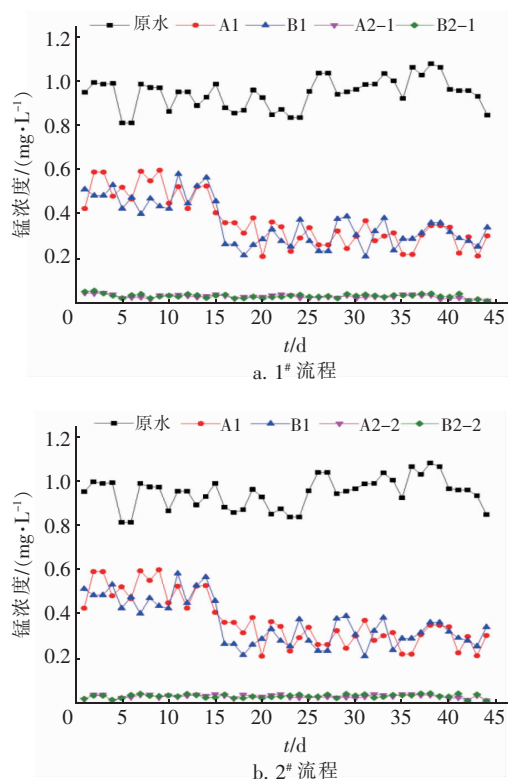


图4 生物强化 A 组和未生物强化 B 组对锰的去除效果

Fig.4 Manganese removal effects of group A and B

### 2.1.5 氨氮去除效果

生物强化 A 组和未生物强化 B 组对氨氮的去除效果如图 5 所示。原水中氨氮平均为 1.40 mg/L 左右,经跌水曝气及一级滤柱处理后,A1 和 B1 出水氨氮浓度基本相同,为 1.10 mg/L 左右。经鼓风机曝



气和二级滤柱处理后 A2-1、B2-1 出水氨氮浓度均较为稳定,平均浓度分别为 0.15、0.30 mg/L,均能保持在 0.5 mg/L 以下。A2-2 和 B2-2 出水氨氮浓度波动较大,前期出现超标现象。对比 A 组和 B 组的 1<sup>#</sup>流程和 2<sup>#</sup>流程的氨氮去除效果,可知生物强化作用提高了对氨氮的去除效果。由于低温硝化菌生长较为缓慢,生物强化对于增加硝化菌浓度是一种比较有效的方法。由于“活性炭+无烟煤”滤料组合具有较强的吸附能力,有利于氨氮的去除,故 A、B 组 1<sup>#</sup>流程的氨氮去除效果要优于 2<sup>#</sup>流程。

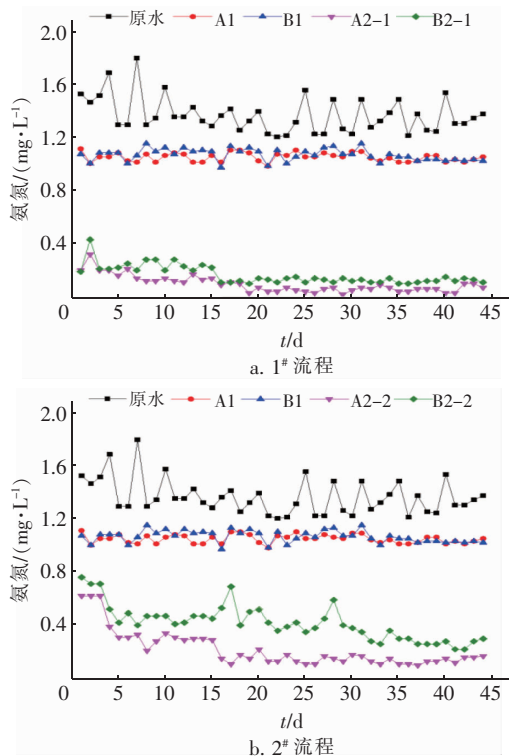


图5 生物强化A组和未生物强化B组对氨氮的去除效果

Fig.5 Ammonia nitrogen removal effects of group A and B

### 2.1.6 COD<sub>Mn</sub>去除效果

生物强化A组和未生物强化B组对COD<sub>Mn</sub>的去除效果见图6。原水的COD<sub>Mn</sub>平均为4.20 mg/L,但波动较大,经跌水曝气及一级滤柱处理后,A1和B1出水COD<sub>Mn</sub>均低于3.20 mg/L,生物强化组与未生物强化组无明显差异。经鼓风曝气和二级滤柱处理后,A2-1出水COD<sub>Mn</sub>平均为1.90 mg/L,B2-1出水COD<sub>Mn</sub>平均为2.10 mg/L,均能保持在3 mg/L以下,表明生物强化作用提高了对COD<sub>Mn</sub>的去除效果。对比图6(a)和(b)可知,A2-2和B2-2出水COD<sub>Mn</sub>有超标现象,表明“活性炭+无烟煤”滤料组合对有机物的去除效果提高显著。

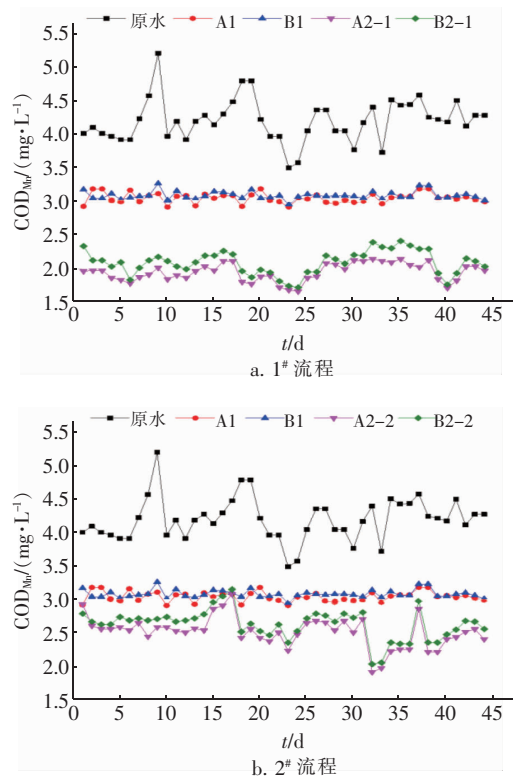


图6 生物强化A组和未生物强化B组对COD<sub>Mn</sub>的去除效果

Fig.6 COD<sub>Mn</sub> removal effects of group A and B

通过上述对各水质指标的分析,可知生物强化A组和未生物强化B组的1<sup>#</sup>流程出水各项指标均能满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)要求,说明采用两级曝气+两级过滤工艺处理低温微污染地下水可使出水水质达到饮用水标准。两级滤柱经过生物强化后可以使氨氮和有机物的去除效果有一定的提升,尤其是在原水水质波动期,生物强化作用可减少超标风险。此外,1<sup>#</sup>流程二级滤料采用的“活性炭+无烟煤”组合,对水中有机污染物的吸附能力更强,因而处理效能高于采用“无烟煤+锰砂”滤料组合的2<sup>#</sup>流程。因此,为了保证用水安全,确定优选流程为:原水→跌水曝气→生物强化一级过滤(无烟煤+锰砂)→鼓风曝气→生物强化二级过滤(活性炭+无烟煤)→出水。

### 2.2 最佳工艺去除有机物的三维荧光光谱分析

微污染地下水中主要存在一些天然有机污染物,为此采用三维荧光技术对天然有机物进行表征,结果如图7所示。可以看出,原水的显著吸收峰位置在Ex/Em为310~360 nm/370~450 nm和240~270 nm/370~440 nm处,前者为可见区类富里酸,

后者为紫外区类富里酸,同时在  $Ex/Em$  为  $350 \sim 440 \text{ nm}/370 \sim 450 \text{ nm}$  处也存在显著荧光峰,为类腐殖酸<sup>[9]</sup>。因此,原水中的有机物主要为类富里酸和类腐殖酸类物质。对比 A1 出水与原水的荧光光谱,可以看出,可见区类富里酸及紫外区类富里酸区域荧光强度都有一定程度降低,但类腐殖酸区域荧光强度无明显变化,说明一级滤柱对类富里酸有一定

的去除能力,但基本无法去除类腐殖酸类物质。从 A2-1 出水三维荧光光谱可以看出,可见区类富里酸及紫外区类富里酸的荧光强度都有显著降低,类腐殖酸区域已无明显荧光强度,说明二级滤柱去除了大部分类富里酸和几乎全部的类腐殖酸类物质。整体看来,两级生物强化过滤工艺对原水中有机物的去除效果明显,且二级滤柱发挥了主要作用。

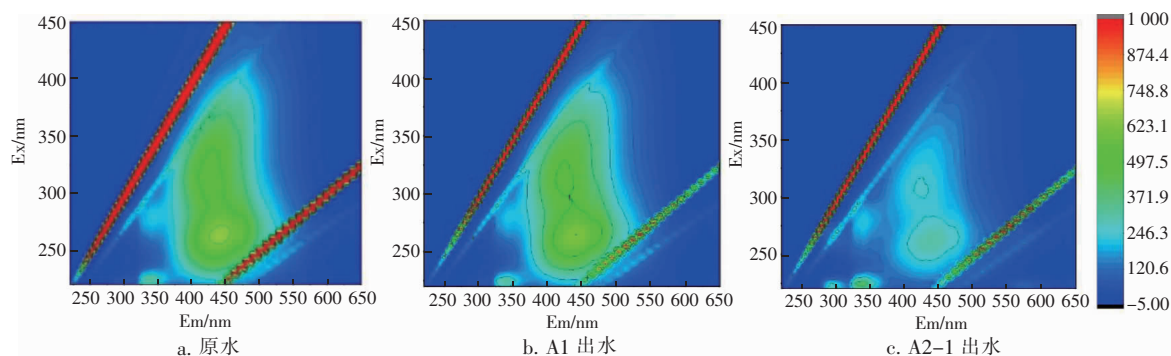


图 7 原水、A1 出水及 A2-1 出水三维荧光光谱

Fig. 7 Three-dimensional fluorescence spectrograms of raw water, A1 effluent and A2-1 effluent

### 2.3 生物强化滤料生物量与生物活性分析

由 2.1 节可知,生物强化作用显著地提升了对氨氮和有机物的去除效果,为此进一步分析生物强化滤料负载的生物量和生物活性,从微生物代谢的角度证实生物强化的有效性。由于二级滤柱在去除有机物方面发挥了主要作用,故主要对比运行稳定期二级滤柱生物强化组和未生物强化组滤料负载的生物量与生物活性,结果如图 8 所示。

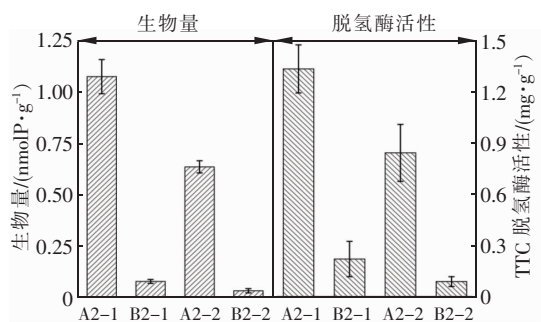


图 8 生物强化 A 组和未生物强化 B 组二级滤柱的生物量与 TTC 脱氢酶活性

Fig. 8 Biomass and TTC dehydrogenase activity of secondary filter columns in group A and B

从图 8 可以看出,生物强化组 A2-1 和 A2-2 的生物量是未生物强化组 B2-1 和 B2-2 的 10 倍左右,这说明生物强化组负载了更多的微生物,生物降解作用更强,通过微生物代谢强化了滤柱对氨氮

和有机物的去除能力<sup>[10]</sup>。A2-1 的生物量显著高于 A2-2 的生物量,说明“活性炭+无烟煤”的滤料组合相对“无烟煤+锰砂”的滤料组合更适合微生物的负载,这主要归功于活性炭的多孔结构。从 TTC 脱氢酶活性指标也同样得出类似结论,生物强化组 A2-1 和 A2-2 的 TTC 脱氢酶活性显著高于未生物强化组的 B2-1 和 B2-2,说明生物强化组滤料上的微生物代谢活性更强,能够消耗更多的氨氮和有机物。“活性炭+无烟煤”滤料组合的 TTC 脱氢酶活性更高些,也是因为活性炭多孔结构有利于微生物的负载,使得单位质量滤料上的 TTC 脱氢酶含量更高。

综上所述,“活性炭+无烟煤”滤料组合更适合生物强化过滤工艺,活性炭和无烟煤滤料都具有多孔结构,具有较强的吸附性能,可以发挥吸附及微生物代谢的协同作用,污染物首先经过吸附作用固定在滤料表面,然后通过微生物代谢作用去除,这样不但可以延长滤柱的反冲洗周期,同时也可以抵抗进水水质的波动,使出水水质稳定达标。

### 3 结论

① 生物强化 A 组和未生物强化 B 组的 1<sup>#</sup> 流程出水各项指标均能满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),两级生物强化过滤工艺可以显著提升对氨氮和有机物的去除效果,尤其是在水质

波动期,生物强化工艺相对于未生物强化工艺有更好的稳定性。最佳工艺流程为:原水→跌水曝气→生物强化一级过滤(无烟煤+锰砂)→鼓风曝气→生物强化二级过滤(活性炭+无烟煤)→出水。

② 受复合污染地下水中的有机物主要为类富里酸和类腐殖酸类物质。一级生物强化过滤去除了部分类富里酸物质,二级生物强化过滤去除了剩余的类富里酸物质和几乎全部的类腐殖酸类物质。

③ 生物强化组二级滤柱的生物量和TTC脱氢酶活性显著高于未生物强化组。“活性炭+无烟煤”滤料组合相对“无烟煤+锰砂”滤料组合更适合微生物的负载,表现出更高的生物量及生物活性。

#### 参考文献:

- [1] 卢莉莉. 浅析人类活动对运城市地下水资源的影响[J]. 地下水, 2007(3): 39-40.  
LU Lili. Analysis of the influence of human activities on groundwater resources in Yuncheng City [J]. Groundwater, 2007(3): 39-40 (in Chinese).
- [2] 张骞. 复合污染地下水两级处理工艺中试试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.  
ZHANG Qian. Pilot Study on Two-stage Treatment Process of Compound Polluted Groundwater [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012 (in Chinese).
- [3] EL GAMAL M, MOUSA H A, EL-NAAS M H, *et al.* Bio-regeneration of activated carbon: a comprehensive review [J]. Separation and Purification Technology, 2018, 197: 345-359.
- [4] 李冬, 曹瑞华, 杨航, 等. 低温高铁锰氨氮地下水两级生物净化工艺[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(2): 8-18.  
LI Dong, CAO Ruihua, YANG Hang, *et al.* Two-stage biological purification process of groundwater with low temperature and high iron, manganese and ammonia nitrogen [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(2): 8-18 (in Chinese).
- [5] 杨墨, 刘乾亮, 吕东伟, 等. 低温异养硝化-好氧反硝化菌筛选及其脱氮特性[J]. 中国给水排水, 2019, 35(23): 100-104.  
YANG Mo, LIU Qianliang, LÜ Dongwei, *et al.* Isolation of cold-resistant heterotrophic nitrification-aerobic denitrification strain and its nitrogen removal performance [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(23): 100-104 (in Chinese).
- [6] 秦雯. Acinetobacter HITLi 7T 适冷机制及其构建的菌群去除低温水中氨氮的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
QIN Wen. Study on the Cold Adaptation Mechanism of Acinetobacter HITLi 7T and the Removal of Ammonia Nitrogen from Cryogenic Water by Its Constructed Microflora [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).
- [7] 金佳林. 两级生物强化过滤工艺对微污染地下水的处理效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
JIN Jialin. Study on the Treatment Efficiency of Micro-polluted Groundwater by Two-stage Biological Enhanced Filtration Process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).
- [8] 李冬, 曾辉平. 高铁锰地下水生物净化技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
LI Dong, ZENG Huiping. Biological Purification Technology of High Iron and Manganese Groundwater [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015 (in Chinese).
- [9] 申颖洁, 廖日红, 战楠, 等. 生物强化组合工艺处理河水的三维荧光及生物多样性分析[J]. 环境工程学报, 2013, 7(1): 125-131.  
SHEN Yingjie, LIAO Rihong, ZHAN Nan, *et al.* Three-dimensional fluorescence and biodiversity analysis of river water treated by bioenhanced combined process [J]. Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(1): 125-131 (in Chinese).
- [10] 邵玉楠, 傅金祥, 高国伟, 等. 生物增强技术净化含铁、锰、氨氮微污染地下水[J]. 中国给水排水, 2013, 29(21): 11-14.  
GAO Yunan, FU Jinxiang, GAO Guowei, *et al.* Biological enhancement technology for purification of micro-polluted groundwater containing iron, manganese and ammonia nitrogen [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(21): 11-14 (in Chinese).

作者简介: 李伟光(1962-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 教授, 主要从事饮用水安全保障研究。

E-mail: hitlw@126.com

收稿日期: 2020-08-19

修回日期: 2020-09-10

(编辑: 李德强)