

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 17. 007

# 电-生物耦合慢滤处理高寒牧区融雪水的效能

汪光宗<sup>1,2</sup>, 王宝山<sup>1,2</sup>, 张继成<sup>1,2</sup>, 许亚兵<sup>1,2</sup>

(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:** 针对我国高寒牧区水源水间歇式、偶发性污染物超标问题,研发了以电-生物耦合慢滤为核心的处理技术,并将其用于处理高寒牧区融雪水,探究其对常规污染物的去除效果,同时采用三维荧光光谱分析了其对有机物的去除机理。结果表明,电-生物耦合慢滤装置在5 V电压下挂膜时间为28 d,较传统生物慢滤装置缩短了7 d;在水温为5~15 °C、滤速为0.2 m/h、电压为10 V的工况下,电-生物耦合慢滤装置对高寒牧区融雪水中浊度、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、UV<sub>254</sub>的平均去除率分别为97.66%、61.11%、91.67%、72.94%,相比传统生物慢滤装置,COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、UV<sub>254</sub>去除率分别提高了36.38%、39.63%、38.20%;电-生物耦合慢滤装置对进水中4个主要荧光峰的荧光强度分别削减了36.67%、66.22%、67.08%、69.76%,实现了对色氨酸类蛋白质、富里酸和胡敏酸类腐殖质的有效去除。

**关键词:** 电-生物技术; 生物慢滤; 融雪水; 高寒牧区

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)17-0042-07

## Efficacy of Electro-biological Coupling Slow Filtration for Treatment of Snowmelt Water in Alpine Pastoral Area

WANG Guang-zong<sup>1,2</sup>, WANG Bao-shan<sup>1,2</sup>, ZHANG Ji-cheng<sup>1,2</sup>, XU Ya-bing<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** Aiming at the issue of intermittent and occasional pollutant exceeding standard in source water in alpine pastoral area in China, a treatment technology based on electro-biological coupling slow filtration was developed and implemented for the treatment of snowmelt water in alpine pastoral area to explore its removal efficacy on conventional pollutants, and its removal mechanism of organic matters was analyzed through three-dimensional fluorescence spectrum. The biofilm formation time of the electro-biological coupling slow filter was 28 days at a voltage of 5 V, which was 7 days shorter than that of the traditional biological slow filter. The average removal rates of turbidity, COD<sub>Mn</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and UV<sub>254</sub> were 97.66%, 61.11%, 91.67% and 72.94%, respectively, at water temperature of 5–15 °C, filtration speed of 0.2 m/h and voltage of 10 V. Compared with traditional biological slow filter, the removal rates of COD<sub>Mn</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and UV<sub>254</sub> were elevated by 36.38%, 39.63% and 38.20%, respectively. The fluorescence intensity of the four major fluorescence peaks in the influent was decreased by 36.67%, 66.22%, 67.08%,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1100103)

通信作者: 王宝山 E-mail: wbs@mail.lzjtu.cn

and 69.76%, respectively, indicating that the removal of tryptophan protein, fulvic acid, and humic acid was effectively achieved by the electro-biological coupling slow filter.

**Key words:** electro-biological technology; biological slow filtration; snowmelt water; alpine pastoral area

高寒牧区牧民的生活饮用水以游牧附近江河水、溪水和井水直饮或经简单沉淀、过滤后饮用为主,其居住区往往也是牲畜聚集区,易引发附近水体污染,导致水体间歇式、偶发性污染物超标,对高寒牧区牧民的饮用水水质安全构成威胁。高寒牧区水源水具有低温低浊及季节性低温高浊的水质特点,颗粒物浓度低、碱度低、Zeta电位高、黏度高<sup>[1]</sup>,处理工艺主要有强化混凝、改进沉淀、增强过滤等<sup>[2]</sup>,但这些工艺在应用中存在效果不佳、成本较高、构筑物结构复杂及对运维管理人员要求高等缺点<sup>[3-4]</sup>,不适合用于高寒牧区饮用水分散式处理。

生物慢滤技术是集机械过滤、生物吸附降解、静电吸附、沉淀等物化和生化作用为一体的低碳环保水处理技术,适用于分散式供水<sup>[5]</sup>。但是牧区水源易受季节性影响且水质变化较大,常年温度较低,会导致滤料表面微生物活性较低,致使出水水质不佳。而电-生物技术通过弱电压刺激微生物活性,可加快微生物对污染物的降解。因此,笔者将电-生物技术与生物慢滤技术相结合,形成电-生物耦合慢滤系统,通过在生物慢滤系统中构建电场,提高参加电化学反应的分子或离子活性,优化滤料表面生物膜中的菌群结构。同时,电极电化学氧化可使部分难生物降解物质氧化为易生物降解物质,进而被微生物去除,胁迫微生物高效降解水中的污染物<sup>[6]</sup>。笔者将电-生物耦合慢滤技术用于处理模拟高寒牧区融雪水,探究该技术对浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 等的去除效果,并结合三维荧光光谱分析溶解性有机物(DOM)的去除机理,以期高寒牧区饮用水处理提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验进水

实验进水采用人工配制的模拟高寒牧区融雪水,取250 g高寒牧草、35 g牛粪及50 g土壤混合溶于10 L自来水中,形成较高浓度的母液,高寒牧草、牛粪、土壤均取自玛曲县阿万仓镇游牧区。高浓度母液泡制两天后,与自来水按1:12的比例混合形成

实验进水,水质特征如下:浊度为9~25 NTU,温度为8~15 °C, pH为8.4~8.6,电导率为350~420  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , DO为5.8~7.8 mg/L,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为0.28~0.65 mg/L,  $\text{UV}_{254}$ 为0.055~0.095  $\text{cm}^{-1}$ ,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为3.2~5.5 mg/L。实际高寒牧区水源水质如下:浊度为10~50 NTU,温度为1~20 °C, pH为8.2~8.6,电导率为250~350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , DO为5~8 mg/L,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为0.07~0.87 mg/L,  $\text{UV}_{254}$ 为0.050~0.110  $\text{cm}^{-1}$ ,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为2.5~10 mg/L。

### 1.2 实验装置与启动

图1为自制的电-生物耦合慢滤实验装置,滤柱采用高为1 900 mm、内径为150 mm的有机玻璃柱。原水经泵提升至布水器后,自上而下依次经过覆水区、电-生物耦合慢滤层、承托层、集水区,经三通水位调节器后出水。电-生物耦合慢滤层外侧(滤柱内壁)采用钛基二氧化钨阳极网,中间设有纯钛阴极柱,由稳压电源通过导线连接阴、阳极。装置设有反冲洗水冲及气冲对滤料进行清洗。

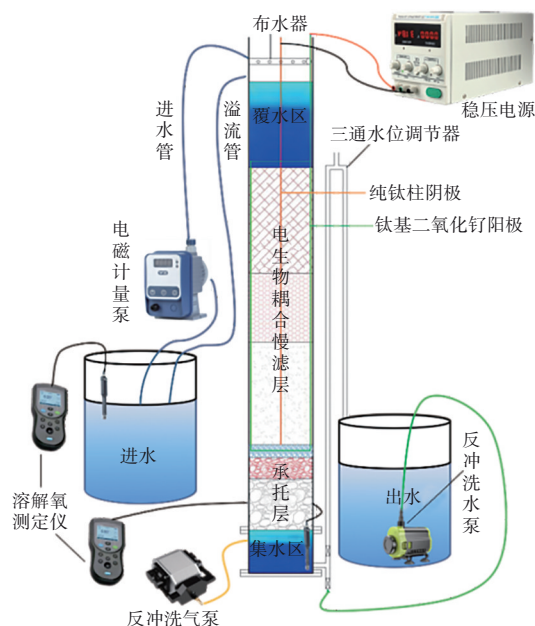


图1 电-生物耦合慢滤实验装置

Fig.1 Electro-biological coupling slow filtration device

电-生物耦合慢滤层采用柱状活性炭(直径为3 mm,厚度为400 mm)、生物陶粒(粒径为2~3 mm,厚

度为300 mm)、石英砂(粒径为0.5~1.0 mm,厚度为400 mm)级配复合滤料,承托层从上往下依次是粗砂(粒径为0.9~1.5 mm,厚度为30 mm)、砾石(粒径为3~5 mm,厚度为50 mm)、卵石(粒径为3~10 mm,厚度为120 mm)。

实验采用自然富集挂膜,滤速设为0.2 m/h,电压参考张泽玺等<sup>[7]</sup>的研究选取5 V,并与传统生物慢滤系统(0 V)挂膜进行对比,当 $COD_{Mn}$ 去除率稳定在30%以上即为挂膜成功。

### 1.3 分析项目与方法

$COD_{Mn}$ :高锰酸钾法; $NH_4^+-N$ :纳氏试剂分光光度法;浊度:听瑞WGZ-1A浊度仪; $UV_{254}$ :紫外-可见分光光度法;pH:雷磁PHS-3C pH计;DO:哈希HQ30d溶氧仪;电导率:雷磁DDS-11A电导率仪。

三维荧光光谱采用荧光分光光度计(F-7100, Hitachi, 日本)测定,并参考Chen等<sup>[8]</sup>的方法将三维荧光光谱划分为5个区域,结合特征峰荧光强度变化及蓝移现象,反映三维荧光光谱区域内DOM的转化过程。

## 2 结果与讨论

### 2.1 电-生物耦合慢滤系统的启动

实验采用传统生物慢滤(0 V)、电-生物耦合慢滤(5 V)两种工况分别进行自然富集生物挂膜,滤料表面温度均维持在8~15℃,挂膜期间 $COD_{Mn}$ 和 $NH_4^+-N$ 指标的变化及其去除率见图2。由图2(a)可知, $COD_{Mn}$ 去除率在前15 d内均呈下降趋势,但电-生物耦合慢滤装置的 $COD_{Mn}$ 去除率高于传统生物慢滤装置,且前者的 $COD_{Mn}$ 去除率在28 d后始终保持在30%以上,而后者在35 d后才保持在30%以上。另外,两个装置对 $UV_{254}$ 的去除规律与 $COD_{Mn}$ 类似,表明施加5 V电压有助于提高生物慢滤对 $COD_{Mn}$ 和 $UV_{254}$ 的去除率,这可能是因为适当的电压提高了微生物生长繁殖速率<sup>[9]</sup>,增强了微生物活性,加快了微生物对有机物的降解和转化;同时,施加5 V电压可缩短生物慢滤的挂膜时间,这主要是因为弱电压强化了微生物体内酶活性的代谢、促进了生物膜的形成<sup>[10]</sup>。由图2(b)可知,传统生物慢滤装置对 $NH_4^+-N$ 的去除率略高于电-生物耦合慢滤装置,这可能是因为传统生物慢滤装置中的pH相比电-生物耦合慢滤装置更偏弱碱性,而弱碱性环境更有利于硝化反应的进行<sup>[11]</sup>;另外,虽然电-生物耦合慢滤

装置中的DO浓度比传统生物慢滤装置要高,可为硝化菌和亚硝化菌的生长创造良好的环境,促进 $NH_4^+-N$ 的转化,但在电催化氧化作用下有机氮可降解、转化为 $NH_4^+-N$ ,而 $NH_4^+-N$ 的转化速率可能低于其生成速率,致使电-生物耦合慢滤装置的 $NH_4^+-N$ 去除率较传统生物慢滤装置略低。

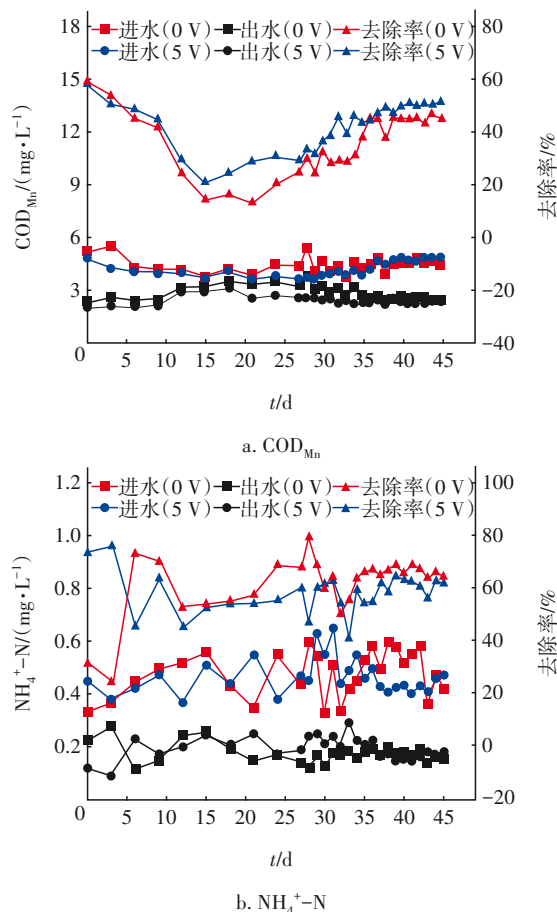


图2 反应器生物挂膜期间的运行效果

Fig.2 Operation effect of reactor during biofilm formation

实验中发现,传统生物慢滤装置进、出水pH始终维持在8.50左右,变化较小;而电-生物耦合慢滤装置的出水pH相比进水pH,随着时间的推移而逐步降低,最终pH稳定在7.55左右,这表明5 V电压下反应器内有酸性物质生成,部分有机物在电氧化作用下生成了有机酸。同时发现,电-生物耦合慢滤装置的出水DO浓度始终高于传统生物慢滤装置,并且在初始阶段其DO浓度下降趋势也较为平缓,这主要是因为阳极析氧为反应器提供了较多的氧气,这些氧气为微生物生长提供了更好的有氧环境;在15~20 d期间出水DO浓度快速下降,这可能是滤料表面微生物大量繁殖快速消耗DO的结

果<sup>[12]</sup>,同时营养物的消耗也快速增加,这与图2(a)中 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 去除率开始上升的趋势相一致。两个装置的出水浊度最终均稳定在0.3 NTU左右,表明电压对浊度的影响较小,主要原因是慢滤装置对浊度的去除主要是物理拦截作用,电氧化及微生物降解作用基本无影响。

## 2.2 电压对电-生物耦合慢滤系统的影响

通过施加不同电压,探究电-生物耦合慢滤系统中不同电压对污染物去除效果的影响,进一步分析微生物降解与电催化氧化在电-生物耦合慢滤系统中的作用机理。待电-生物耦合慢滤系统生物挂膜完成后,依次施加2.5、5、7.5、10、12、15、20、25 V的电压,在每次调节电压后稳定运行一周再测定污染物的去除效果。

### 2.2.1 不同电压对污染物去除效果的影响

实验结果显示,随着电压的逐步增大,出水pH逐渐从弱碱性变为弱酸性,表明电压的增大促进了有机酸类物质的增加,这可能是极板生成了强氧化性物质<sup>[13]</sup>,这些物质与水中有机物反应生成有机酸,使得pH逐渐偏弱酸性。同时,出水DO浓度亦逐步升高,最后甚至高于进水DO浓度,这可能因为随着电压的升高,极板析氧增多<sup>[14]</sup>,产生的氧气无法及时被微生物利用,最终导致出水DO浓度逐渐增大。另外,当电压在10 V以下时,出水浊度稳定在 $(0.3 \pm 0.2)$  NTU,当电压升至12 V以上后出水浊度有明显升高现象,这可能是因为电压升高,极板析氧和析氢能力增强,产生的大量气泡致使滤料内部呈微悬浮状态,同时在滤料颗粒表面形成较大剪切力和摩擦力,使得滤料表面生物膜脱落<sup>[15]</sup>,导致出水浊度开始上升。

图3为不同电压下 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 去除效果的变化。可以看出, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 去除率均在2.5 V和10 V电压下出现较高值,主要是因为,低电压强化了微生物体内酶活性的代谢<sup>[10]</sup>,提高了微生物生长繁殖速率<sup>[9]</sup>和电子转移速率<sup>[16]</sup>,进而加快了微生物对污染物的降解和转化;而电压在10 V时 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除率达到最高,平均为61.11%和91.67%,这可能是因为极板产生的强氧化性物质将难降解或大分子有机物转化为易降解或小分子有机物<sup>[17]</sup>,微生物进一步高效降解污染物,从而表现出较高的污染物去除率。随着电压的进一步增大,极板产生的大量气泡使生物膜开始脱

落<sup>[15]</sup>,致使各污染物去除率下降,同时过高电压会直接杀死微生物<sup>[6]</sup>,也会导致污染物去除率降低。

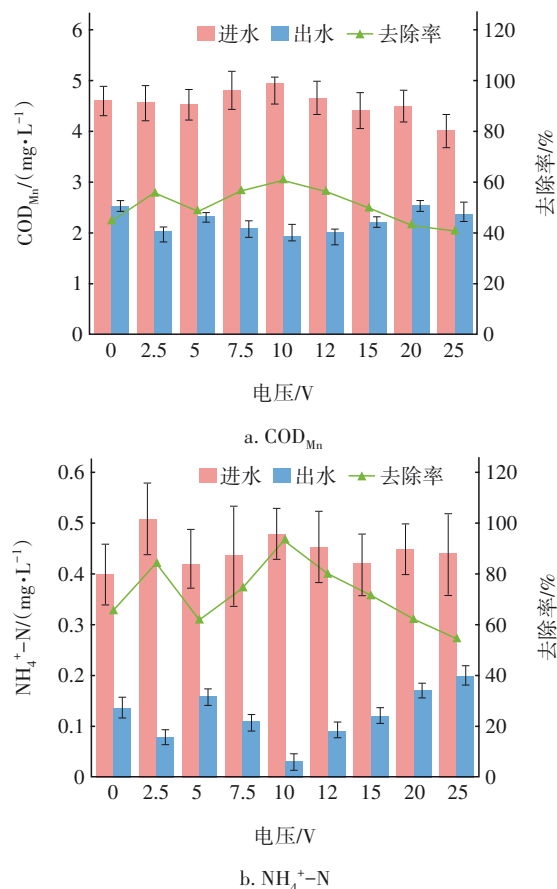


图3 不同电压下污染物的去除效果

Fig.3 Removal effect of pollutants under different voltages

### 2.2.2 0 V与10 V电压下的处理效果对比

前期实验表明,电压在10 V下有较好的除污效果,为进一步探究各滤料层在有机物降解方面的作用机理,在0 V和10 V两种工况下分析各滤料层污染物指标的去除率变化。结果显示,在0 V工况下,活性炭层对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$ 的平均去除率分别为18.43%、24.68%、30.77%,分别占总去除率的28.07%、58.30%、55.08%,表明 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$ 主要在活性炭层被去除,活性炭层作为滤料的表层,最有利于微生物的生长繁殖,对有机物的去除主要依靠生物降解和生物吸附作用,而随着滤层的深入,DO浓度逐渐降低,滤料表面的生物量及生物活性亦降低<sup>[18]</sup>,进而对有机物的去除效果减弱。在10 V工况下,活性炭层对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$ 的平均去除率分别为59.67%、14.81%、75.00%,陶粒层相对活性炭层平均去除了12.30%的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、25.93%的

COD<sub>Mn</sub>、109.83%的UV<sub>254</sub>,表明对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除主要集中在活性炭层,而且相比0 V工况NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率有较大的提高,这可能是因为电氧化作用直接将大部分NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N转化成N<sub>2</sub><sup>[19]</sup>;与0 V工况相比,活性炭层对COD<sub>Mn</sub>和UV<sub>254</sub>的去除率均较低,这可能是因为10 V电压下极板直接或间接产生强氧化性物质将难降解或大分子有机物转化为易降解或小分子有机物<sup>[17]</sup>,从而生成了大量可被高锰酸钾氧化的物质,表现出较低的COD<sub>Mn</sub>去除率,同时UV<sub>254</sub>的增加表明共轭双键的芳香类或烃类有机物增加了,这可能是因为该类有机物的生成速率小于降解速率,而UV<sub>254</sub>在陶粒层和石英砂层则被有效去除,这可能是因为微生物发挥了生物降解和生物吸附的作用,说明电-生物耦合慢滤条件下,活性炭层主要发挥了电氧化作用,对某些难降解污染物实现电氧化,而在陶粒层和石英砂层微生物降解发挥了主要作用,实现了有机物的矿化,从而表现出较好的处理效果。

### 2.3 电-生物耦合慢滤系统对有机物的去除机理

针对最优工况(10 V)进行三维荧光光谱分析,结果如图4所示。

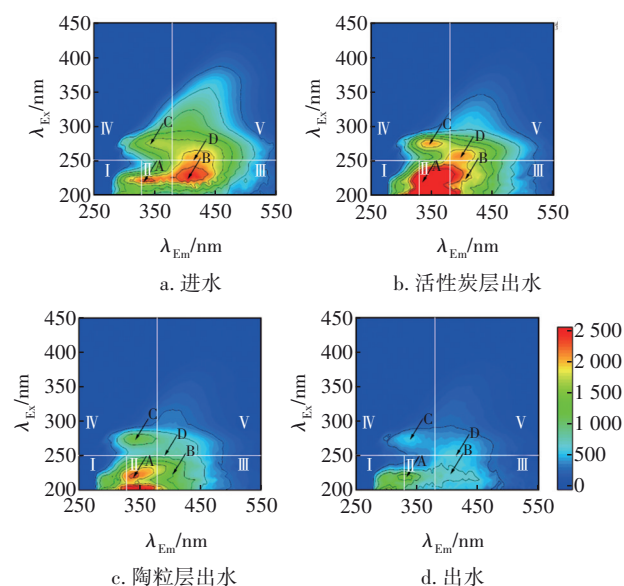


图4 进、出水的三维荧光光谱(电压=10 V)

Fig.4 Three-dimensional fluorescence spectrum of influent and effluent (voltage=10 V)

由图4(a)可知,进水中主要有4个荧光峰,荧光峰A(区域Ⅱ), $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=220/335$  nm,表征低激发波长色氨酸类蛋白质;荧光峰B(区域Ⅲ), $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=226/$

405 nm,表征紫外光富里酸类物质,程庆霖等人<sup>[20]</sup>研究表明此类峰主要与某些大分子质量和芳构化程度较高的多环芳烃有关,属于难降解有机污染物;荧光峰C(区域Ⅳ), $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=276/350$  nm,表征高激发波长色氨酸类蛋白质,主要属于微生物源的类色氨酸组分;荧光峰D(区域Ⅴ), $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=250/415$  nm,表征胡敏酸类物质。以上表明,进水中DOM以色氨酸类蛋白质、富里酸和胡敏酸类腐殖质为主。

进水经电-生物耦合慢滤装置处理后,出水中4个荧光峰强度均有较明显的降低,分别降低了36.67%、66.22%、67.08%及69.76%,表明该装置对色氨酸类蛋白质、富里酸和胡敏酸类腐殖质均有较好的去除效果。由图4(b)可知,活性炭层出水中荧光峰A的面积变大,其荧光强度由进水的2 370.1 a. u. 增至3 632.2 a. u.,增幅达到53.25%,表明进水经活性炭层后产生了较多的低激发波长色氨酸类蛋白质;同时荧光峰C的荧光强度也由1 692.6 a. u. 增至2 082.2 a. u.,表明生成了高激发波长色氨酸类蛋白质,这与活性炭层出水中UV<sub>254</sub>大量增加相一致。另外,活性炭层出水中荧光峰B、C、D在发射波长上分别蓝移了5、5、20 nm,蓝移现象主要是由于氧化作用导致水体中某些有机物结构发生了改变,具体表现为稠环芳烃类有机物被分解成小分子有机物、芳香环类有机物水解开环、某些特定官能团消失以及共轭基团数量的减少等<sup>[21]</sup>,这表明活性炭层对DOM的降解主要发挥了电氧化作用。活性炭层大量增加的色氨酸类蛋白质具有结构简单、易分解等特点,提高了DOM的可生化性。经陶粒层和石英砂层处理后,色氨酸类荧光峰基本消失,表明可生化性有机物大幅减少,进一步说明陶粒层和石英砂层对有机物的去除是微生物降解发挥了主要作用。

### 3 结论

① 在水温为5~15℃、滤速为0.2 m/h工况下,传统生物慢滤装置和电-生物耦合慢滤装置(5 V)均采用自然富集挂膜,挂膜时间分别为35、28 d,表明适当施加电压可缩短生物慢滤系统的挂膜时间。

② 电-生物耦合慢滤技术对高寒牧区融雪水中的污染物具有显著的去效果。在水温为5~15℃、滤速为0.2 m/h的工况下,传统生物慢滤装置对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、COD<sub>Mn</sub>、UV<sub>254</sub>的去除主要集中在活性炭

层,平均去除率分别为18.43%、24.68%、30.77%,占总去除率的28.07%、58.30%、55.08%,表明活性炭层在生物慢滤对有机物的降解中发挥了重要作用;电-生物耦合慢滤装置(10 V)对浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{UV}_{254}$ 的平均去除率分别为97.66%、61.11%、91.67%、72.94%,相比传统生物慢滤装置, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{UV}_{254}$ 平均去除率提高了36.38%、39.63%、38.20%,这表明在电催化氧化和微生物降解协同作用下,主要污染物的去除率有明显提高。

③ 电-生物耦合慢滤技术对水中DOM组分具有较好的去除效果。针对进水中以色氨酸类蛋白质、富里酸和胡敏酸类腐殖质为主的DOM,电-生物耦合慢滤技术在活性炭层通过电氧化主导作用将难降解有机物转化为可生化性较好的色氨酸类蛋白质,再经陶粒层和石英砂层中微生物的高效降解,最终实现对DOM的有效去除。

#### 参考文献:

- [1] 马军,江进,杨友强,等.机械旋转格网强化混凝处理低温低浊水研究[J].中国给水排水,2012,28(17): 5-8.  
MA Jun, JIANG Jin, YANG Youqiang, *et al.* Mechanical rotating grid for enhanced coagulation of low temperature and low turbidity water[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(17): 5-8 (in Chinese).
- [2] 汪志永,戴红玲,周政,等.低温低浊水处理技术的研究与应用[J].水处理技术,2016,42(10): 20-24.  
WANG Zhiyong, DAI Hongling, ZHOU Zheng, *et al.* Research and application of low temperature and low turbidity water treatment technology[J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(10): 20-24 (in Chinese).
- [3] 苏兆阳,李星,杨艳玲.强化混凝技术在水处理中的研究进展[J].水处理技术,2016,42(2): 11-14.  
SU Zhaoyang, LI Xing, YANG Yanling. Research progress on the enhanced flocculation in water treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(2): 11-14 (in Chinese).
- [4] 任芝军,刘桂芳,朱雨楠,等.生物活性炭滤池直接过滤处理低温低浊水研究[J].现代化工,2010,30(S2): 295-297.  
REN Zhijun, LIU Guifang, ZHU Linan, *et al.* Treatment of low temperature and low turbidity raw water with BAC process by direct filtration [J]. Modern Chemical Industry, 2010, 30(S2): 295-297 (in Chinese).
- [5] 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).
- [6] 张泽玺,王宝山,许亚兵,等.电-生物耦合技术降解中药提取废水及微生物群落分析[J].精细化工,2021,38(2): 387-394.  
ZHANG Zexi, WANG Baoshan, XU Yabing, *et al.* Degradation of wastewater from traditional Chinese medicine extraction by electro-biological technology and analysis of microbial community [J]. Fine Chemicals, 2021, 38(2): 387-394 (in Chinese).
- [7] 张泽玺,王宝山,王洋,等.电-生物耦合技术处理制药废水的试验研究[J].工业水处理,2021,41(4): 102-107.  
ZHANG Zexi, WANG Baoshan, WANG Yang, *et al.* Study on treatment of pharmaceutical wastewater by electric-biological coupling technology [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(4): 102-107 (in Chinese).
- [8] CHEN W, WESTERHOFF P, JERRY A L, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(24): 5701-5710.
- [9] MOZAH Z, EIMAN A, LUTFIYE Y O, *et al.* Impact of continuous and intermittent supply of electric field on the function and microbial community of wastewater treatment electro-bioreactors [J]. Electrochimica Acta, 2015, 181: 271-279.
- [10] 李昂,艾鹏,林莉莉,等.人工湿地-微生物燃料电池耦合系统缓解生物堵塞试验研究[J].水生生物学报,2021,45(1): 190-196.  
LI Ang, AI Peng, LIN Lili, *et al.* Study on relieving bio-clogging with the hybrid system of constructed wetland and microbial fuel cell [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(1): 190-196 (in Chinese).
- [11] 许瑞,邹平,付先萍,等.pH对黑臭水体净化效率及真菌群落结构的影响[J].环境工程,2019,37(10): 97-104.  
XU Rui, ZOU Ping, FU Xianping, *et al.* Effect of pH on purification efficiency and fungal community structure

- of black and odorous water bodies [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(10): 97-104 (in Chinese).
- [12] 张小玲,李强,王靖楠,等. 曝气生物滤池技术研究进展及其工艺改良[J]. *化工进展*, 2015, 34(7): 2023-2030.
- ZHANG Xiaoling, LI Qiang, WANG Jingnan, *et al.* Research progress process improvement of biological aerated filter: a review [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(7): 2023-2030 (in Chinese).
- [13] 何绪文,王昊,刘俐媛,等. 电化学法处理微污染河水的中试[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(21): 91-94.
- HE Xuwen, WANG Hao, LIU Liyuan, *et al.* Pilot-scale study on electrochemical method for micro-polluted river water treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(21): 91-94 (in Chinese).
- [14] 毕强,薛娟琴,于丽花,等. 基于Ti/SnO<sub>2</sub>阳极的电化学法降解对硝基苯酚[J]. *化工进展*, 2013, 32(12): 3015-3020, 3036.
- BI Qiang, XUE Juanqin, YU Lihua, *et al.* Study on electrochemical degradation of *p*-nitrophenol based on Ti/SnO<sub>2</sub> electrode [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32(12): 3015-3020, 3036 (in Chinese).
- [15] 王琳,窦娜莎. Biostyr曝气生物滤池处理城市污水的影响因素[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(15): 55-58.
- WANG Lin, DOU Nasha. Affecting factors of Biostyr biological aerated filter for municipal wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(15): 55-58 (in Chinese).
- [16] 刘春苗,丁杰,刘先树,等. 电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(11): 4192-4197.
- LIU Chunmiao, DING Jie, LIU Xianshu, *et al.* Degradation of benzothiazole in electro-assisted microbial reactor [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(11): 4192-4197 (in Chinese).
- [17] 吴晴,刘金泉,王凯,等. 高级氧化技术在难降解工业废水中的研究进展[J]. *水处理技术*, 2015, 41(11): 25-29.
- WU Qing, LIU Jinquan, WANG Kai, *et al.* Research progress of advanced oxidation processes in the treatment of refractory industrial wastewater [J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(11): 25-29 (in Chinese).
- [18] 王悦,王海,石烁辉,等. 反硝化滤池反冲洗效能综合影响因素及微生物种群[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(1): 76-80.
- WANG Yue, WANG Hai, SHI Shuohui, *et al.* Comprehensive influencing factors of backwashing efficiency of denitrifying biofilter and its microbial community [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(1): 76-80 (in Chinese).
- [19] 顾域峰,郑向勇,叶海仁,等. 钛电极电催化氧化去除源分离尿液中氮的研究[J]. *水处理技术*, 2010, 36(8): 41-44.
- GU Yufeng, ZHENG Xiangyong, YE Hairen, *et al.* Study on the removal of nitrogen from source separated urine by electrolytic oxidization using titanium electrodes [J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(8): 41-44 (in Chinese).
- [20] 程庆霖,郑丙辉,王圣瑞,等. 滇池水体有色溶解性有机质(CDOM)三维荧光光谱特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(3): 698-703.
- CHENG Qinglin, ZHENG Binghui, WANG Shengrui, *et al.* Optical signatures of chromophoric dissolved organic matter in water body of Tien Lake [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(3): 698-703 (in Chinese).
- [21] 唐书娟,王志伟,吴志超,等. 膜-生物反应器中溶解性有机物的三维荧光分析[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(3): 290-295.
- TANG Shujuan, WANG Zhiwei, WU Zhichao, *et al.* Excitation-emission matrix fluorescence spectra analysis of dissolved organic matter in membrane bioreactor [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(3): 290-295 (in Chinese).

作者简介:汪光宗(1995-),男,甘肃甘谷人,硕士研究生,研究方向为饮用水处理理论与技术。

E-mail: 1426226558@qq.com

收稿日期:2022-01-05

修回日期:2022-03-18

(编辑:刘贵春)