

# 北方寒冷城市饮用水安全保障技术研究与示范

袁一星<sup>1</sup> 关小红<sup>2</sup> 马 军<sup>1</sup> 张 杰<sup>1,3</sup> 于水利<sup>2</sup>

(1 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001; 2 同济大学, 上海 200092; 3 北京工业大学, 北京 100124)

**摘要** 针对北方寒冷地区典型城市饮用水源存在的水质问题如低温低浊水处理、受有机污染水处理、含铁含锰地下水处理、高色水处理等开展了寒冷地区低温低浊水双向流沉淀/高负荷气浮处理技术研究、寒冷地区地表水中化工有机污染物的催化氧化组合技术与工艺研究、寒冷地区漫滩潜流水中高氨氮复合污染同步生物去除的关键技术、寒冷地区受面源污染高色地表水的高效处理技术等研究工作,形成了四项关键技术,为解决寒冷地区给水处理工艺的升级改造问题提供了科学依据。

**关键词** 低温低浊 臭氧与过氧化氢联用工艺 旋绕流组合涡混凝技术 高氨氮复合污染生物同步去除技术 水专项

## 1 研究目标与关键技术问题

我国北方寒冷地区一年低温时期常达数月,水温在 5℃ 以下,水质长时间处于低温低浊状态,混凝剂难以水解,水中剩余铝浓度较高,出水水质较差,

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07424-005)。



图 8 山地城市多级加压供水管网综合中试平台

多级加压水质安全试验区包括 4 个部分:进水与自动加药系统、水温调节系统、管道循环系统、水质在线监测系统,其中管道循环系统共有三层管道,每层管道管径分别为 100 mm、80 mm、50 mm,每层管道总长为 96 m,第一、二层管材为球墨铸铁管,第三层为 PE 管,相邻两层的高差为 1.8 m,每层管道系统包含 2 个容积为 1 m<sup>3</sup> 不锈钢水箱、可视管道、循环水泵、压力表、生物膜挂片和取样口;水质在线监测系统包括第一、三层管道系统设置的 HACH 在线余氯测定仪,第二层管道系统设置的 HACH 在

一直是十分棘手、尚未解决的难题;东北老工业基地化工废水排放导致水体突发性有机污染频繁,严重影响饮用水水质;地下径流量少,冬季径流缓慢,漫滩潜流水中铁、锰和氨氮浓度高且稳定性高,难以去除;北方地区植被覆盖率高,由于地表径流导致水中含有高浓度的腐殖质,导致水的色度升高,难以处

线 PH/ORP 测定仪,所有在线仪表数据通过 PLC 系统保存到电脑上,可实现供水管网不同水力工况的水质变化、管网内生物膜生长、管网二次污染、管网多点加氯和联合加氯等供水管网水力和水质方面研究。

## 6 结论

课题针对我国山地丘陵城市的饮用水问题特征,从饮用水处理技术、饮用水安全输配等饮用水安全保障的各个环节进行研究,建立基于多级加压供水系统分区分级优化及联动控制、山地城市多级加压供水管网水质安全、冲击用水负荷下丘陵城市分区分管安全保障、地震频发区供水系统优化设计与运行、地震灾后重建期城市饮用水水质安全保障、高浊度水的单级混凝沉淀(澄清)技术的山地丘陵城市饮用水安全保障的完整技术支撑体系。为类似地区提供了示范,为西部山地丘陵城市近亿人口饮用水安全保障提供了技术支撑。

○ E-mail: xiangping74@cqu.edu.cn

收稿日期:2013-07-18

修回日期:2013-07-31

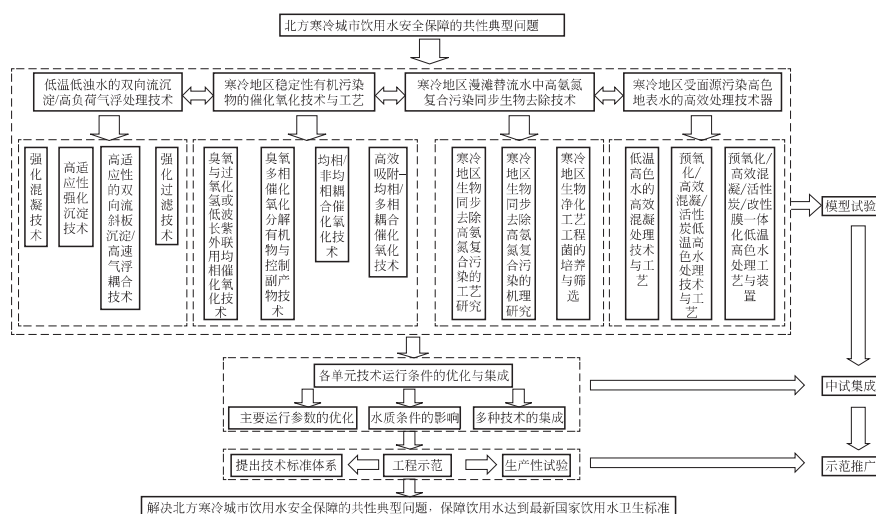


图1 技术路线

理。本课题研究目标为: 针对北方寒冷地区给水处理存在的问题, 通过科学研究与示范工程研发出解决北方寒冷地区饮用水安全保障问题的技术及其集成。

北方寒冷城市在给水处理技术上存在低温低浊水、稳定性有机物污染水、高氨氮复合污染地下水以及面源污染高色度水处理难、处理效率低等问题, 导致现行给水处理工艺难以满足我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。

在以上情况下, 对北方寒冷城市现行的给水处理工艺进行强化、升级改造, 从技术上改良或完善现行工艺, 并通过示范工程集成关键技术, 形成行之有效的适用于北方寒冷城市的给水处理成套技术, 对推行新的饮用水卫生标准, 保障饮用水安全有着重大意义。

## 2 技术研究和集成方法

本课题的研究思路是以工程应用为目标, 以关键技术创新和实用技术集成为核心, 以示范工程为依托, 以标准体系为指导, 解决我国寒冷地区饮用水供水面临的主要问题, 保障寒冷地区饮用水安全。

本课题针对我国北方寒冷地区给水处理中四大关键技术问题开展研究: 长达5个月的寒冷季节中的低温低浊原水的高效处理; 较高浓度、多种类、高风险的化工有机污染物的有效去除; 低温下漫滩潜流水中高铁、锰含量、高氨氮的生物同步去除; 低温条件下高色度水的高效处理; 课题目标明确, 重点突破, 以开发关键技术为核心; 针对主要问题, 进行技

术集成; 针对代表性区域, 进行工程示范, 建设技术平台。技术路线见图1。

## 3 主要技术成果

### 3.1 寒冷地区低温低浊水强化常规处理技术及工程示范

#### 3.1.1 旋转网格机械强化混凝技术

旋转网格技术是针对低温低浊水处理开发的一种简单易行、效果明显的技术。该技术在传统的机械絮凝池的搅拌桨上增加小孔径的网格以强化混凝过程。旋转网格使能量更均匀地分布在水中, 传统的搅拌桨桨板周围速度梯度很大, 而两个桨板中间的区域水流的扰动很小, 不能进行充分的絮凝, 而旋转网格技术可以很好地解决这个问题。旋转网格的网格孔径、丝径均可调整, 同时网格的转速也可通过调整搅拌桨的转速调整, 因此本技术具有很强的适应性, 可以随水质水量的变化而调整。

旋转网格技术对低温低浊水处理有明显的强化作用, 在保持沉后出水水质一致的情况下, 应用该技术可以降低投药量15%~25% (如图2所示), 投药量的降低不但降低了制水成本, 而且出水pH有所升高, 从而减轻对管网的腐蚀。该技术适用于大规模低温低浊水净化厂的改造和新建。

旋转网格机械强化混凝技术的示范工程为哈尔滨磨盘山净水厂二期供水工程工艺改造, 规模为11.25万m<sup>3</sup>/d, 混凝池改造方案如图3和图4所示。

示范工程于2011年11月完成, 至今运行效果良好。

#### 3.1.2 高适用性双向流斜板沉淀与高速气浮耦合技术

双向流斜板沉淀/高速气浮耦合技术对于处理低温低浊水和高浊水有独特的优势、良好的效果, 沉淀与气浮联用工艺对于低温低浊水、突发高浊水均具有良好的处理效果, 浊度、有机物等指标均有所改善, 并且可以大幅度地缩短沉淀时间, 即沉淀与气浮联用工艺并不延长处理时间, 可以将水厂现行工艺沉淀池后部改成气浮池。

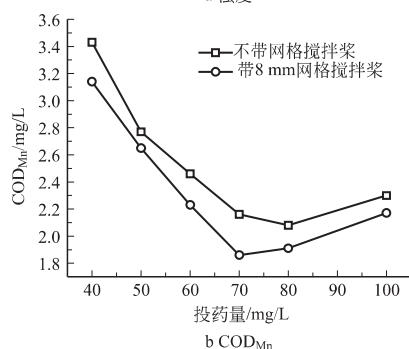
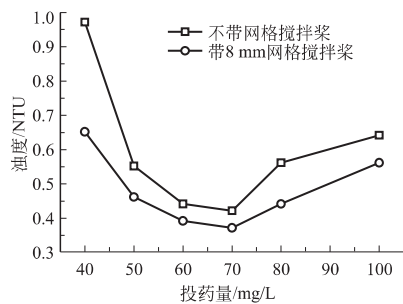


图2 不同投药量下沉后水出水浊度和 COD<sub>Mn</sub> 比较

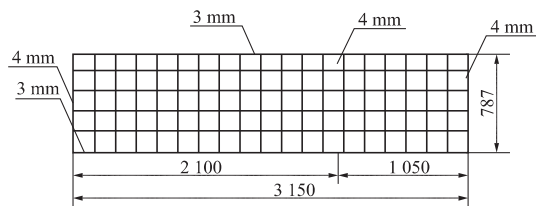


图3 不锈钢网片组件



图4 搅拌轴布网改造后实物

工程改造前后沉后出水水质情况如图5和图6所示。

本研究针对单独沉淀、单独气浮和沉淀与气浮耦合三种工艺进行试验,结果如图7~图9所示。

### 3.2 寒冷地区地表水中有机污染物的强化去除技术

#### 3.2.1 臭氧与过氧化氢联用分解低温水中有机污染物技术

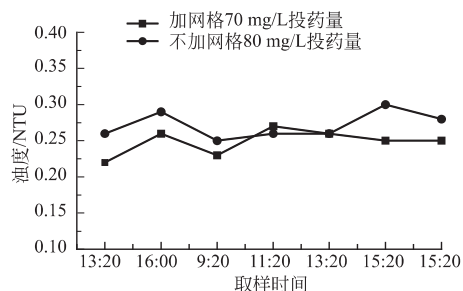


图5 增设网格和不增设网格沉后水浊度对比

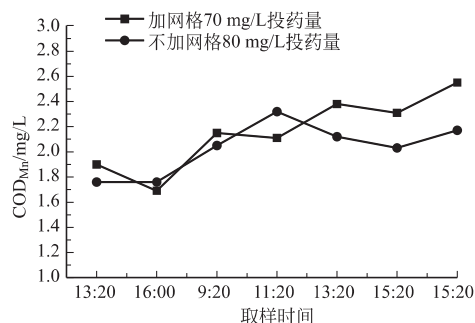


图6 增设网格和不增设网格沉后水 COD<sub>Mn</sub> 对比

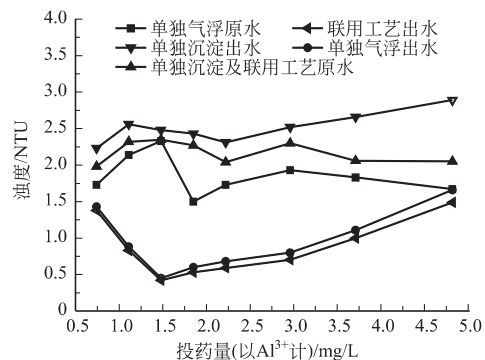


图7 三套工艺除浊效果对比

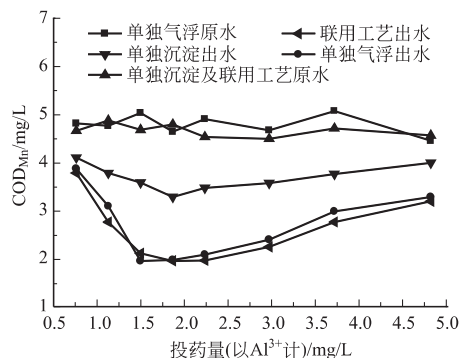


图8 三套工艺除 COD<sub>Mn</sub> 效果对比

臭氧/过氧化氢联用技术可大大提高对水中高稳定性有机污染物的分解效率,试验表明在低温条件下,臭氧/过氧化氢联用技术是解决低温低浊时期

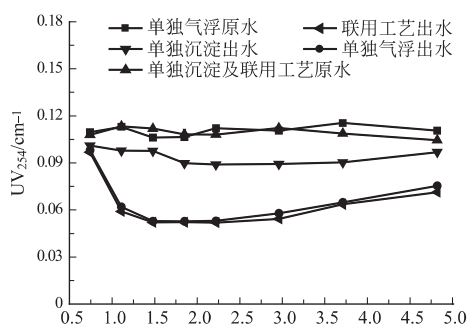


图9 三套工艺除  $UV_{254}$  效果对比

高稳定性有机污染物的一种良好方法。通过在臭氧氧化过程中加入一定比例的过氧化氢可提高臭氧的分解速率,加快羟基自由基的产生,与臭氧分子相比羟基自由基具有更强的氧化性,水中大部分有机污染物均可得到有效分解。此外,由于羟基自由基与有机物的反应速率快,受温度影响小于臭氧分子本身的氧化反应,因此在低温条件下臭氧/过氧化氢工艺对于水中有机物的氧化具有更明显的优势。试验结果如图10~图12所示。

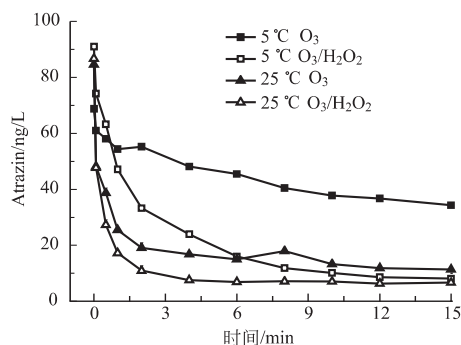
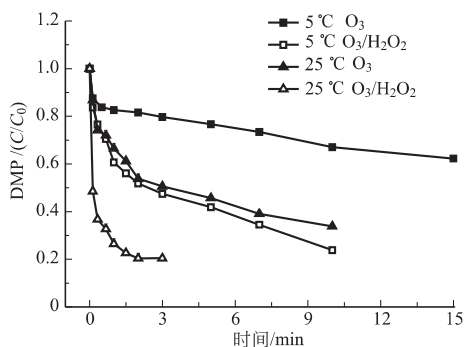


图10 不同温度下臭氧及臭氧/过氧化氢联用工艺对莠去津(Atrazine)的氧化去除规律比较



11 不同温度下臭氧和臭氧/过氧化氢联用工艺对邻苯二甲酸二甲酯(DMP)的去除规律比较

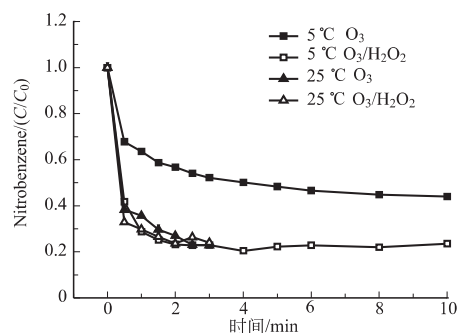


图12 不同温度下臭氧和臭氧/过氧化氢联用工艺对硝基苯(Nitrobenzene)的去除规律比较

### 3.2.2 均相与非均相耦合催化氧化技术

本子课题初步探究了低温条件下多相/均相耦合催化臭氧氧化工艺处理典型化工有机污染物的可行性。非均相催化剂蜂窝陶瓷 Fw 和负载蜂窝陶瓷 Fw-Mn-Cu-K 和过氧化氢联用催化臭氧化的效能要优于单一催化剂,蜂窝陶瓷的多孔性有利于臭氧的分散,  $O_3/H_2O_2/Fw$  体系对臭氧化反应的催化机理包括过氧化氢和蜂窝陶瓷两种催化剂对臭氧分解产生羟基自由基。Mn-Cu-K 负载蜂窝陶瓷加速了臭氧/过氧化氢体系内氧化剂的分解速率,同时也促进了体系内羟基自由基的生成。试验结果如图13和图14所示。

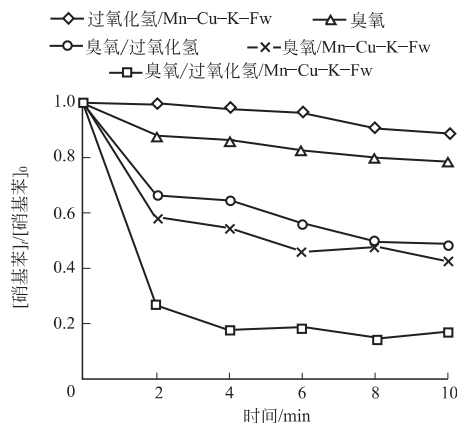


图13 不同体系对硝基苯降解效能的对比

地表水中有机污染物强化去除技术示范工程为黑龙江省依兰县供水工程,规模为  $2 \text{万 m}^3/\text{d}$ ,如图15所示。该示范工程采用强化常规处理工艺及短流程深度处理工艺,其中强化常规处理工艺为:双向流斜板与气浮耦合工艺,示范工程于2011年10月中旬运行通水,出水水质满足国家《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)要求。

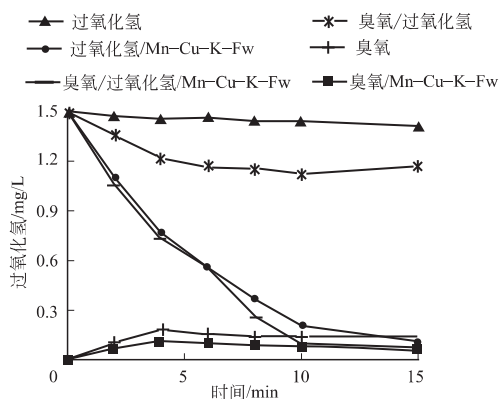


图 14 不同体系反应过程中过氧化氢浓度变化



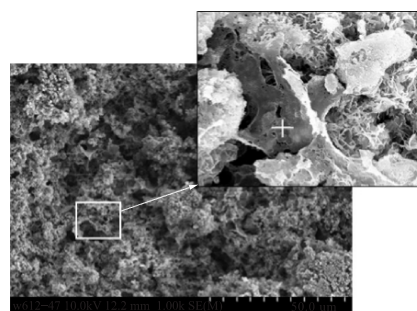
图 15 黑龙江省依兰县供水工程实物

### 3.3 寒冷地区漫滩潜流水高氨氮复合污染生物同步去除技术

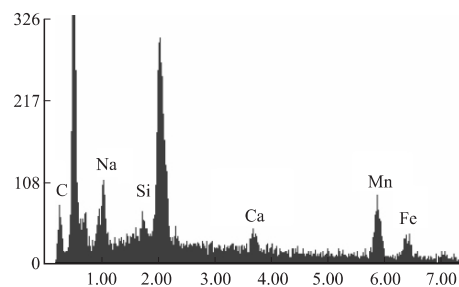
#### 3.3.1 高氨氮复合污染生物同步去除工艺工程菌培养与筛选技术

针对含高氨氮与高铁高锰漫滩潜流水的特点,采用分子生物学手段单链构象多态性(PCR-SSCP)技术对该水质条件下生物滤池微生物群落结构及多样性进行了研究,确定除锰菌群的功能生态位和空间生态位,最后培养与筛选出稳定高效的去除高铁高锰的工程菌。对于分离培养纯化的除铁除锰菌 MS604 (*Sphingobacterium* sp. MS604) 和 MB4 (*Exiguobacterium* sp. MB4) 进行了 X 光电子能谱(见图 16)和不同细胞部位锰代谢能力分析,以及锰的氧化机理研究。

SSCP 图谱(见图 17)显示,滤层不同深度微生物群落结构变化不明显,条带 d, e, f 所代表微生物存在于各个滤层中。表层(0 cm)和滤层 80 cm 处微生物种类相对增多,条带 g 所指示微生物在滤层 20 cm 和 40 cm 处几乎被淘汰。对优势条带进行 16S rDNA 测序分析共获得 8 个 OTUs,其中 *Gallionella*, *Ferribacterium* 在各滤层都存在,这种现象与原水水质中高浓度的铁有关。*Zoogloea* 为滤池的常驻菌群,易形成菌胶团,适应能力较强,是锰氧化还原

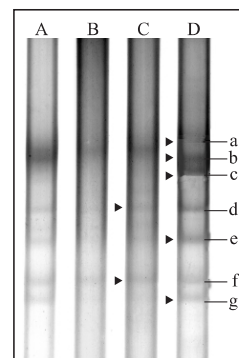


a 扫描电镜照片



b 能谱分析

图 16 高铁高锰生物除锰水厂生产性滤池表层滤料扫描电镜-能谱分析



A: 0 cm 处砂样; B: 20 cm 处砂样;

C: 40 cm 处砂样; D: 80 cm 处砂样; ▲代表测序条带

图 17 高铁高锰生物滤池微生物群落 SSCP 图谱

的主要功能菌群,对系统的稳定起一定作用。

#### 3.3.2 高氨氮复合污染生物同步去除工艺

本课题通过试验揭示了生物固锰除锰滤层中 Fe、Mn 氧化还原规律,探明了生物固锰滤层中生物群落的生态位和氧化空间分布规律,并明晰了生物固锰除锰滤层中  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$  对基质溶解氧的争夺规律,不同条件下除锰规律见图 18 ~ 图 20。并在此基础上研发了高铁锰复合污染水质高效生物净化滤层技术和高铁锰复合污染水质生物净化工艺快速启动稳定运行技术两项单项技术及其

综合集成,实现了低温情况下高浓度铁锰以及氨氮的同层生物净化,解决了寒区高铁高锰伴生氨氮潜流水净化过程中出水水质难以达标的难题。

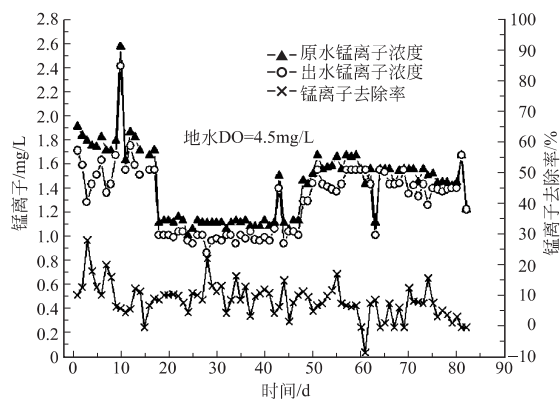


图 18 低溶解氧情况下生产滤池培养期除锰效果

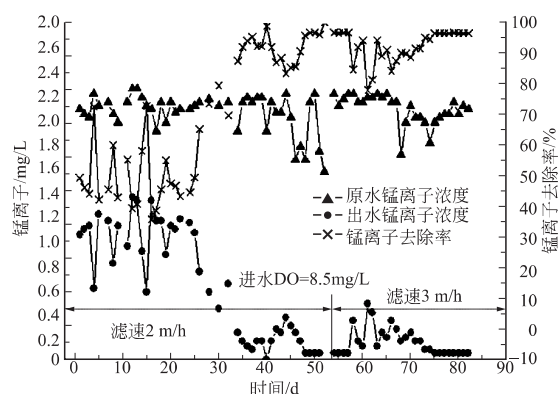


图 19 高溶解氧情况下的滤柱除锰生物滤层的培养曲线

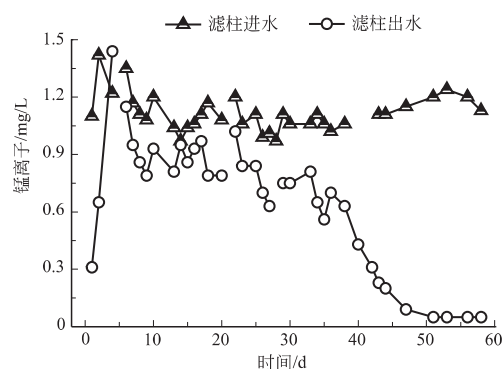


图 20 基于双层滤料的高铁条件下生物除锰滤池的培养

### 3.3.3 示范工程建设

本课题开发的寒冷地区潜流漫滩水中高氨氮复合污染同步生物去除的集成技术成功应用于哈尔滨前进水厂改扩建工程(规模 4 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ),创建了寒区高铁高锰伴生氨氮潜流水深度净化示范工程,改造

前后工艺流程和实景见图 21 ~ 图 23。示范工程滤池出水铁、锰以及氨氮含量分别控制在 0.2  $\text{mg/L}$ 、0.05  $\text{mg/L}$  和 0.2  $\text{mg/L}$  以下,全面达到国家标准 (GB 5749—2006),如图 24 所示。在此改扩建示范工程中,在不增加任何其他基建项目的情况下一期改造工程生产能力翻番,产水能力由原来的 1 万  $\text{m}^3/\text{d}$  提升成 2 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,不仅免除了征地难题,而且直接节省了基建费用 1 200 万元。按研究成果和一期改造成功经验新建的 2 万  $\text{m}^3/\text{d}$  净水系列,节省基建投资 1 800 万元,因此全厂节省投资 3 000 万元,节省年运行费用 200 万元。

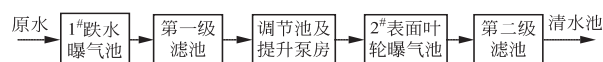


图 21 原净水工艺两级过滤流程示意

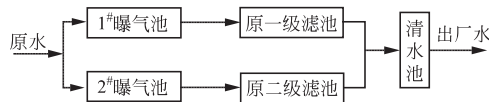


图 22 一期工程改造后一级生物过滤流程示意



图 23 改造后的净水间

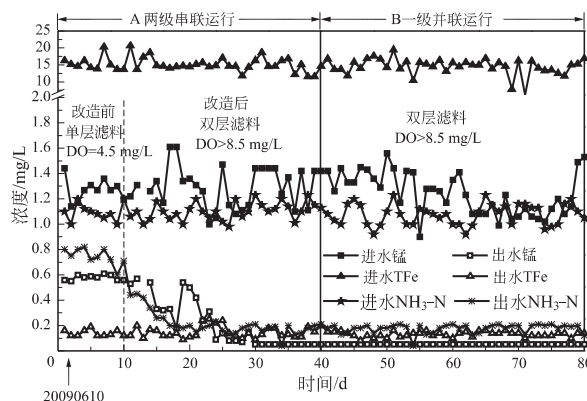


图 24 两级串联过滤改一级并联运行后出水水质逐日曲线

### 3.4 寒冷地区面源污染高色地表水处理技术

#### 3.4.1 旋绕流组合涡凝技术

合适的微涡旋尺度是造成颗粒有效碰撞的首要因素,而由涡旋运动产生的剪切力和离心惯性力是絮凝颗粒发生接触碰撞的主要作用力,旋流扰流组

合涡反应器应用水力旋流理论与微涡旋理论,在传统旋流反应器中布置各种不同的扰流装置,形成旋转的水流和包括自由涡、强制涡在内的组合微涡旋,以此增加平均水流的扰动,其实就是增加湍流的高频分量,从而提高能耗的有效利用率,增大粒子的碰撞、凝聚速率。图 25 反映了三种旋流组合涡装置不同扰动程度的试验效果,旋流扰流组合涡反应器参与絮凝时表现出来的水力特性有利于颗粒扩散、碰撞、絮凝。该反应器具有很大实际意义,适用于对水厂原有絮凝池的改造和新建水处理构筑物。

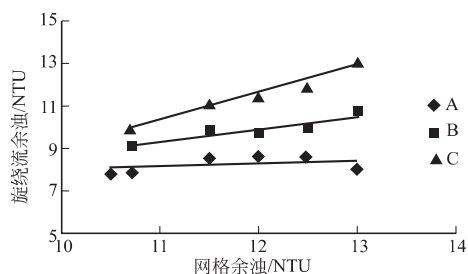


图 25 流量为 0.966 L/s 旋流扰流反应器与网格反应器余油的回归

### 3.4.2 高密度沉淀池组合工艺

高密度沉淀池综合了斜板沉淀池和泥渣回流的优点,是在原有泥渣回流技术的基础上改进而成的。高密度沉淀池中的泥渣回流到混合池,使泥渣与进水一起充分混合参与混凝整个过程,当水中浊度较低时还可以向水中投加粘土等机械杂质并不断回流泥渣,充分利用了泥渣的悬浮性和吸附性,在节省药剂的同时,提高了低温低浊高色度水的去除效果。

高效混凝/高密沉淀池组合工艺在低温条件下具有显著的除色效能,工艺流程见图 26。图 27 反映了高密度沉淀池在不同回流比条件下的效率。

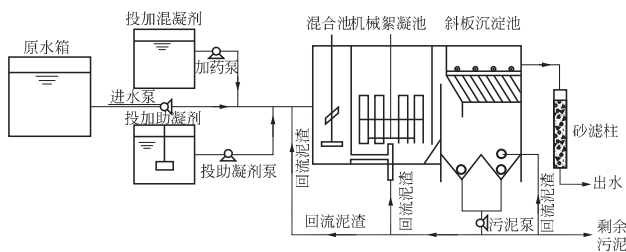


图 26 高密度沉淀池工艺流程

## 4 结论

(1) 旋转网格机械强化混凝与旋流组合混凝技术的研发及示范工程验证表明,其可有效解决原水低温低浊的水质问题,尤其对寒冷地区给水厂的

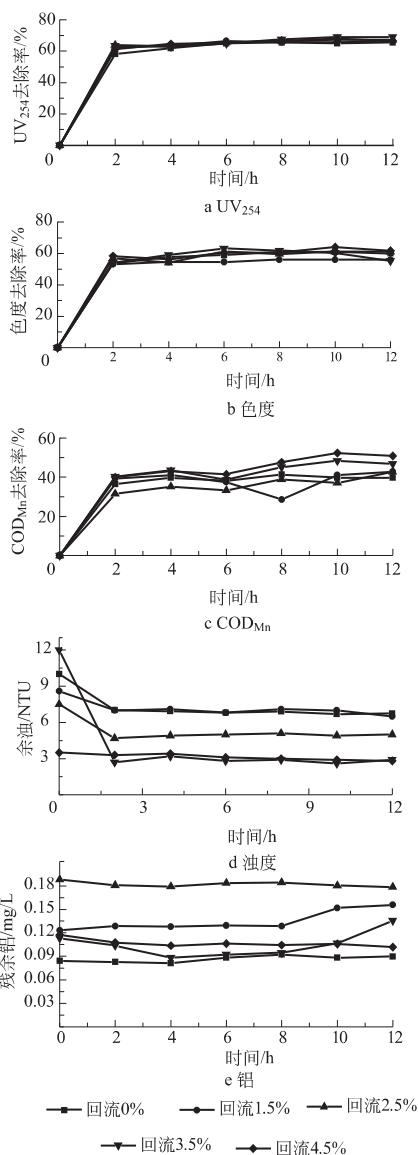


图 27 不同回流污泥比条件下对几种污染物的去除

升级改造更有意义。

(2) 臭氧与过氧化氢联用及均相与非均相耦合催化氧化技术的研发及示范工程验证表明,该技术对于寒冷地区地表水中稳定有机污染物的去除效果良好。

(3) 漫滩潜流高氨氮复合污染(高铁、高锰)生物同步去除技术的研发和示范工程验证表明,其可以有效地解决寒冷地区地下水高氨氮复合污染问题,该技术成为本课题的标志性成果在机理上取得重大突破。

○ E-mail: yyx1957@163.com

收稿日期: 2013-08-01

修回日期: 2013-08-06