

# 混凝预氧化过滤工艺对冬季低温 微污染地下水处理

袁雅姝,杨佳蓉,吴睿,张岩

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 确定最佳混凝预氧化过滤工艺条件,解决低温微污染地下水处理难度较大的问题.方法 在低温实验室配制微污染地下水,通过投加混凝剂,ClO<sub>2</sub>、NaClO两种预氧化剂以及锰砂、陶粒锰砂二级过滤,以Fe、Mn、COD<sub>Mn</sub>、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、浊度等指标为参照,对比两种预氧化剂分别和两种滤料二级过滤的运行效果.结果 混凝-二氧化氯预氧化-陶砂锰砂二级过滤工艺对Mn的去除效果在标准值边缘,Fe、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、浊度等指标的质量浓度均满足《生活饮用水卫生标准检测方法》(GB/T5750—2006),该工艺对微污染地下水有较高的去除率.结论 混凝-二氧化氯预氧化-陶砂锰砂二级过滤工艺对低温微污染地下水处理效果较好.

**关键词** 微污染地下水;预氧化处理;二级过滤;二氧化氯;次氯酸钠

中图分类号 X523

文献标志码 A

## Study on Coagulation/ Pre-oxidation /Filtration Process for Treatment of Groundwater with Micro-polluted in Winter

YUAN Yashu, YANG Jiarong, WU Rui, ZHANG Yan

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The best operating conditions for coagulation oxidation filtration process is determined to solve the problem of low-temperature micro-polluted groundwater treatment. All experiments were carried out in low-temperature laboratory. The micro-polluted groundwater was treated by adding coagulant and two pre-oxidant-ClO<sub>2</sub>, NaClO, then through manganese sand, ceramic manganese sand filter. Fe, Mn, COD<sub>Mn</sub>, ammonia nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), turbidity and other indicators were detected to obtain the best process. The results show that the concentration of Mn in the micro-polluted groundwater treated by the process of coagulation + chlorine dioxide oxidation + secondary filtration of ceramic sand manganese sand is on the edge of the standard, Fe, COD<sub>Mn</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, the concentration of the turbidity and other indicators meet the "drinking water health standard test

收稿日期:2018-07-20

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07202-011);住房和城乡建设部科技计划项目(2015-K7-006);沈阳市建委项目(sjw2016005)

作者简介:袁雅姝(1964—),女,高级实验师,主要从事水处理与微生物方面研究.

method”(GB/T5750—2006)。So the process of coagulation + chlorine dioxide oxidation + secondary filtration of ceramic sand manganese sand can be adopted to treat micro-polluted groundwater under low temperature.

**Key words:** micro-polluted groundwater; pre-oxidation treatment; secondary filtration; chlorine dioxide; sodium hypochlorite

城镇的生态系统由于生物种类较少,生物链较简单等原因,在地表水受到污染时,地下水也遭受到不同程度的污染,利用地下水就要进行处理,否则达不到供水标准<sup>[1]</sup>。北方地区地下水铁锰超标严重。各国学者对除铁除锰的技术研究已经有100多年历史,无论是我国还是世界各国都有着众多成熟的地下水除铁除锰技术,并已应用于工程实例。

B. D. Carlton 等<sup>[2]</sup>提出滤料表面的活性滤膜对水中铁和锰的去除有催化作用,并采用折点后的自由氯除铁锰。北美和欧洲研究和应用比较广泛的是将高锰酸钾复合剂、活性炭和臭氧添加到常规处理中。1961年,芬兰首创了地层除铁除锰工艺,此后在北欧诸国得到了广泛的推广和应用<sup>[3-4]</sup>。在美国采用较普遍的是加氯或者高锰酸钾氧化后过滤去除铁锰和同时加入聚合磷酸盐和硅酸钠作为稳定剂除铁除锰<sup>[5-6]</sup>。氨氮是地下水中重要的污染物,随着人类活动的加剧,煤矿开采、垃圾渗滤液以及过量使用的农业氮肥经雨水冲刷,一部分渗进入地下水,一部分流进河流,再由河流补给进入地下水。这些都是地下水被氨氮污染的原因<sup>[7-8]</sup>。在水厂处理方面,氨氮处理本身就比较困难,而且还会阻碍对水中铁锰的去除。在氨氮的去除过程中会同时伴随着硝化过程,若原水中含有超过规定范围的氨氮会导致出水中产生较多的亚硝酸盐和硝酸盐。人体摄入较高含量亚硝酸盐时,亚硝酸盐会转化成亚硝胺,亚硝胺会致癌<sup>[8-9]</sup>,尤其对婴儿危害较大,会诱发高铁血红症<sup>[10]</sup>。所以要严格控制出水中的氮类物质的浓度。

我国北方地区,内蒙古、黑龙江省等一些

地方冬季地下水水温较低,混凝、过滤、消毒等工艺都不能达到最佳的处理效果。在常规的处理中往往是以大量投加混凝剂和增加氯的投加量来满足出水要求,投加过量的混凝剂不符合经济因素,投加过量的氯会引起出水消毒副产物的超标。如果前期处理效果不当会给后续工艺带来很大负担。由于人类活动的愈加活跃,地下水中的污染物质愈加复杂,成熟的常规工艺已经满足不了饮用水要求,尤为突出需要解决含有氨氮,有机物的高锰高铁地下水,即复合型微污染地下水<sup>[11]</sup>。所以,亟待寻求经济有效的处理复合型微污染地下水的方法。基于此,笔者试验针对冬季低温微污染地下水,采用混凝-预氧化-二级过滤的工艺流程对低温微污染地下水进行处理研究,确定污染物的去除效果。

## 1 试验

### 1.1 试验装置

试验装置由原水水箱、提升水泵、加药混凝、沉淀池,过滤柱、清水池组成。滤料选用锰砂、陶粒。滤料粒径均为1.25~1.6 mm。滤料均匀填充在滤柱内。滤柱内径为47 mm,高为0.7 m,滤料高度为0.5 m,承托层为50 mm,在每级滤料上方50 mm处设置溢流口。试验装置如图1所示。

试验流程:原水由水泵打入机械隔板絮凝池完成混凝沉淀过程,沉淀池出水经预氧化剂氧化后泵入滤柱中进行二级过滤,检测出水各项指标。通过对混凝-预氧化(二氧化氯或次氯酸钠)-过滤(锰砂二级过滤或陶粒锰砂二级过滤)出水进行检测,最后确定工艺组成。

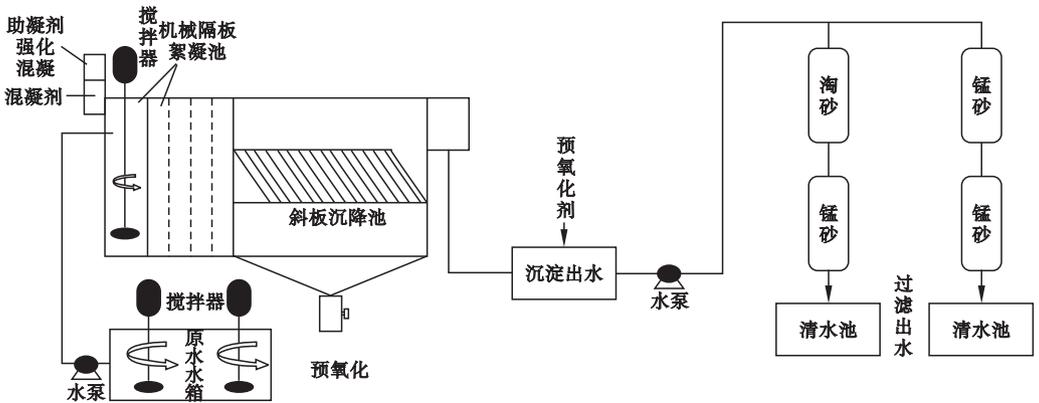


图1 试验装置-水箱原水预氧化

Fig. 1 Experiment device

## 1.2 滤料

滤料为陶粒和锰砂,均来自处理复合型微污染地下水挂膜成功的滤料. 过滤时滤速均维持在 5 m/h. 根据张春娜<sup>[12]</sup>、闫譔<sup>[13]</sup>的研究结果,发现锰砂和陶粒的滤料组合更适合于复合型微污染地下水的净化,且多级滤料组合能够实现稳定高效的净化效能. 试验使用的陶粒和锰砂滤料均来自处理复合型微污染地下水挂膜成功的滤料. 过滤时有两种

二级滤料过滤系统: 锰砂二级过滤的双滤柱, 陶粒锰砂二级过滤的双滤柱.

## 1.3 试验水质

试验原水来自沈阳建筑大学地下水,采用试验室配水的方法进行模拟原水水质. 配水使用的药品为:  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 $\text{MnSO}_4$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、腐殖酸、淀粉、葡萄糖. 在低温实验室模拟微污染地下水,以保证 2~4 °C 水温. 原水水质指标及饮用水标准如表 1 所示.

表1 原水水质及其对应水质标准

Table 1 Raw water quality and standards

水质	$\rho(\text{Fe})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Mn})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	浊度/NTU	温度/°C
原水水质	2.54~3.89	0.34~0.62	0.85~1.78	3.2~5.2	2.5~4.51	2~4
标准饮用水水质	0.3	0.1	0.5	3.0	1.0	—

## 1.4 试验方法

试验过程中水样的检测指标及方法如表 2 所示. 检测方法按照《水和废水监测分析方法》(第四版)(增补版)和《生活饮用水卫生标准检测方法》(GB/T5750—2006)执行.

表2 分析项目与方法

Table 2 Indicators and detection methods

指标	检测方法	检测仪器
$\text{NH}_4^+-\text{N}$	纳氏试剂分光光度法	分光光度计
Fe	邻菲罗啉分光光度法	分光光度计
Mn	甲醛肟分光光度法	分光光度计
$\text{COD}_{\text{Mn}}$	酸性高锰酸钾滴定法	分光光度计
$\text{ClO}_2^-$	比色法	英国百灵达二氧化氯快速检测仪
剩余 $\text{ClO}_2$	比色法	英国百灵达二氧化氯快速检测仪
温度		电子温度计

## 1.5 试验分析项目与方法

### 1.5.1 最佳混凝预氧化条件的确定

试验通过 6 联搅拌器烧杯小试的方法确定预氧化混凝的最佳试验条件,试验投加的预氧化药剂有两种:  $\text{ClO}_2$ <sup>[14-15]</sup>,  $\text{NaClO}$ <sup>[16-17]</sup>.  $\text{ClO}_2$  和  $\text{NaClO}$  对污染物的氧化性质相似,以  $\text{ClO}_2$  为例作为预氧化药剂进行预氧化混凝最佳试验条件的确定. 选用聚合氯化铝(PAC)混凝剂与  $\text{ClO}_2$  预氧化剂进行混凝预氧化试验. 试验主要确定 PAC 与  $\text{ClO}_2$  溶液的投加剂量和反应时间. 反应时间分别为 5 min、10 min、15 min、20 min,对 4 种反应时间的出水进行检测,以确定预氧化混凝的最佳试验条件.

### 1.5.2 混凝 - 预氧化 - 二级过滤最佳条件的确定

原水经混凝预氧化处理后通过锰砂二级滤柱和陶粒锰砂二级滤柱中进行过滤,连续运行 5 d,将处理后效果对原水进行对比,最终确定混凝 - 预氧化 - 二级过滤的最佳处理工艺方案.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 最佳预氧化混凝条件的确定

试验主要确定  $\text{ClO}_2$  ( $\text{NaClO}$  溶液) 的投加剂量、反应时间、PAC 的投加剂量. 试验中的  $\text{ClO}_2$  投加量为  $0 \sim 5 \text{ mg/L}$ , PAC 的投加量与  $\text{ClO}_2$  的反应时间有 4 种组合方式如表 3 所示.

表 3 4 种组合方式

Table 3 Four combination of coagulant and pre-oxidant

组合方式	PAC 的投加量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{ClO}_2$ 反应时间/ min
PAC5F20	5	20
PAC10F15	10	15
PAC15F10	15	10
PAC20F5	20	5

#### 2.1.1 去除效果分析

预氧化混凝对 Fe、Mn、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、浊度等指标的处理效果如图 2 所示.

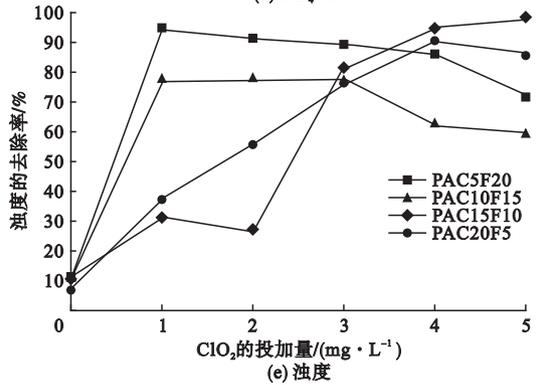
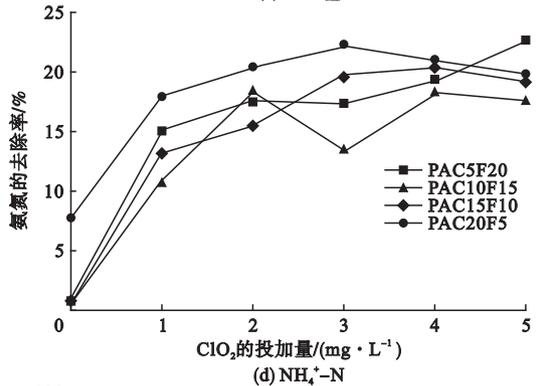
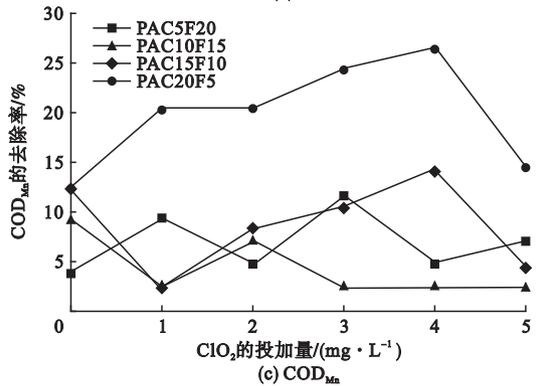
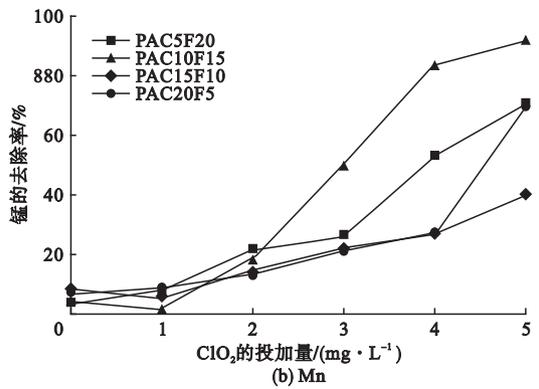
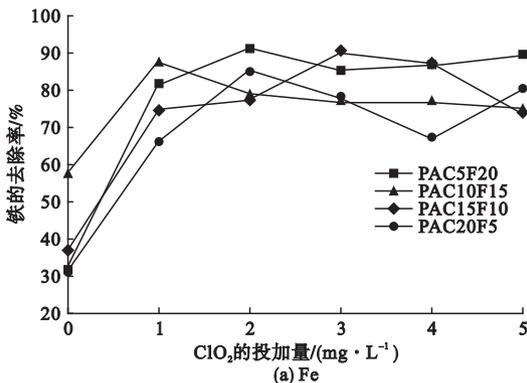


图 2 4 种方式对水质指标的处理效果

Fig. 2 Removal rate of Fe, Mn,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , turbidity

根据图2分析所得,4种方式的最佳投加条件如表4所示。根据表4分析所得,充分去除水中污染物的最佳组合条件为:ClO<sub>2</sub>的投加量为5 mg/L,反应时间为20 min,PAC的投加量为20 mg/L。

表4 最佳投加条件

Table 4 Operation conditions

指标	ClO <sub>2</sub> 投加量/ (mg·L <sup>-1</sup> )	PAC 的投加量/ (mg·L <sup>-1</sup> )	ClO <sub>2</sub> 反应时间/ min
Fe	2	均可	20
Mn	5	均可	20
COD <sub>Mn</sub>	均可	20	均可
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	均可	20	均可
浊度	5	20	20

## 2.2 混凝二氧化氯预氧化过滤工艺对低温微污染地下水的处理效果

低温地下水由泵打入到混凝沉淀池内,加入20 mg/L的PAC进行混凝沉淀试验,混凝沉淀后出水中加入5 mg/L的ClO<sub>2</sub>反应20 min进行氧化,氧化后的水由蠕动泵打入到锰砂二级滤料和陶粒锰砂二级滤料进行过滤,出水稳定后连续测定40 min,以求得稳定后出水各项指标的质量浓度,连续测定5 d,以确定混凝-二氧化氯预氧化-过滤工艺的处理效果。

### 2.2.1 Fe的处理效果

图3为混凝二氧化氯预氧化过滤出水对Fe的处理效果。

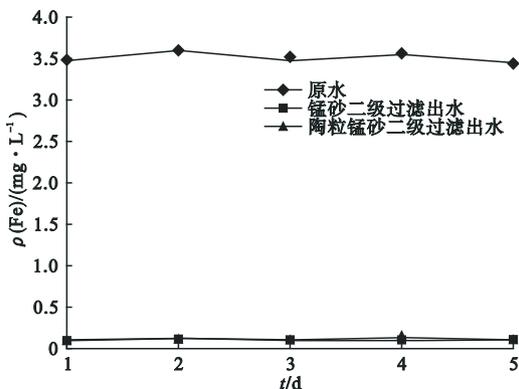


图3 混凝二氧化氯预氧化过滤出水对Fe的处理效果

Fig. 3 Fe concentration in the effluent

在连续运行试验中,进水Fe的质量浓度为3.42~3.62 mg/L。混凝-二氧化氯预氧化-锰砂二级过滤出水Fe的质量浓度为0.07~0.11 mg/L,对Fe的去除率为97.2%~98.1%;混凝-二氧化氯预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水Fe的质量浓度为0.10~0.15 mg/L,对Fe的去除率为96.2%~97.1%。

### 2.2.2 Mn的处理效果

图4为混凝二氧化氯预氧化过滤对Mn的处理效果。在连续运行试验中,进水Mn的质量浓度为0.58~0.63 mg/L。经混凝-二氧化氯预氧化-锰砂二级过滤出水Mn的质量浓度为0.12~0.17 mg/L,对Mn的去除率为75.0%~80.8%;混凝-二氧化氯预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水Mn的质量浓度为0.13~0.16 mg/L,对Mn的去除率为74.1%~81.2%。

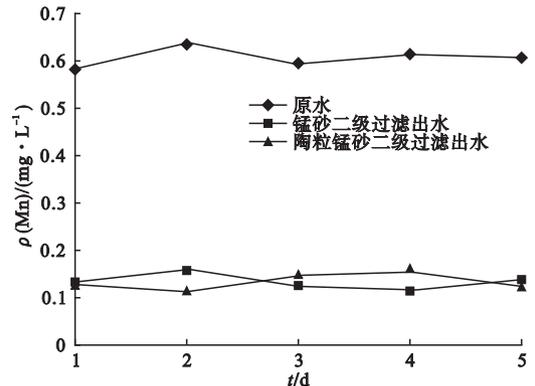


图4 混凝二氧化氯预氧化过滤对Mn的处理效果

Fig. 4 Concentration of Mn in the effluent

### 2.2.3 COD<sub>Mn</sub>的处理效果

图5为混凝二氧化氯预氧化过滤出水对COD<sub>Mn</sub>的处理效果。在连续运行试验中,进水COD<sub>Mn</sub>的质量浓度为4.91~5.30 mg/L。经混凝-二氧化氯预氧化-锰砂二级过滤出水COD<sub>Mn</sub>的质量浓度为2.51~2.70 mg/L,对COD<sub>Mn</sub>的去除率为44.8%~51.9%;混凝-二氧化氯预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水COD<sub>Mn</sub>的质量浓度为2.60~2.91 mg/L,对COD<sub>Mn</sub>的去除率为42.9%~49.1%。

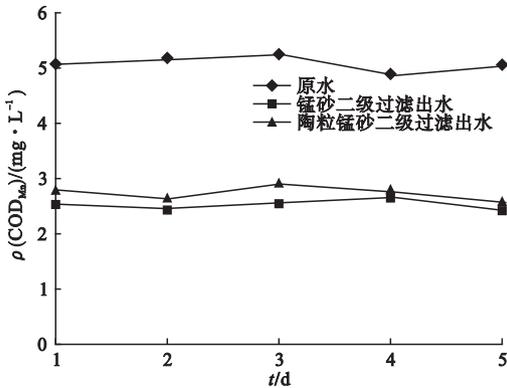


图 5 混凝二氧化氯预氧化过滤出水对 COD<sub>Mn</sub> 的处理效果

Fig. 5 Concentration of COD<sub>Mn</sub> in the effluent

2.2.4 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的处理效果

图 6 为混凝二氧化氯预氧化过滤出水对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的处理效果. 在连续运行试验中, 进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的质量浓度为 1.71 ~ 1.80 mg/L. 混凝-二氧化氯预氧化-锰砂二级过滤出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的质量浓度为 0.40 ~ 0.47 mg/L, 对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率为 72.8% ~ 77.1%; 混凝-二氧化氯预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的质量浓度 0.31 ~ 0.37 mg/L, 对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率为 78.8% ~ 81.7%.

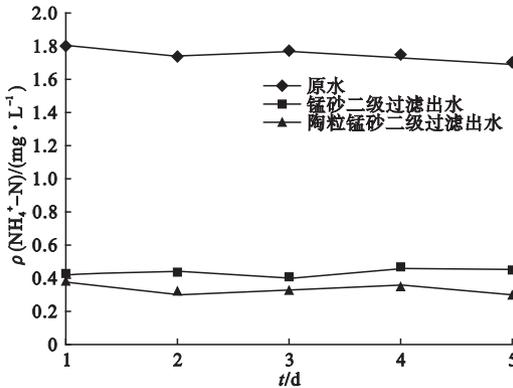


图 6 混凝二氧化氯预氧化过滤出水对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的处理效果

Fig. 6 Concentration of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in the effluent

2.2.5 浊度的处理效果

图 7 为混凝二氧化氯预氧化过滤出水对浊度的处理效果. 在连续运行试验中, 进水浊度为 2.70 ~ 3.01 NTU. 混凝-二氧化氯预氧化-锰砂二级过滤出水浊度为 0.31 ~ 0.42

NTU, 对浊度的去除率为 85.6% ~ 89.4%; 混凝-二氧化氯预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水浊度为 0.32 ~ 0.51 NTU, 对浊度的去除率为 82.2% ~ 88.3%.

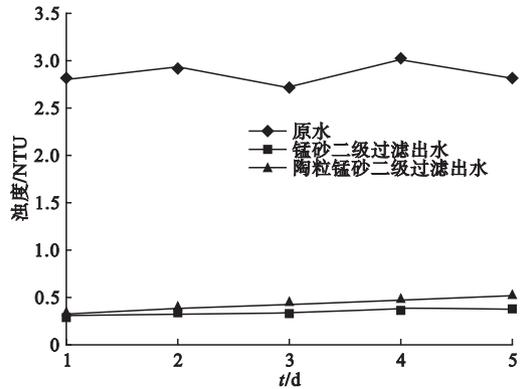


图 7 混凝二氧化氯预氧化过滤出水对浊度的处理效果

Fig. 7 Concentration of turbidity in the effluent

2.2.6 滤料处理效果对比

混凝二氧化氯预氧化过滤不同滤料处理效果对比如图 8 所示. 混凝-二氧化氯预氧化-锰砂二级过滤出水对 Fe、Mn、COD<sub>Mn</sub>、浊度的去除效果与混凝-二氧化氯预氧化-陶粒锰砂二级过滤去除效果相差不大, 在 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除上混凝-二氧化氯预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水明显好于混凝-二氧化氯预氧化-锰砂二级过滤出水. 综上, 混凝-二氧化氯预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水对低温地下水的去除效果较好.

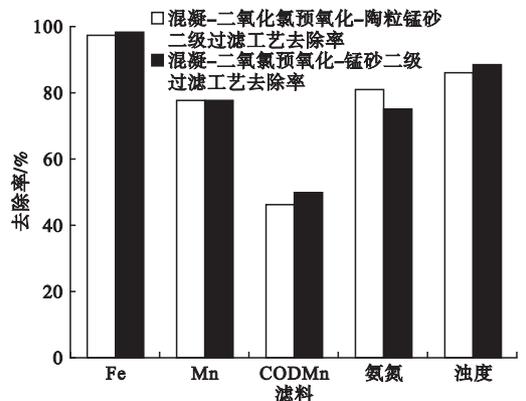


图 8 混凝二氧化氯预氧化过滤不同滤料处理效果对比

Fig. 8 Comparison of treatment effect with different filtration materials

## 2.3 混凝次氯酸钠预氧化过滤工艺对低温微污染地下水的处理效果

### 2.3.1 Fe 的处理效果

图9为混凝次氯酸钠预氧化过滤出水对Fe的处理效果.在连续运行试验中,进水Fe的质量浓度为3.50~3.62 mg/L.混凝-预氧化-过滤出水Fe的值趋于稳定,混凝-次氯酸钠预氧化-锰砂二级过滤出水Fe的质量浓度为0.09~0.13 mg/L,对Fe的去除率为96.3%~99.7%;混凝-次氯酸钠预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水Fe的质量浓度为0.13~0.17 mg/L,对Fe的去除率为95.3%~96.3%.

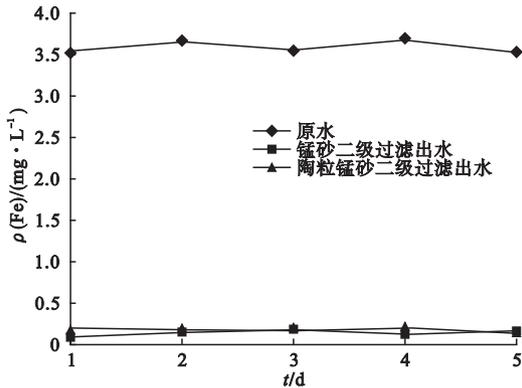


图9 混凝次氯酸钠预氧化过滤出水对Fe的处理效果

Fig. 9 Concentration of Fe in the effluent

### 2.3.2 Mn 的处理效果

图10为混凝次氯酸钠预氧化过滤出水对Mn的处理效果.

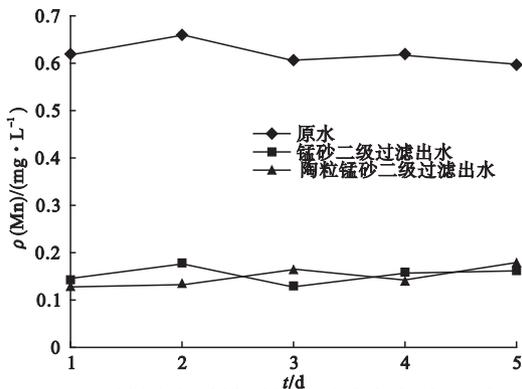


图10 混凝次氯酸钠预氧化过滤出水对Mn的处理效果

Fig. 10 Concentration of Mn in the effluent

在连续运行试验中,进水Mn的质量浓度为0.59~0.65 mg/L.混凝预氧化过滤出水Mn的值趋于稳定,混凝-次氯酸钠预氧化-锰砂二级过滤出水Mn的质量浓度为0.13~0.17 mg/L,对Mn的去除率为72.9%~78.3%;混凝-次氯酸钠预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水Mn的质量浓度为0.12~0.17 mg/L,对Mn的去除率为71.2%~80.3%.

### 2.3.3 COD<sub>Mn</sub> 的处理效果

图11为混凝次氯酸钠预氧化过滤出水对COD<sub>Mn</sub>的处理效果.在连续运行试验中,进水COD<sub>Mn</sub>的质量浓度为4.80~5.30 mg/L.混凝-预氧化-过滤出水COD<sub>Mn</sub>的值趋于稳定,混凝-次氯酸钠预氧化-锰砂二级过滤出水COD<sub>Mn</sub>的质量浓度为2.20~2.50 mg/L,对COD<sub>Mn</sub>去除率为50.0%~57.7%;混凝-次氯酸钠预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水COD<sub>Mn</sub>的质量浓度为2.30~2.60 mg/L,对COD<sub>Mn</sub>的去除率为45.8%~56.6%.

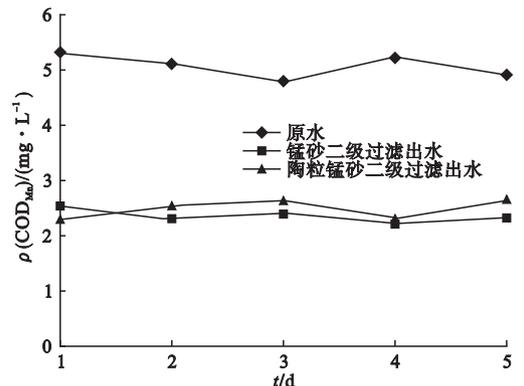


图11 混凝次氯酸钠预氧化过滤出水对COD<sub>Mn</sub>的处理效果

Fig. 11 Concentration of COD<sub>Mn</sub> in the effluent

### 2.3.4 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的处理效果

图12为混凝次氯酸钠预氧化过滤出水对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的处理效果.在连续运行试验中,进水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的质量浓度为1.71~1.82 mg/L.混凝-预氧化-过滤出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的值趋于稳定,混凝-次氯酸钠预

氧化-锰砂二级过滤出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的质量浓度为  $0.38 \sim 0.45 \text{ mg/L}$ , 对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率为  $74.9\% \sim 79.1\%$ ; 混凝-次氯酸钠预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的质量浓度为  $0.30 \sim 0.35 \text{ mg/L}$ , 对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率为  $79.5\% \sim 83.2\%$ 。

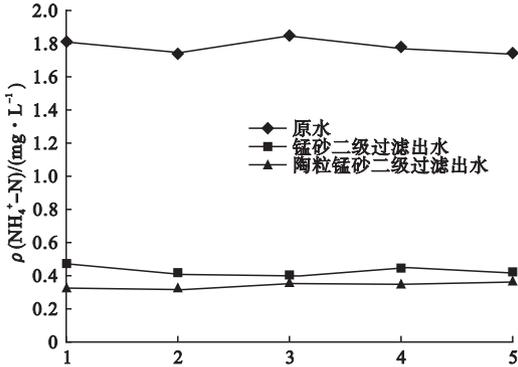


图 12 混凝次氯酸钠预氧化过滤出水对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的处理效果

Fig. 12 Concentration of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the effluent

### 2.3.5 浊度的处理效果

图 13 为混凝次氯酸钠预氧化过滤出水对浊度的处理效果, 在连续运行试验中, 进水浊度为  $2.80 \sim 3.20 \text{ NTU}$ . 混凝-预氧化-过滤出水浊度的值趋于稳定, 混凝-次氯酸钠预氧化-锰砂二级过滤出水浊度为  $0.23 \sim 0.36 \text{ NTU}$ , 对浊度的去除率为  $88.3\% \sim 92.3\%$ ; 混凝-次氯酸钠预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水浊度为  $0.34 \sim 0.40 \text{ NTU}$ , 对浊度的去除率为  $87.1\% \sim 88.3\%$ 。

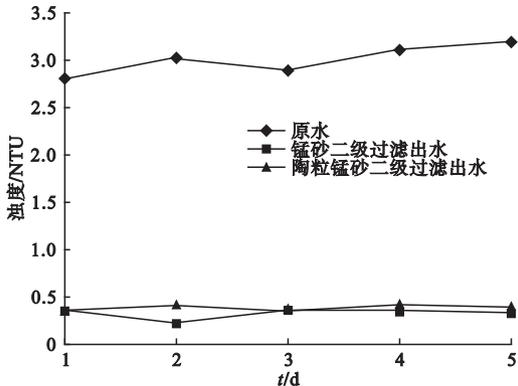


图 13 混凝次氯酸钠预氧化过滤出水对浊度的处理效果

Fig. 13 Concentration of turbidity in the effluent

### 2.3.6 滤料处理效果对比

混凝次氯酸钠预氧化过滤不同滤料处理效果对比如图 14 所示. 混凝-次氯酸钠预氧化-锰砂二级过滤出水对 Fe 的去除效果略好于混凝-次氯酸钠预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水, 混凝-次氯酸钠预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、浊度的去除效果好于混凝-次氯酸钠预氧化-锰砂二级过滤. 综上, 混凝-次氯酸钠预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水效果较好。

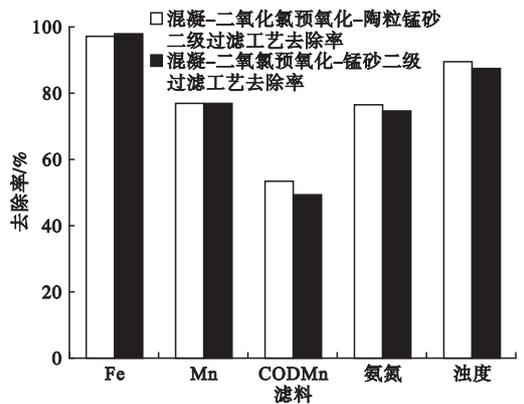


图 14 混凝次氯酸钠预氧化过滤不同滤料处理效果对比

Fig. 14 Comparison of treatment effects with different filtration materials

## 3 结论

(1) 混凝-预氧化-过滤工艺对低温复合型污染地下水都有较好地处理效果。

(2) 混凝预氧化过滤的最佳试验条件: 投加  $5 \text{ mg/L}$  的  $\text{ClO}_2$ , 反应时间为  $20 \text{ min}$ , PAC 的投加量为  $20 \text{ mg/L}$ 。

(3) 混凝-次氯酸钠预氧化-锰砂二级过滤出水对 Fe、Mn 的去除效果与混凝-二氧化氯预氧化-陶粒锰砂二级过滤去除效果相差不大, 在  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、浊度的去除上混凝-次氯酸钠预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水明显好于混凝-二氧化氯预氧化-锰砂二级过滤出水. 混凝-次氯酸钠预氧化-陶粒锰砂二级过滤出水对低温微污染地下水的去除效果较好。

## 参考文献

- [1] 陈肖娟. 城镇地下水污染防治法律制度研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.  
(CHEN Xiaojuan. Study on prevention and control legal system of urban groundwater pollution [D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.)
- [2] CARLTON B D, BASARAN A H, NEAEZ-ZAL E, et al. Reproductive effects in long-Evans rats exposed to chlorine dioxide[J]. Environmental research, 1991, 56(2): 170.
- [3] ELLIS D, BOUCHARD C, LANTAGNE G. Removal of iron and manganese from groundwater by oxidation and microfiltration[J]. Desalination, 2010, 130(3): 255 - 264.
- [4] CHANG C Y, HSIEH Y H, LIN Y M, et al. The organic precursors affecting the formation of disinfection by-products with chlorine dioxide[J]. Chemosphere, 2001, 44(5): 1153 - 1158.
- [5] 陈心凤. 接触氧化法和吸附法对水中铁锰的去除试验研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2011.  
(CHEN Xinfeng. Study on removal of iron and manganese in aqueous by contact oxidation and adsorption [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2011.)
- [6] 何涛, 鄂学礼, 王红伟, 等. 二氧化氯水消毒副产物的生成规律及其影响因素研究[J]. 环境与健康杂志, 2008, 25(2): 101 - 103.  
(XU Tao, E Xueli, WANG Hongwei, et al. Development of chlorite and influencing factors in drinking water treatment with chlorine dioxide [J]. Journal of environment and health, 2008, 25(2): 101 - 103.)
- [7] 赵秀春, 王见成, 孟春霞. 青岛市地下水中硝酸盐氮的污染及其影响因素分析[J]. 水文, 2008(5): 94 - 96.  
(ZHAO Xiuchun, WANG Jiancheng, MENG Chunxia. Analysis of nitrate nitrogen pollution in groundwater in Qingdao city and its influencing factors [J]. Journal of China hydrology, 2008(5): 94 - 96.)
- [8] 刘辉, 张玉先, 包承忠. 全流程生物氧化法处理微污染原水研究[J]. 中国给水排水, 2002(5): 18 - 22.  
(LIU Hui, ZHANG Yuxian, BAO Chengzhong. Study on the use of entire process biological oxidation formicropolluted raw water treatment [J]. China water & wastewater, 2002(5): 18 - 22.)
- [9] 张文妍, 朱亮, 薛红琴. 微污染水源水生物预处理氨氮去除影响因素探讨[J]. 给水排水, 2002, 28(11): 1 - 3.  
(ZHANG Wenyan, ZHU Liang, XUE Hongqin. Influencing factors on ammonia removal in biological pre-treatment of slightly polluted raw water [J]. Water & wastewater engineering, 2002, 28(11): 1 - 3.)
- [10] 周国华, 完颜华, 刘艳球, 等. 微污染水源中的氨氮及其处理技术[J]. 环境科学与管理, 2006(6): 91 - 93.  
(ZHOU Guohua, WAN Yanhua, LIU Yanqiu, et al. Ammonia-nitrogen and its treatment in micro-polluted water source [J]. Environmental science and management, 2006(6): 91 - 93.)
- [11] 陈坚, 黄国鑫, 刘菲, 等. 天然沸石去除地下水中氨氮的研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(10): 6020 - 6022.  
(CHEN Jian, HUANG Guoxin, LIU Fei, et al. Study on removal of ammonium-nitrogen in groundwater by natural zeolites [J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2011, 39(10): 6020 - 6022.)
- [12] 张春娜. 地下水中原生铁锰与微污染物质在曝气接触氧化过滤中的拮抗作用[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.  
(ZHANG Chunna. Antagonistic effects of raw iron and manganese in groundwater and micropollutants in aeration contact oxidation filtration [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011.)
- [13] 闫谓. 三级接触氧化过滤法处理复合型微污染地下水效能试验[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2013.  
(YAN Xu. Performance of the treatment of compound micro-polluted groundwater with three-stage contact oxidation filtration [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2013.)
- [14] VESCHETTI E, CITTADINI B, MARESCA D, et al. Inorganic by-products in waters disinfected with chlorine dioxide [J]. Microchemical journal, 2005, 79(1): 165 - 170.
- [15] MIYOUNG L, JUMI K, GWANGPYU K. Disinfection kinetics of murine norovirus using chlorine and chlorine dioxide [J]. Water research, 2010, 44(10): 3243 - 3251.
- [16] SHAYDULLINA G M, SINIKOVA N A, LEBEDEV A T. Reaction of ortho-methoxybenzoic acid with the water disinfecting agents ozone, chlorine and sodium hypochlorite [J]. Environmental chemistry letters, 2005, 3(1): 1 - 5.
- [17] LEBEDEV A T, SHAYDULLINA G M, SINIKOVA N A, et al. GC-MS comparison of the behavior of chlorine and sodium hypochlorite towards organic compounds dissolved in water [J]. Water research, 2004, 38(17): 3713 - 3718.