

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间分异模拟及影响因子 ..... 吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)

2012 ~ 2013 年间北京市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析 ..... 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)

南京地区大气 PM<sub>1.1</sub> 中 OC、EC 特征及来源解析 ..... 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)

太原市大气 PM<sub>2.5</sub> 中碳质组成及变化特征 ..... 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)

朔州市市区 PM<sub>2.5</sub> 中元素碳、有机碳的分布特征 ..... 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)

中国 2013 年 1 月 PM<sub>2.5</sub> 重污染过程卫星反演研究 ..... 薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)

高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究 ..... 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)

重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量 ..... 覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)

海南五指山大气气态总汞含量变化特征 ..... 雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)

树叶烟尘中的有机碳和元素碳 ..... 陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)

介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析 ..... 姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)

长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价 ..... 母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)

河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素 ..... 王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)

岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究 ..... 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)

岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析 ..... 卢丽, 王喆, 裴建国 (862)

两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例 ..... 闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)

三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征 ..... 王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)

夏、冬季降水中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析 ..... 梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)

南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比 ..... 程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)

夏季大辽河口区水体反硝化及其影响因素 ..... 杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)

太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性 ..... 叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)

汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析 ..... 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)

三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化 ..... 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)

太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算 ..... 金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)

贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析 ..... 苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)

物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用 ..... 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)

磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响 ..... 殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)

矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究 ..... 王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)

PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝 ..... 和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)

微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用 ..... 宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)

生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究 ..... 汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)

污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究 ..... 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)

高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律 ..... 卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)

MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制 ..... 郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)

基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响 ..... 滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)

天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究 ..... 何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)

开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价 ..... 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)

不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响 ..... 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)

种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 ..... 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘云飞 (1053)

江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价 ..... 金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)

镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用 ..... 章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)

高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响 ..... 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)

黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 ..... 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)

单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究 ..... 叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)

不同有机物料中的磷形态特征研究 ..... 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)

北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究 ..... 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)

燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 ..... 段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)

菌根真菌金属耐性机制研究进展 ..... 陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展 ..... 沈李东 (1133)

《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)

# 南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比

程拓<sup>1</sup>, 徐斌<sup>1\*</sup>, 朱贺振<sup>1</sup>, 夏圣骥<sup>1</sup>, 楚文海<sup>1</sup>, 胡广新<sup>2</sup>

(1. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 郑州升达经贸管理学院信息工程系, 郑州 451191)

**摘要:** 以取自南水北调中线工程的丹江口水库原水作为研究对象, 考察了丹江口水库原水中有机物的分子量大小和亲疏水性分子组成规律, 并确定了其所适用的强化混凝工艺条件. 分离试验表明, 丹江口原水中有机物主要以小分子量形式存在. 其中, <1 000 组分的溶解性有机碳 (DOC) 和 UV<sub>254</sub> 所占比例最大, 分别为 39.98% 和 39.10%, 且此区间还具有最高的三卤甲烷生成潜能 (THMFP) 和含氮消毒副产物生成潜能 (N-DBPFP). 亲疏水性方面, 原水中弱疏水性组分含量最高, 疏水性有机物的比例用 DOC 表征时超过 80%. 强疏水性组分含量最低但是强疏水性组分的 THMFP 最大, 占总量的 57.31%, 而各组分的 N-DBPFP 则相差不多. 混凝试验表明, 当采用聚合硫酸铁 (PFS, 4 mg·L<sup>-1</sup>) 和聚丙烯酰胺 (PAM, 0.4 mg·L<sup>-1</sup>) 处理丹江口原水时, 强化混凝效果最好, 可实现较为有效的去除浊度 (76.33%)、DOC (25.57%)、UV<sub>254</sub> (37.78%) 及 THMFP (23.16%). 本研究成果可为南水北调河南受水区既有水厂升级改造与工艺的优化运行提供有效的理论和技术支持.

**关键词:** 南水北调; 分子量分布; 亲疏水性; 强化混凝; 消毒副产物生成潜能 (DBPFP)

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0898-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.019

## Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation

CHENG Tuo<sup>1</sup>, XU Bin<sup>1\*</sup>, ZHU He-zhen<sup>1</sup>, XIA Sheng-ji<sup>1</sup>, CHU Wen-hai<sup>1</sup>, HU Guang-xin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Key Laboratory of Yangtze Aquatic Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Information Management, Shengda Trade Economics & Management College of Zhengzhou, Zhengzhou 451191, China)

**Abstract:** The best enhanced coagulation conditions for the raw water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and the molecular weights as well as hydrophobicity composition of Natural organic matter (NOM) in the water were investigated in this study. The results showed that the NOM in the raw water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project was mainly composed of the fraction with a molecular weight of <1 000 and transphilic components. Dissolved organic carbon (DOC, 39.98%) and UV<sub>254</sub> (39.10%) were the major components. And the fraction with a molecular weight of <1 000 had the highest contents of THMFP and N-DBPFP. In the raw water of Danjiangkou Reservoir, the sum of transphilic and hydrophobic fractions was up to 80%, and the hydrophobic fraction was the minimum contributor of the NOM, but the THMFP of the hydrophobic fraction had the highest percentage. And when the raw water of Danjiangkou Reservoir was treated using polymeric ferric sulfate (PFS, 4 mg·L<sup>-1</sup>) and poly-acrylamide (PAM, 0.4 mg·L<sup>-1</sup>), the optimal removal rates of turbidity, DOC, UV<sub>254</sub> and THMFP were 76.33%, 25.57%, 37.78% and 23.16%, respectively. The results of this paper can provide theoretical and technological basis for upgrading of the process and operation optimization of original drinking water treatment plants in the intake area of South-to-North Water Diversion Project.

**Key words:** South-to-North Water Diversion Project; molecular weight distribution; hydrophobic or hydrophilic performance; enhanced coagulation; disinfection by-products formation potential (DBPFP)

为了缓解我国北方地区水资源严重短缺的局面, 我国于 2002 年正式启动了南水北调工程. 作为南水北调工程的三大组成之一, 南水北调中线工程是一项跨流域、跨省市的特大型调水工程, 是解决京津冀豫的城市水资源紧缺问题的重大战略基础设施. 随着南水北调中线工程丹江口水作为新水源水的调入, 沿线受水区城市将呈现出原有水源、丹江口水等多水源供水模式. 由于丹江口水与原有水源

水的水质的不同, 受水区沿线城市必将面临多水源切换时水处理工艺调整的问题. 因此, 迫切需要研究丹江口来水的水质特性并研发适用于丹江口水库

收稿日期: 2014-08-03; 修订日期: 2014-10-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07400-004, 2012ZX07408001)

作者简介: 程拓 (1991 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水消毒副产物生成与控制, E-mail: 1095783916@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: tjwenwu@tongji.edu.cn

原水的水处理工艺。

强化混凝作为一种对低温低浊水有很好处理效果的水处理工艺,可以在水厂原有的混凝工艺的基础上进行,操作简便,具有较大的工程应用价值<sup>[1]</sup>。作为一种水处理工艺,强化混凝的主要目的是使混凝过程可以最大限度去除浊度、溶解性有机物和消毒副产物(DBPs)前体物,被美国环保署(EPA)视为一种可以有效去除消毒副产物前体物的水处理工艺<sup>[2]</sup>。本文以丹江口水库原水为研究对象,考察了丹

江口水库原水有机物的分子量大小和亲疏水性分子组成规律,同时进行了强化混凝试验包括混凝剂和助凝剂种类及投加量的优选,以期为南水北调配套的改扩建水厂的净水工艺提供技术支持和理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 原水水质特征

本研究用水样为丹江口水库原水,其作为南水北调中线工程水源水,基本水质情况见表1。

表1 丹江口原水基本水质指标

Table 1 Basic water quality indices of the raw water samples from Danjiangkou Reservoir

指标	浊度 /NTU	UV <sub>254</sub> /cm <sup>-1</sup>	DOC /mg·L <sup>-1</sup>	pH	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N /mg·L <sup>-1</sup>	总碱度 /mg·L <sup>-1</sup>	色度
参数值	2.94	0.048	1.96	8.07	<0.02	116.9	6

### 1.2 试剂与仪器

试剂药品:高锰酸钾(KMnO<sub>4</sub>);聚合氯化铝(PAC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为28%);聚合硫酸铁(PFS,全铁含量为18.5%);六水三氯化铁(1 mg·mL<sup>-1</sup>,以FeCl<sub>3</sub>计);硫酸铝[Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>](1 mg·mL<sup>-1</sup>,以Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>计);聚丙烯酰胺(PAM, 0.2 mg·mL<sup>-1</sup>);活化硅酸钠(Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>);硅酸钠(Na<sub>2</sub>O含量8%)酸化后稀释为1%(以原液计);Amberlite DAX-8、XAD-4树脂(罗门哈斯公司)。

仪器:ZR-6六联搅拌器;Hach 2100N浊度仪;UNICO 4802紫外-可见分光光度计;岛津TOC-TN分析仪;岛津GC-2010气相色谱仪;超滤膜(美国Millipore公司);超滤杯。

### 1.3 天然有机物分子量分布与亲疏水性分布试验

#### 1.3.1 天然有机物分子量分布试验

试验采用超滤膜法对丹江口水中不同分子量的溶解性有机物(DOM)进行分子量分布试验。原水经0.45 μm微滤膜过滤后,用切割分子量分别为30 000、10 000、5 000和1 000的超滤膜(UF膜)将水样中不同分子量的DOM分成5组。然后分别测定各组分水样的总溶解性有机碳(DOC)、UV<sub>254</sub>、三卤甲烷生成潜能(THMFP)、含氮消毒副产物生成潜能(N-DBPFP),各分子量区间浓度值采用差减法获得。

#### 1.3.2 天然有机物亲疏水性分布试验

试验采用Amberlite DAX-8、XAD-4树脂进行DOM亲疏水性分离<sup>[3,4]</sup>,其中DAX-8树脂吸附的溶解性有机物是强疏水性有机物,XAD-4树脂吸附的是弱疏水性有机物,而通过两种树脂柱后的溶解性有机物则为亲水性有机物。

### 1.4 强化混凝试验

#### 1.4.1 混凝剂种类及投加量的优选试验

分别取1.0 L水样6份加入到6个搅拌杯中。在搅拌开始时,向搅拌杯中加入不同剂量的混凝剂[PAC、PFS、Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>、FeCl<sub>3</sub>],然后按照250、120、60、30 r·min<sup>-1</sup>搅拌速度,分别搅拌1.5、2.5、5、7.5 min,最后静置30 min,取上清液分析测定浊度、UV<sub>254</sub>、DOC、THMFP等指标。

#### 1.4.2 加入助凝剂的强化混凝试验

分别取1.0 L水样6份加入到6个搅拌杯中。在搅拌开始时,向搅拌杯中加入一定剂量的混凝剂(由上步试验确定),然后再加入不同剂量的助凝剂(PAM、Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>),按照250、120、60、30 r·min<sup>-1</sup>搅拌速度,分别搅拌1.5、2.5、5、7.5 min,最后静置30 min,取上清液分析测定UV<sub>254</sub>和DOC。

### 1.5 消毒副产物生成潜能试验

试验所得水样均进行氯化培养生成DBPs潜能试验<sup>[5]</sup>,步骤如下:取50 mL放入洗净的烧杯,加氯前标定浓度,加氯量根据各水样的各水质参数值,按公式(1)<sup>[5]</sup>计算。调节溶液pH值为7.0 ± 0.02,选用磷酸二氢钾-氢氧化钠缓冲溶液使水样中缓冲溶液的浓度达到10 mmol·L<sup>-1</sup>。将以上水样装满45 mL安培瓶,并使用带有聚四氟乙烯垫片的盖子盖紧,培养瓶需保证无气泡,使得反应生成后的挥发性DBPs均存在于水相中,以防止其在打开瓶盖时逸出。培养水样放置于黑暗环境的培养箱内,温度控制为25℃ ± 1℃。7 d后生成潜能反应结束,向培养液中加入过量氯化铵将剩余氯淬灭。然后立即根据EPA551.1和EPA552.2进行DBPs的浓度分析。

$$\text{Cl}_2(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) = 3 \times [\text{DOC}] + 8 \times [\text{NH}_4\text{-N}] + 5 \times [\text{NO}_2^-] + 10 \quad (1)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 丹江口水 DOM 的分子组成规律

#### 2.1.1 水中 DOM 的分子量分布规律分析

原水经过 0.45 $\mu\text{m}$  微滤膜过滤后,再经过 UF 膜过滤,最终分为 <1 000、1 000 ~ 5 000、5 000 ~ 10 000、10 000 ~ 30 000 和 >30 000 这 5 种组分. 测定各组分水样的 DOC、UV<sub>254</sub>,并对各组分水样进行消毒副产物生成潜能(DBPFP)试验,其结果如图 1 所示.

由图 1 可知,原水中各分子量区间 DOC 与 UV<sub>254</sub> 的分布规律具有较好的一致性,<1 000 区间

的 DOC 占有的比例最大为 39.98%,以后依次为 10 000 ~ 30 000、1 000 ~ 5 000、5 000 ~ 10 000 和 >30 000 组分,所占比例依次为 31.05%、12.05%、9.01% 和 8.34%. <1 000、1 000 ~ 5 000、5 000 ~ 10 000、10 000 ~ 30 000 以及 >30 000 的各区间组分的 UV<sub>254</sub> 百分比分别为 39.10%、7.04%、13.05%、32.99% 和 9.03%. UV<sub>254</sub> 与 DOC 一致,都是以 <1 000 和 10 000 ~ 30 000 组分为主. 结果表明,原水中 NOM 以小分子量存在形式为主,同时也不能忽略 10 000 ~ 30 000 组分. 考虑到 <1 000 DOM 难于通过常规净水工艺中去除<sup>[6]</sup>,而 10 000 ~ 30 000 组分可通过强化混凝作用予以去除,因此丹江口原水的净水处理工艺应特别关注混凝沉淀过程的效能.

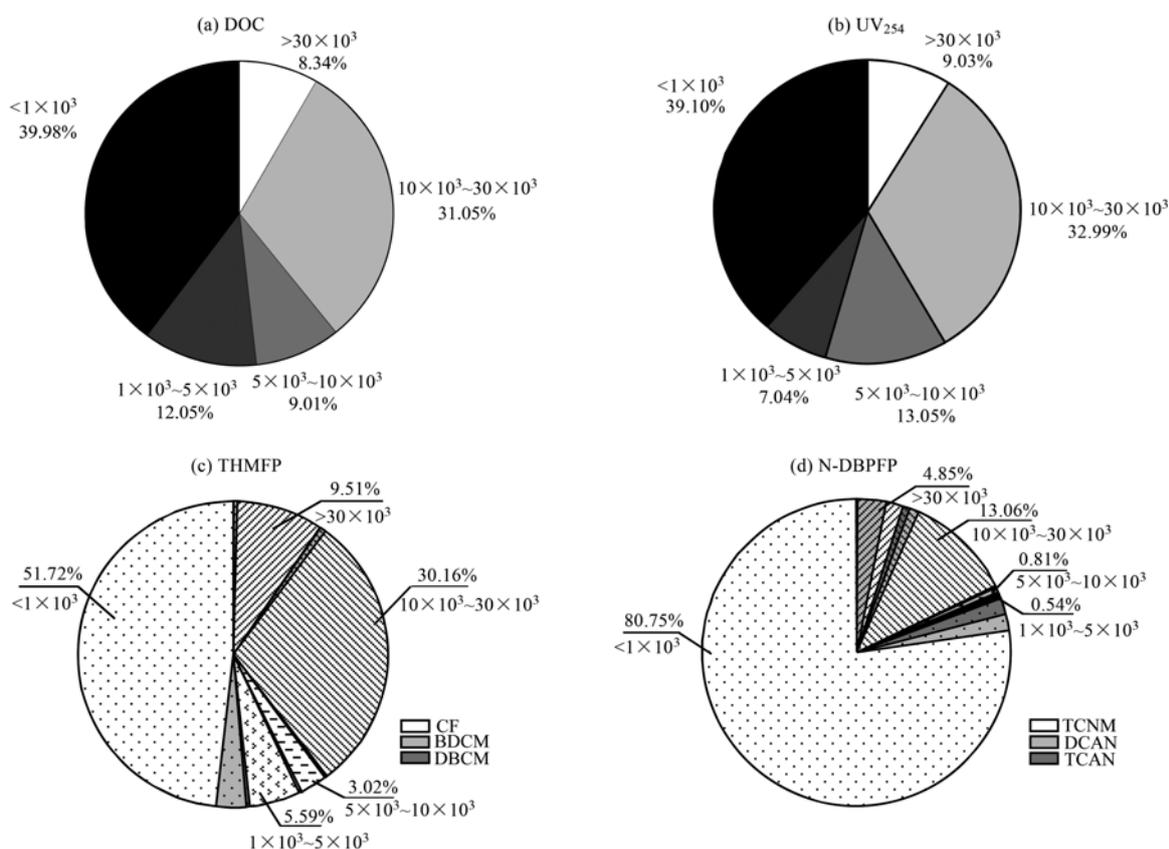


图 1 丹江口原水有机物分子量分布规律

Fig. 1 Molecular weight distribution in the raw water sample from Daniangkou Reservoir

由图 1 可以看出,原水经过氯化潜能培养后,生成的三卤甲烷 (THMs) 有 3 种,分别是氯仿 (CF)、二氯一溴甲烷 (BDCM)、一氯二溴甲烷 (DBCM),而生成的含氮消毒副产物 (N-DBPs) 则包括三氯硝基甲烷 (TCNM)、二氯乙腈 (DCAN)、三氯乙腈 (TCAN). 对于 THMFP,各分子量区间组分都有 THMs 生成,其中 <1 000 有机物组分的 THMFP 最

高,占总的 THMFP 的 51.72%. 这表明 <1 000 组分是生成 THMs 的主要前体物,这与 Chiang 等<sup>[7]</sup> 和 Gang 等<sup>[8]</sup> 的研究结果相似. 10 000 ~ 30 000、>30 000、1 000 ~ 5 000、5 000 ~ 10 000 组分具有的 THMFP 依次降低,所占比例分别为 30.16%、9.51%、5.59% 和 3.02%. 其中,10 000 ~ 30 000 组分的 DOM 也具有较大的 THMFP,其占总量的

30.16%, 这与 DOC 及  $UV_{254}$  的分布规律也基本相似. 对于 N-DBPFP, 与 THMFPP 分布规律相似, 各分子量组分的 NOM 同样都有 N-DBPs 生成, <1 000 组分生成 N-DBPs 潜能最高, 占到总 N-DBPFP 的 80.75%. 不同的是, 其他分子量区间组分的 N-DBPFP 的浓度都较小, 其中 10 000 ~ 30 000 最大, 也只占到 13.06%. 因此, 同样是 <1 000 分子量区间

的 NOM 是生成含氮消毒副产物的主要前体物.

### 2.1.2 NOM 亲疏水性分布

采用 Amberlite DAX-8、XAD-4 两种树脂进行 NOM 亲疏水性分离, 从而将水中有机物分离为强疏水性、弱疏水性和亲水性这 3 种组分, 不同分子区间水样的 DOC、 $UV_{254}$ 、THMFPP 和 N-DBPFP 这 4 个指标, 如图 2 所示.

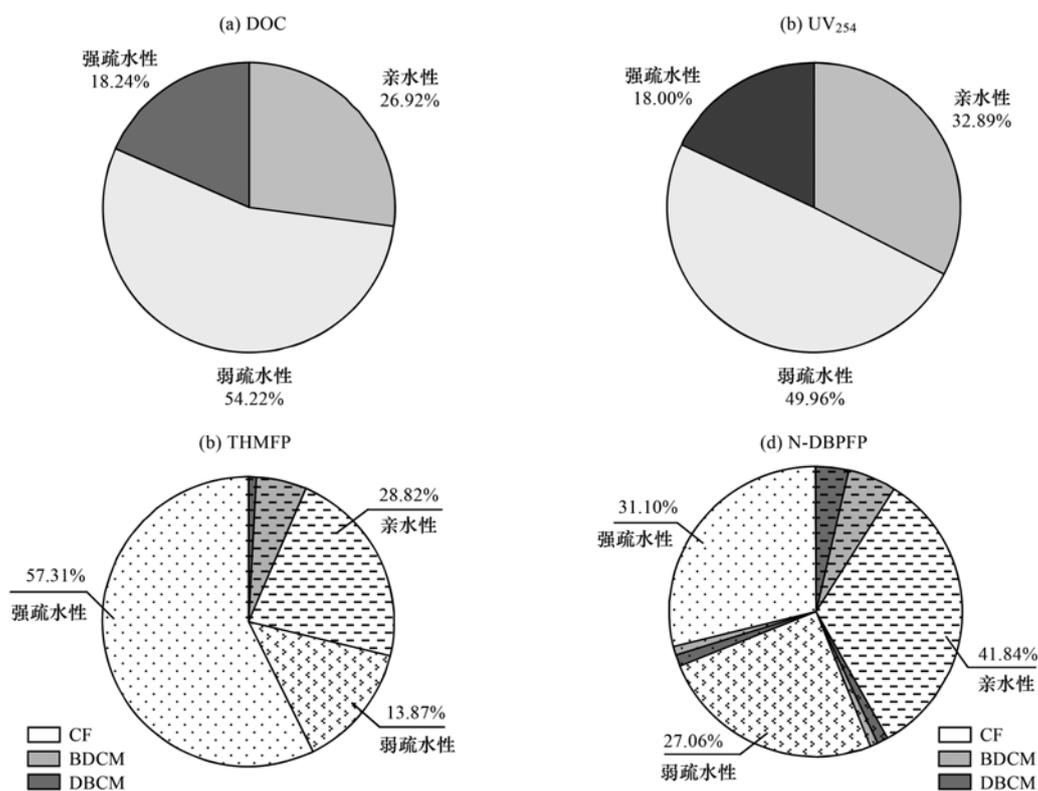


图 2 丹江口原水亲疏水性分布规律

Fig. 2 Hydrophobic-hydrophilic feature in the raw water sample from Danjiangkou Reservoir

由图 2 可知, 弱疏水性组分的 DOC 含量最高, 占到总量的 54.22%. 强疏水性和亲水性组分各自 DOC 的百分比分别为 18.24% 和 26.92%, 而丹江口水中弱疏水性和强疏水性有机物的比例之和则达到了 72.46%. 据报道, 在水质较好的水源中疏水性有机物占水中 NOM 的 70% 以上<sup>[9]</sup>, 因此可以认为丹江口水水质较好. 对  $UV_{254}$  而言, 各亲疏水性组分的分布规律与 DOC 具有较好的一致性, 同样是以弱疏水性组分为主. 强疏水性、弱疏水性和亲水性组分的比例分别为 18.00%、49.96%、和 32.89%.

DBPFP 与原水中 NOM 的亲疏水性有很大的关系 (如图 2). 强疏水性组分的 THMFPP 最大, 占总量的 57.31%, 而后则依次为亲水性组分和弱疏水性组分, 所占比例分别为 28.82% 和 13.87%. 对比图 2 中 DOC 和  $UV_{254}$  可以看出, 强疏水性组分在丹江

口水中所占比例最少, 但其生成 THMs 的量最高. 有关研究结果也表明疏水性腐殖酸类有机物是生成 THMs 的主要前体物质<sup>[6]</sup>, 因为此类有机物含有相对较多的芳香类物质, 而这种芳香类物质正好是生成 THMs 的重要前体物. 对于 N-DBPFP 而言, 各组分生成 N-DBPs 的含量由大到小依次为亲水性组分、强疏水性组分和弱疏水性水组分, 所占比例依次为 41.84%、31.10% 和 27.06%. 可以看到, 各组分之间的 N-DBPFP 相差不大, 说明丹江口原水中 N-DBPs 前体物在 3 种亲疏水性组分中的分布比较均匀.

### 2.2 混凝剂种类及投加量的优选试验

分别应用聚合高分子混凝剂 (PAC、PFS) 和低分子无机盐混凝剂 [ $Al_2(SO_4)_3$ 、 $FeCl_3$ ] 开展混凝效能试验. 在不同的混凝剂投加量的条件下, 经絮凝

沉淀后,水样浊度、DOC、 $UV_{254}$ 与 THMFP 随不同混凝剂投加量变化的结果如图 3~6 所示。

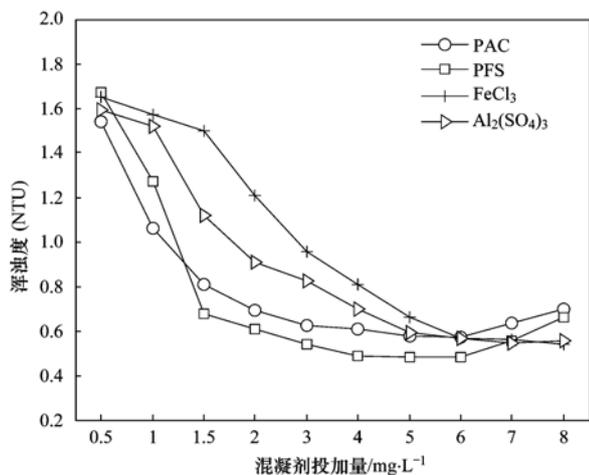


图 3 混凝剂投加量对浊度去除效果的影响

Fig. 3 Effect of coagulant dosage on turbidity removal

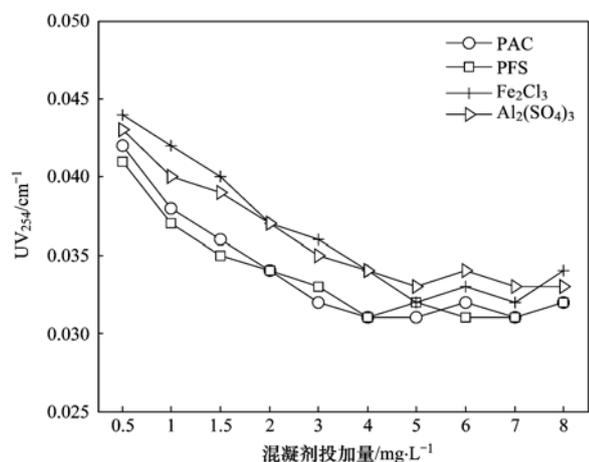


图 4 混凝剂投加量对  $UV_{254}$  去除效果的影响

Fig. 4 Effect of coagulant dosage on  $UV_{254}$  removal

由图 3 可知,聚合高分子混凝剂(PAC、PFS)的去浊效果高于低分子无机盐混凝剂[ $Al_2(SO_4)_3$ 、 $FeCl_3$ ]. 有研究表明,聚合的铝铁絮凝剂的混凝效能比传统的混凝剂要高 2~3 倍,一般认为,由人工控制的预制条件可以形成有利于混凝的最佳形态,投加后就可以立即发挥高效作用,不受溶液中化学环境条件的干扰<sup>[10]</sup>. 以 PAC 和  $Al_2(SO_4)_3$  为例,一般认为, $Al_{13}$  是 PAC 中的最佳凝聚-絮凝成分,其含量可以反映 PAC 的有效性,且只有在预制条件下才能大量生成<sup>[11]</sup>. 这种预聚合作用能明显消除混凝条件(如 pH、碱度、混合时间)对铝水解形态转化的影响,并最终形成优势的  $Al_{13}$  最佳凝聚形态,所以投加后即可发生显著电中和/吸附凝聚脱稳作

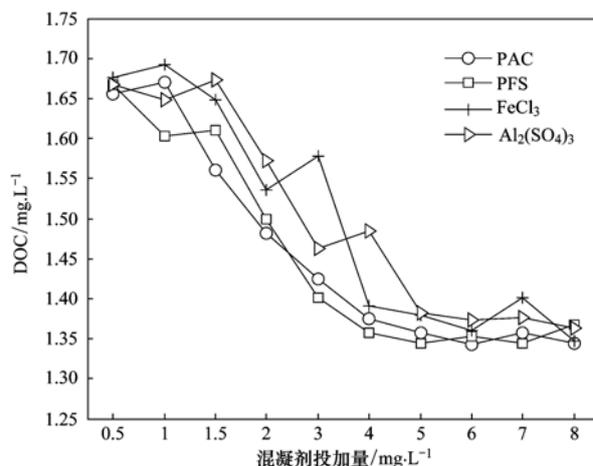


图 5 混凝剂投加量对 DOC 去除效果的影响

Fig. 5 Effect of coagulant dosage on DOC removal

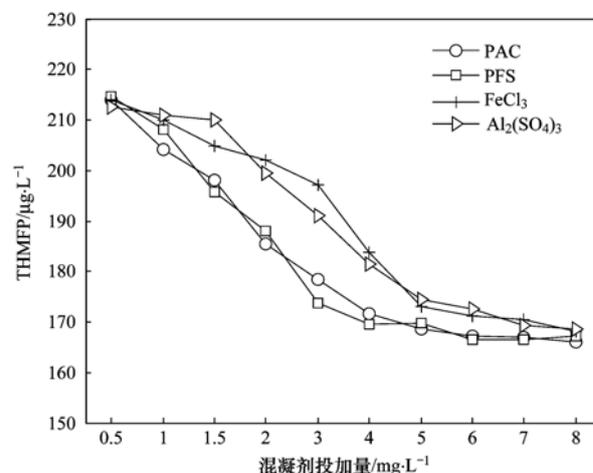


图 6 混凝剂投加量对 THMFP 去除的影响

Fig. 6 Effect of coagulant dosage on THMFP removal

用<sup>[12]</sup>. 对于 PAC 和 PFS 而言,投加量为  $0.5 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,余浊降低较快,投加量为  $4 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,余浊变化较为平稳. 而当投加量大于  $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,余浊值反而增大,这是由于过量的混凝剂致使胶体复稳. 且当投加量较大时,PFS 的除浊效果要好于 PAC,当 PFS 投加量为  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,浊度去除率可达到 73.82%.

混凝剂投加量对  $UV_{254}$  和 DOC 去除效果的影响如图 4 和图 5 所示.  $UV_{254}$  是衡量水中有机物指标的一项重要控制参数<sup>[13]</sup>. 由图 4 和图 5 可以看出,聚合高分子混凝剂(PAC、PFS)对  $UV_{254}$  和 DOC 的去除效果要高于低分子无机盐混凝剂[ $Al_2(SO_4)_3$ 、 $FeCl_3$ ],且当 PAC 和 PFS 投加量为  $0.5 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, $UV_{254}$  和 DOC 降低较快, $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以后, $UV_{254}$  和 DOC 的变化趋于平稳. 这是因为当混凝剂投加量增加到一定值时,已被电中和的胶体粒子又因吸附作

用而带正电,并复稳,弱化了混凝作用,致使 DOC 和  $UV_{254}$  的变化趋于平稳<sup>[14]</sup>. 当 PAC 的投加量为  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,  $UV_{254}$  的去除率最高,为 31.11%. 当 PFS 的投加量为  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,  $UV_{254}$  和 DOC 的去除率分别为 31.11% 和 22.31%. 可以看出,  $UV_{254}$  的去除率略高于 DOC. 这是因为  $UV_{254}$  代表的是腐殖酸、木质素等含有苯环等不饱和键的有机物,通过电性中和作用可以有效地去除这些物质,DOC 代表了水中的全部有机物,而其中的一部分有机物却并不能被混凝工艺有效去除,所以  $UV_{254}$  的去除率较高<sup>[15]</sup>. 随着 PFS 投加量的继续增加,DOC 的去除率提高缓慢,几乎不变.

由图 6 可知,同样,两种聚合高分子混凝剂 (PAC、PFS) 对 THMFP 的去除效果更好,并且变化趋势与 DOC、 $UV_{254}$  基本相同,这说明 DOC 和  $UV_{254}$  与 THMFP 有一定的相关性. 董秉直等<sup>[16]</sup> 的试验研究表明,黄浦江水的 THMFP 与  $UV_{254}$  有很好的相关性. 而两种聚合高分子混凝剂对 THMFP 的去除效果相当. 当 PAC 和 PFS 投加量都为  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,对 THMFP 的去除效果相对较好,去除率为分别 22.19% 和 23.16%. 而随着投加量的继续增大,THMFP 基本不再变化.

通过混凝剂优选试验,PAC 和 PFS 对南水北调水处理效果较好,故选择 PAC 和 PFS 作为下一步试验的混凝剂与两种助凝剂两两组合进一步考察适合南水北调水的强化混凝工艺. 其中,PAC 和 PFS 的投加量分别定为  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

### 2.3 助凝剂的种类及投加量优选试验

本试验采用 PAM 和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  两种助凝剂,与优化出来的 PAC 和 PFS 组合. 其中 PAM 的投加量为 0.05、0.10、0.20、0.40、0.60 和 0.80  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,活化硅酸钠投加量为 1.25、2.50、5、7.50、10  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和 12.50  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (以原液计). 按助凝剂投加量依次增大的顺序,对水样进行编号.

助凝剂投加量对  $UV_{254}$  去除效果的影响如图 7 所示. 活化硅酸钠和 PFS 的组合对  $UV_{254}$  没有去除作用. 其他 3 种方式都可以进一步去除  $UV_{254}$ ,且对  $UV_{254}$  的去除能力相当,最小都可以使其值降低到 0.028,但是 PAM + PFS 只需要较低 PAM 投加量 ( $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

如图 8 所示,PFS + PAM 与 PAC +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  都可以进一步去除 DOC,而 PAC + PAM 与 PFS +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  则几乎没有作用. 当 PAM 的投加量为  $0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,PFS + PAM 对 DOC 的去除效果最好,能使其值

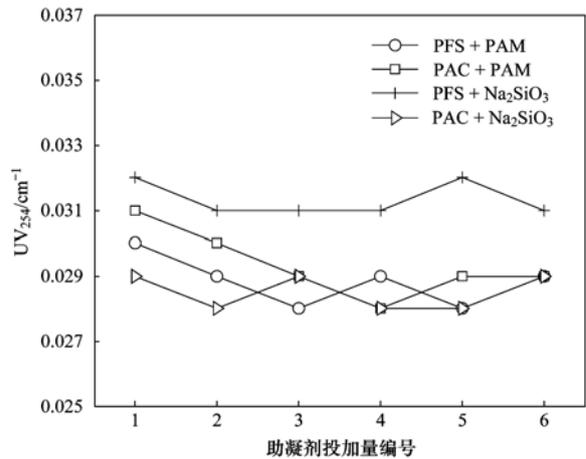


图 7 PAM 和活化硅酸钠对  $UV_{254}$  去除效果的对比

Fig. 7 Comparison of  $UV_{254}$  removal between PAM and activated sodium silicate treatment

降低至  $1.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 而  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  在投加量为  $7.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,与 PAC 组合才能使 DOC 降至  $1.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

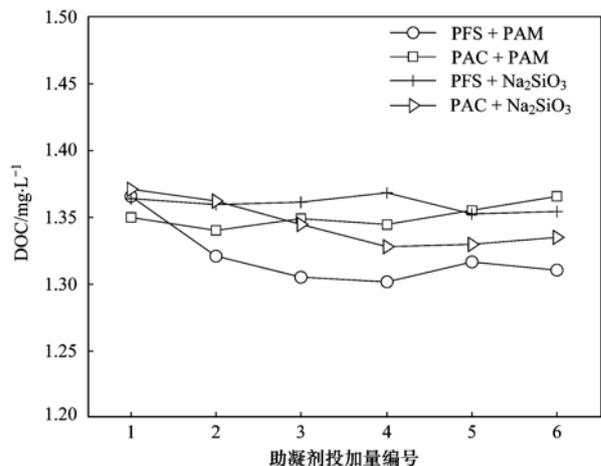


图 8 PAM 和活化硅酸钠对 DOC 去除效果的对比

Fig. 8 Comparison of DOC removal between PAM and activated sodium silicate treatment

通过上述分析可知,当 PAM 的投加量为  $0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,PFS 投加量为  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  组合时,对  $UV_{254}$  和 DOC 这两个指标的削减效果最佳. 结合 2.2 和 2.3 节中两个试验分析可知,从强化有机物去除效能出发,本研究所取南水北调原水在实际水处理工艺中宜采用 PFS 作为混凝剂 (投加量  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),PAM 为助凝剂 (投加量  $0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

### 3 结论

(1) 丹江口原水中 NOM 均以小分子量存在形式为主.  $<1000$  和  $10000 \sim 30000$  组分的占有比例

居于前两位,其中 DOC 所占比例分别为 39.98% 和 31.05%, $UV_{254}$  则分别为 39.10% 和 32.99%。同样,丹江口原水 <1 000 组分具有最高的 THMFP 和 N-DBPFP。

(2) 丹江口原水中弱疏水性组分含量最高,疏水性有机物的比例用 DOC 表征时超过 80%,亲水性 NOM 组分的比例高于强疏水性 NOM 组分。各组分 THMFP 从大到小依次为强疏水性组分、亲水性组分和弱疏水性组分。而各组分 N-DBPFP 相差不大,分布较为均匀。

(3) 聚合高分子混凝剂 PFS 与 PAC 对浊度、 $UV_{254}$ 、DOC 和 THMFP 等的去除效果明显好于低分子无机盐混凝剂  $Al_2(SO_4)_3$  与  $FeCl_3$ ,更适宜于丹江口原水的混凝处理工艺。

(4) 试验结果表明采用 PFS( $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 和 PAM( $0.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 处理丹江口原水,强化混凝效果最好,可实现较为有效的去除浊度(76.33%)、溶解性有机碳 DOC(25.57%)、 $UV_{254}$ (37.78%) 及 THMFP(23.16%)。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 胡辉. 低温低浊黄河水强化混凝研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013. 8-13.
- [ 2 ] Exall K N, Vanloon G W. Using coagulants to remove organic matter[J]. Journal-American Water Works Association, 2000, **92**(11): 93-102.
- [ 3 ] Thurman E M, Malcolm R L. Preparative isolation of aquatic humic substances [J]. Environmental Science & Technology, 1981, **15**(4): 463-466.
- [ 4 ] Aiken G R, McKnight D M, Thorn K A, *et al.* Isolation of hydrophilic organic acids from water using nonionic macroporous resins[J]. Organic Geochemistry, 1992, **18**(4): 567-573.
- [ 5 ] Huang H, Wu Q Y, Hu H Y, *et al.* Dichloroacetonitrile and dichloroacetamide can form independently during chlorination and chloramination of drinking waters, model organic matters, and wastewater effluents[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(19): 10624-10631.
- [ 6 ] Hua G H, Reckhow D A. Characterization of disinfection byproduct precursors based on hydrophobicity and molecular size [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(9): 3309-3315.
- [ 7 ] Chiang P C, Chang E E, Liang C H. NOM characteristics and treatabilities of ozonation processes[J]. Chemosphere, 2002, **46**(6): 929-936.
- [ 8 ] Gang D C, Clevenger T E, Banerji S K. Relationship of chlorine decay and THMs formation to NOM size [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, **96**(1): 1-12.
- [ 9 ] Yan M Q, Wang D S, You S J, *et al.* Enhanced coagulation in a typical North-China water treatment plant[J]. Water Research, 2006, **40**(19): 3621-3627.
- [ 10 ] 汤鸿霄. 无机高分子絮凝剂的基础研究[J]. 环境化学, 1990, **9**(3): 1-12.
- [ 11 ] 汤鸿霄, 栾兆坤. 聚合氯化铝与传统混凝剂的凝聚-絮凝行为差异[J]. 环境化学, 1997, **16**(6): 497-505.
- [ 12 ] 栾兆坤, 汤鸿霄, 于忱非. 混凝过程中铝与聚合铝水解形态的动力学转化及其稳定性[J]. 环境科学学报, 1997, **17**(3): 321-327.
- [ 13 ] 蒋绍阶, 刘宗源.  $UV_{254}$  作为水处理中有机物控制指标的意义[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, **24**(2): 61-65.
- [ 14 ] 李多, 苗时雨, 张怡然, 等. 高锰酸钾预氧化-强化混凝控制饮用水消毒副产物的研究[J]. 水处理技术, 2014, **40**(2): 26-30.
- [ 15 ] 刘成, 高乃云, 蔡云龙. 强化混凝去除黄浦江原水中有机物研究[J]. 中国给水排水, 2006, **22**(1): 84-87.
- [ 16 ] 董秉直, 曹达文, 范瑾初. 最佳混凝投加量和 pH 去除水中有机物的研究[J]. 工业水处理, 2002, **22**(6): 29-31.

## CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i>	( 759 )
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM <sub>2.5</sub> in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	( 768 )
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM <sub>1.1</sub> from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	( 774 )
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i>	( 780 )
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM <sub>2.5</sub> in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i>	( 787 )
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i>	( 794 )
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i>	( 801 )
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i>	( 809 )
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	( 817 )
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i>	( 824 )
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i>	( 831 )
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i>	( 839 )
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i>	( 847 )
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i>	( 855 )
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo, <i>et al.</i>	( 862 )
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i>	( 869 )
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i>	( 879 )
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	( 888 )
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i>	( 898 )
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei, <i>et al.</i>	( 905 )
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i>	( 914 )
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i>	( 922 )
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	( 928 )
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	( 936 )
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beijing River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i>	( 946 )
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i>	( 955 )
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i>	( 963 )
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i>	( 969 )
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i>	( 980 )
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i>	( 989 )
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i>	( 995 )
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i>	( 1000 )
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i>	( 1006 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i>	( 1013 )
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i>	( 1021 )
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i>	( 1027 )
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i>	( 1037 )
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i>	( 1045 )
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i>	( 1053 )
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i>	( 1060 )
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i>	( 1069 )
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i>	( 1075 )
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i>	( 1084 )
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i>	( 1092 )
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	( 1098 )
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i>	( 1105 )
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i>	( 1117 )
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	( 1123 )
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong	( 1133 )

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行