

王东升, 解建坤, 周永强, 等. 2009 优化混凝工艺及操作规范的研究与进展[J]. 环境科学学报, 29(5): 897– 904
Wang D S, Xie J K, Zhou Y Q, *et al*. 2009 Advances in optimized coagulation and operation guideline[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(5): 897– 904

优化混凝工艺及操作规范的研究与进展

王东升^{1*}, 解建坤¹, 周永强^{1,2}, 邢丽楠¹, 李涛¹, 葛小鹏¹

1 中国科学院生态环境研究中心饮用水科学与工程中心, 北京 100085
2 Unit of Water Treatment AWQC, Adelaide, Australia
收稿日期: 2008-10-14 修回日期: 2009-03-19 录用日期: 2009-04-02

摘要: 水质的急剧恶化、科学技术的迅速发展与日趋严格的水质标准, 对传统混凝工艺提出了严峻的挑战, 同时也赋予其新的发展机遇. 基于水源微污染现状和消毒副产物控制及安全供水目标, 针对性地提出优化混凝工艺及其操作规范成为目前推动水工业发展的重点所在. 本文从评估体系、混凝剂优化、混凝过程优化、絮体结构形成优化以及系统优化控制等角度对优化混凝技术加以综合介绍, 并进一步对若干主要研究进展与发展方向加以评述, 以推动优化混凝工艺及操作规范的建立与发展.
关键词: 优化混凝; 水质; 水体有机物; 消毒副产物; 操作规范
文章编号: 0253-2468(2009)05-897-08 中图分类号: X703.1 文献标识码: A

Advances in optimized coagulation and operation guideline

WANG Dongsheng^{1,*}, XIE Jiankun¹, CHOW CWK^{1,2}, XING Linan¹, LI Tao¹, GE Xiaopeng¹

1 SKLEAC, Research Center for Eco-Environmental Science, CAS, Beijing 100085
2 Unit of Water Treatment AWQC, Adelaide, Australia

Received 14 October 2008 received in revised form 19 March 2009 accepted 2 April 2009

Abstract Water quality deterioration, advances in technology and more stringent water quality standards have given great challenges as well as opportunities to coagulation research. To tackle the problem of micro-polluted source water and to assure the supply of safe water with in the disinfection by products (DBP) control targets, development of optimized coagulation technology and operation guidelines have become a high priority consideration of the water industry. In this paper, the development of optimized coagulation technology in terms of analytical methodologies, coagulant optimization, process optimization – flocculation and control and system integration are critically reviewed. Specific attention has been paid to the necessity and direction of optimized coagulation and the establishment of operation guidelines.
Keywords optimized coagulation; water quality; aquatic organic matter (AOM); disinfection by products (DBP); operation guidelines

1 引言 (Introduction)

水体中的化学物质、微生物污染所引起的生态灾难, 以及饮用水的安全性和人类健康问题已经引发了人们的普遍关注. 水质安全已成为一个全球性的重要问题. 为了提供可口、安全的饮用水, 强化水处理工艺并加以系统优化成为其中的关键所在 (WHO, 1996; Wang *et al*, 2009).
近几十年来, 混凝技术领域研究在各方面均取

得了较大的成果, 呈现出十分活跃的发展趋势 (Wang *et al*, 2006; Yan *et al*, 2006; Edzwald *et al*, 1999; Lartiges *et al*, 1997; Dentel 1988; Van Benschoten *et al*, 1990). 有关混凝剂化学和混凝过程化学的研究, 使人们得以从分子水平探讨混凝过程及混凝剂自身化学形态 (包括溶液化学、颗粒与表面形态) 的分布与转化规律, 这在混凝作用机理与无机高分子混凝剂 (Inorganic Polymer Flocculant, IPF) 的研究生产应用中表现尤为突出.

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (No. 2006AA06Z312); 国家自然科学基金项目 (No. 50621804, 50578155)
Supported by the High-Tech Research and Development Program of China (No. 2006AA06Z312) and the National Natural Science Foundation of China (No. 50621804, 50578155)
作者简介: 王东升 (1970—), 男, 研究员 (博士), E-mail: wgd@rcees.ac.cn * 通讯作者 (责任作者)
Biography: WANG Dongsheng (1970—), male, professor (Ph. D.), E-mail: wgd@rcees.ac.cn * Corresponding author

而混凝物理的研究使人们对不同碰撞聚集作用机制下如布朗运动、流体剪切、差速沉降等颗粒物之间的反应动力学过程有了更为深刻的认识,为混凝反应器及混凝工艺的强化与优化提供了设计基础。由于各种在线监测技术的发明与应用,使混凝过程得到有效的监控并趋向自动化发展。在此基础上,对投药监控的研究提出了若干定量计算模式并将其应用于工程实践,进一步推动了混凝理论研究的发展。虽然对于混凝过程中的各种影响因素渐渐得到明确,但综合性的实验研究仍然十分缺乏,制约着人们对混凝过程本质性的认识。因此,深入研究混凝过程本质,定量描述其絮体的形成、结构、行为与性能以及各种影响因素之间的相互作用关系,对于混凝工艺过程的调控与实施,具有重要的理论价值与广泛的应用前景,并成为当前环境科学与水工业领域研究的前沿热点。对于一既定体系(一定的水源、处理设施与选定的混凝剂)以定量计算来描述整体工艺流程,并与其他工艺进行优化组合,达到水处理过程的最优控制,仍然是该领域研究人员为之努力追求与奋斗的目标。

随着水环境污染的日益严重和水质标准的日趋严格,以及对水处理工艺自动化程度与降低成本费用的迫切要求,本文基于水源微污染现状、消毒副产物控制及安全供水的目标,针对性地提出优化混凝工艺及其操作规范为当前推动水工业发展的重点所在。通过建立优化混凝评价体系(引入快速有机物表征、消毒副产物与毒性评价相结合)、混凝水质数据库和以高效去除污染物为目标的系统优化工艺,并基于中试研究和生产运行提出适宜自来水厂的控制标准。本文在“十五”期间本研究所参加“863”相关项目并结合国内外近期研究成果的基础上,从混凝剂、混凝过程和絮体结构形成的优化以及系统优化等多方面对优化混凝技术加以综合介绍,以期推动相关研究更加深入的发展。

2 优化混凝表征方法体系 (Characterization methodology for optimized coagulation process)

水体有机物(AOM)、颗粒物及微污染物是一个十分复杂乃至混杂的体系。天然有机物(Natural Organic Matters, NOM)以及通过各种途径进入水体的人工合成有机物(Synthetic Organic Matters, SOC)在水体中会发生复杂的物理、化学和生物过程。这些过程在一定的水源体系中紧密联系、相互作用,共同决定了原水AOM的组成、性质和分布特征。同

时AOM尤其是溶解性有机物(Dissolved Organic Matters, DOM)所特有的物化性质及其对处理过程的影响成为提高水质和确保水厂稳定运行的重点关注对象,诸如混凝剂投药量和混凝效果的评估、消毒副产物的形成、管网微生物的生长、对人体健康的影响等等。因此,要检测工艺的有效性、提高处理效率并优化水处理流程,必须对处理前后以及处理过程中的水质特征进行充分的表征。目前,已有大量的形态、形貌表征技术应用于水体有机物及其对处理工艺过程影响的表征研究(Chow *et al.*, 2007; Wei *et al.*, 2006; Chow *et al.*, 2004; Amy *et al.*, 1987; Leenheer, 1981; Her *et al.*, 2002)。作为介于简便型和复杂型有机表征技术之间的快速树脂分级、高效粒度排阻色谱(HPSEC)、超滤法等已被证明为简捷有效的有机物表征手段。其中,HPSEC已被广泛地应用于水处理工艺过程研究,特别是新工艺开发前中试优化过程的研究。本研究组已另文对几种简便技术,如快速树脂分级、HPSEC、超滤法及在线水质监测S:CAN等技术及其应用于DOM优化去除工艺的实际案例作了综合介绍(Chow *et al.*, 2007)。

优化混凝工艺是一个多目标的综合工艺,追求以最小的生产成本最大化去除颗粒物和浊度、最大化去除TOC和DBP前驱物及微污染物质,同时减小残余混凝剂和污泥产量,确保水质安全。这一过程需要对水体颗粒物、悬浮物、有机毒性物质和处理成本等进行合理的综合表征评估。由于工艺体系与过程的复杂性,要想全面了解AOM等的赋存与变化状况十分困难,而目前的水质分析方法又缺乏对工艺优化过程进行合理评价的方法体系。因此,研究并应用改进的形态表征方法和毒性检测技术,从混凝优化控制技术的角度对AOM等的分布与变化规律及其物化性质和毒性状况进行综合评估成为当前研究中的重点。

1) 形态表征方法的改进与工艺评估

HPSEC与反相色谱技术的应用及其数据的优化拟合,连同进行操作评估或工艺预测的有效方法已成为目前研究的重点(Alexandra, 2008; Lankes *et al.*, 2008; Hua *et al.*, 2007; Stenson, 2008)。有关HPSEC数据的优化拟合及其应用于工艺评估的进展见图1(Chow *et al.*, 2008)。另外,在树脂分离分级方法的改进方面(不同材料的选择、水源的针对性、混凝剂作用附带影响因素的表征、与消毒副

产物生成势 (DBPFP) 的结合分析、不同水体的表征) 仍然有许多工作需要展开. 尤其是其与粒度分

析方法的综合应用, 成为进一步分析 AOM 及其可去除特征研究的有效途径.

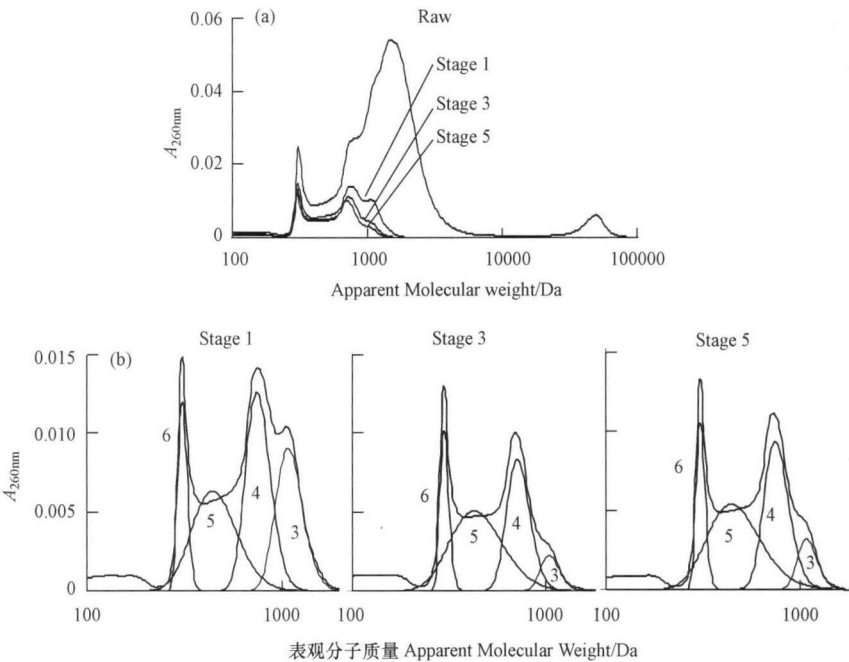


图 1 MP 水样的分子量分布特征与模型计算 (a 原水和不同阶段混凝后水 (阶段 1、3 和 5); b 不同阶段混凝的模型计算对比 (100 mg L^{-1} 硫酸铝的分批投加))

Fig. 1 MW profiles of MP water (a raw and treated (stage 1, 3 and 5); b after sequential treatment)

2) 物化性质表征与生物毒性的综合评估

上述物化性质表征方法与毒性状况综合评估 (如 SOS/Umu 简称 umu) 的相互结合, 是进行微污染或高 TOC 水体优化去除工艺研究的关键所在. 其中重要的研究内容包括: 预氧化工艺 (如氯化、臭氧化 / H_2O_2) 对后续工艺的影响及其与强化混凝工艺的有效结合, 模拟水样与实际水体的对比研究 (理论研究与实际表征相结合), 有机高分子絮凝剂 (如 HCA 和 PAM) 中所含单体毒性问题的讨论, 以及不同污染物形成的消毒副产物的毒性与反应过程的毒性迁移转化特征等方面.

3 原水水质表征 (Source water quality characterization)

3.1 常规水质变化特征与基本数据库

原水水质特征是决定混凝投药与控制的基础. 我国幅员广阔, 随着区域、流域以及季节的不同, 原水水质具有显著不同的特征. 同时水源的供应渠道也有很大的不同 (河流、水库、湖泊和地下水等不同水源), 甚至有时候需要进行多水源供水. 因此, 进行常规水质数据的积累与分析, 形成基本数据库具有十分重要的意义. “十一五”期间我国在这方面的

工作将会进一步加强. 在此仅举若干实例加以分析 (Wang *et al.*, 2009).

1) 北方某河流水系具有一些共性, 如高碱度 ($> 120 \text{ mg L}^{-1}$)、高硬度 ($> 160 \text{ mg L}^{-1}$)、高 pH 值 (> 8.2), 同时浊度、叶绿素和藻类数, 以及蛋白质氮比重也较高. 原水受有机污染物污染严重, 并呈较严重的富营养化. 水温等部分理化指标和生物指标季节性变化比较明显, 水质表现出明显的季节性, 可以将原水按季节分为若干个典型水质期.

2) 南方某河流水源表现出一般河水水质的分布特征, 碱度较低, 处于碳酸平衡控制机制. 水质呈现枯水期与丰水期的变化特征. 枯水期海水上溯导致盐度增加; 夏季 6、7 月份降雨比较集中, 酸雨出现频率为 52.8%. 水质变化主要与河流水质的季节性波动以及受污染源排放影响等因素有关. 原水的比紫外吸收值 (Special Ultraviolet Absorbance SUVA, 一般定义为 $\text{UV}/\text{DOC} \times 100$) 偏低, 属于微污染水体.

3) 北方某水库水源属于典型的低浊度水 ($< 3 \text{ NTU}$). 由于采取了严格的保护措施, 水质较好. 高温季节存在由于水中藻类繁殖引发颗粒态有机碳

(POC)含量升高的现象,而该水体 SUVA 值只有 1.69,属于较难通过混凝方法去除有机物的水体。

另外,在总结水厂常规水质数据库的基础上,结合日常混凝烧杯搅拌试验及工艺投药状况与出水效果的分析,可形成初步的操作流程。

3.2 DOM 组成、分布与物化特征

不同水源水质内在特性不同,而且随着时间季节的不同,水质还会发生相应的变化。因此,必须先要了解不同水体水质的特点和变化特征,再采用相应的水处理方法和工艺,以达到最佳的水处理效果。另外,明确不同水体水质特征与其水质类型的联系,将有利于水处理操作规范的建立,便于水厂的实际运行和操作管理。近年来,本研究小组选取南、北方具有代表性的水体统一取样,进行 DOM 化学分级表征,通过 UV、DBP生成势(如三卤甲烷生成势 THMFP)等指标进行聚类分析,以探讨水质 DOM 的地域性分布特征。图 2 为水体 DOM 各化学组分的 DOC、THMFP 分布特征(W ei et al., 2008)。

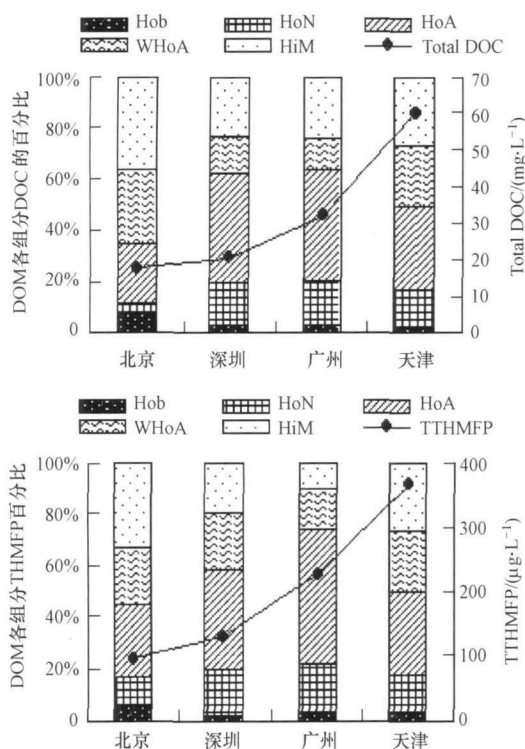


图 2 典型水体 DOM 的化学分布特征 (HoB 憎水碱, HoN 憎水中性物质, HoA 憎水酸, WHoA 弱憎水酸, HiM 亲水性物质)

Fig 2 Chemical fractionation of typical source water

由图 2 可知,水体 DOM 的化学分级特征具有一定的地域性,但不显著且受水源类型影响较大;THMFP 的生成受众多因素影响,无明显的分级规律。

分级组分的 DOC 和 UV 吸收及 SUVA 特征可用于评价、指示 DOM 的地域性特征,而有关 THMFP 的指标则不适合。不同水体 DOM 的来源是决定 DOM 内在分级特征的重要因素。外源性有机物主要是由地面径流和浅层地下水从土壤中渗沥出的有机物,因此腐殖质含量较高,从而含有较高比例的 HoA 和稳定比例的 WHoA。而内源有机物主要是来自于生长在水体中的生物群体(藻类、细菌、水生植物及大型藻类)所产生的有机物和底泥释放的有机物,因此,主体有机物性质与外源性有机物必然有不同的内在化学分级特征。另外,通过比较不同类型水体 DOM 分布特征还可以发现, HoA 含量是不同水体区别最大的特征组分,因而,其可能是对水体种类或受污染变化最为敏感性指标,有可能通过 HoA 的变化来监测或预测水体是否受到有机物的污染,并依此建立相关的早期预警系统。

4 优化混凝数据库与工艺操作规范 (Optimized coagulation data base and operation guideline)

混凝过程是集众多复杂物理、化学乃至生物反应于一体的综合过程。在既定条件下(包括诸如水溶液化学、水力学、不断形成与转化的絮体之间或碰撞或黏附或剪切等物理作用及其微界面物理化学过程等),明确原水有机物、颗粒物的混凝机制和强化去除原理的基础上,进行优化去除工艺的研究。应用前述形态表征方法和毒性检测技术对优化工艺进行综合评估,探讨针对不同水质状况的适应性与最优工艺条件(包括相应的反应器),明确絮体的形成机制、控制方式与强化工艺,以达到对水体颗粒物、有机物以及混凝过程形成颗粒物的最优去除,同时达到对絮体结构的合理控制,实现稳定高效的固液分离效果。目前的研究重点体现在以下几个方面:1)纳米絮凝剂的研制与纳米污染物的优化混凝;2)不同 AOM 组成与 DBPFP 特征对比研究;3)絮体结构、影响因素与调控;4)在线检测、分析表征与投药控制技术。

4.1 混凝剂的优化

混凝剂形态组成、物化特性是决定混凝过程高效性的关键因素之一。在系统研究混凝剂形态表征方法基础上(如絮凝剂的形态结构、粒度、电荷性能和反应活性表征),结合混凝剂水解化学过程尤其是铝(III)-铁(III)-氧化硅水解化学与形态生成转化机制的系统研究,研发新型无机高分子絮凝剂产品,以最大程度的提高其混凝性能并应对不同水质

变化特征和需求. 同时, 针对性进行高效混凝形态的分离提纯、生产工艺开发和生产示范, 这主要体现在纳米 Al_3 絮凝剂的研究与应用方面 (Wang *et al.*, 2007). 另外, 针对性开发的多功能絮凝剂系列产品 (如高铁混凝剂、含氯聚合铝等) 不仅体现出高效的混凝性能, 同时还具备一定杀藻、抑藻和消毒功能, 可以适应不同水质的要求, 简化水处理工艺流程 (Wang *et al.*, 2006; Qu *et al.*, 2007). 预制高 Al 含量的聚合铝能消除高碱度对铝盐投加后水解的影响, 可有效地使污染物脱稳, 但 Al 形成的絮体固液分离性能较差, 过量时会出现复稳. 针对原水水质特征对聚合铝进行优化, 开发出高效复合絮凝剂 HPAC, 能显著改善 Al 形成絮体的沉降性能, 有机物去除率也较工业聚合铝显著提高 (Yan *et al.*, 2006; 2007). HPAC 能充分发挥聚合铝中 Al 和 Al_3 的强电中和能力及助凝剂的吸附架桥能力, 对高碱度原水中的有机物和浊度具有较好的去除效果, 有机物去除率提高 30% 以上 (如图 3 所示). 系统集成研究表明强化混凝工艺采用 HPAC, 与预臭氧氧化、主臭氧氧化和生物活性炭工艺对颗

粒物和有机物具有较好的协同去除效果. TOC 从常规工艺的 10% ~ 15% 提高至 40% ~ 60%, THMF 去除率提高到 50% 以上, 出厂水残余铝低.

4.2 混凝过程优化与絮体调控

对于混凝过程的控制与优化, 强化水体颗粒物的相互作用和絮体结构的形成对于后续固液分离具有显著的决定意义. 要达到混凝过程的优化控制, 需要对原水的水质特征 (主要是水体颗粒物的性质与分布特征)、水体颗粒物与混凝剂的相互作用以及水力条件的影响作用加以充分的研究. 絮体结构和强度是絮凝工艺中最重要的基本参数之一, 对水处理效率有着重要影响. 而分形能较好地反映絮体的结构特征, 但由于絮体形成过程的复杂性, 要达到精确描述仍存在较大困难. 同时, 颗粒物的组成和物理化学条件均会影响絮体的结构和强度特征. 迄今为止, 已有大量关于絮体结构和强度的研究. 笔者曾对絮体的结构、强度测定方法和影响条件及工艺控制的研究进展进行了系统的论述 (Wu *et al.*, 2007).

深入了解絮体的结构形成和强度特征, 有助于针对性地采取调控措施, 改善絮体形状与处理效果. 图 4 显示了几种不同的水力条件对铝-高岭土絮体的结构、强度和粒径分布的影响特征. 从图 4 可以看出, 絮体分形维数随着剪切条件从 40 ~ 60 $r \cdot min^{-1}$ 的增加而增加. 而絮体的强度按照如下的次序排列: 逐渐增加的剪切条件所形成的絮体强度 > 60 $r \cdot min^{-1}$ 条件下形成的絮体 > 逐次递减的剪切条件所形成的絮体 > 40 $r \cdot min^{-1}$ 条件下所形成的絮体. 图 5 是最新研制的絮体分维在线分析监控系统示意图.

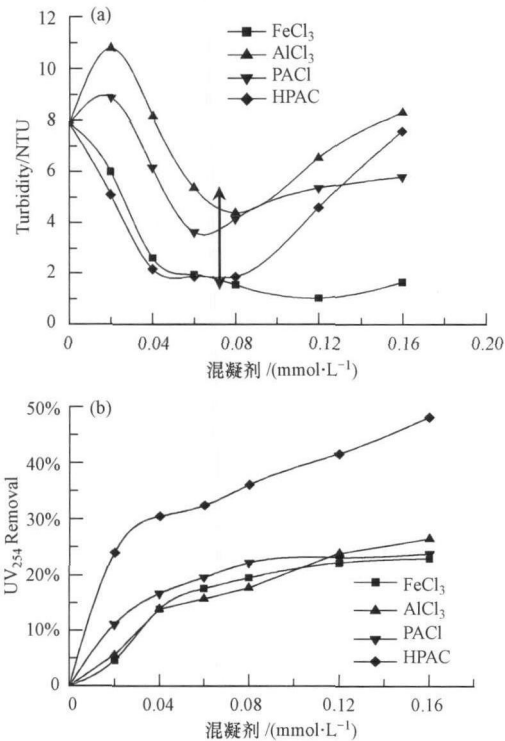


图 3 UV₂₅₄ 与浊度去除性能对比 (FeCl₃, AlCl₃, PACl 与 HPAC)

Fig 3 Comparison of UV₂₅₄ and turbidity removal by coagulants FeCl₃, AlCl₃, PACl and HPAC

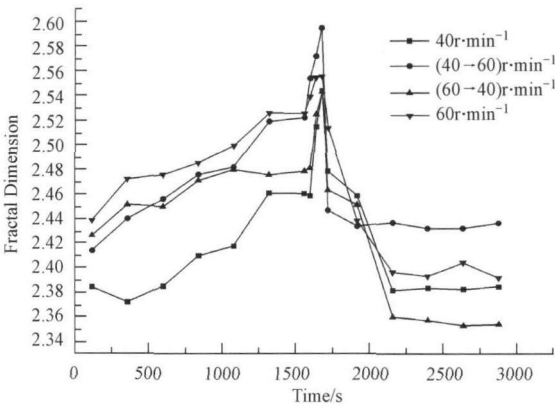


图 4 絮体分维随不同水力条件的变化特征

Fig 4 Change of fractal dimension with shear conditions

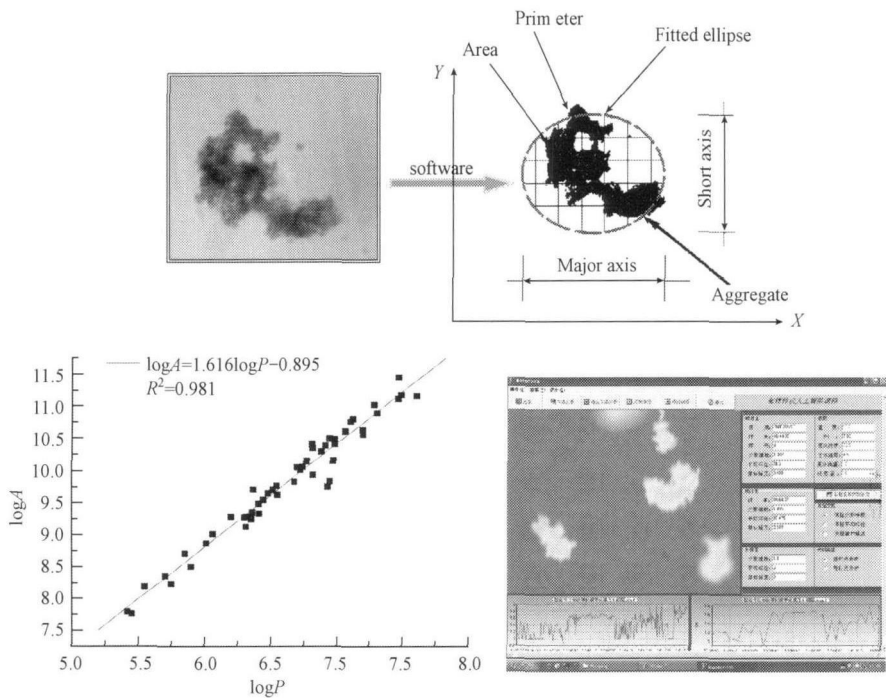


图 5 絮体分维在线分析监控系统示意图

Fig 5 Demo of in-situ floc analyzer

4 3 优化混凝水质数据库与工艺目标

优化混凝水质数据库的建立对于制定水厂混凝操作规范具有十分重要的意义. 有关水质数据库的建立工作在我国尚处于起步阶段, 如何进一步开展这方面的工作需要逐步的探索和大量人力、物力的投入. 目前的研究主要是配合基本水质数据库的建立而进行, 从水源 DBPFP 特征以及一些非常规监测指标 (如 DOM 分级、嗅味、藻类、有毒有机物、生物毒性 (um u 分析) 等) 数据的积累, 到优化混凝剂的筛选与优化反应条件 (如 pH、预氧化工艺、深度

处理等) 的确立, 最终形成优化混凝水质数据库.

首先, DBP 的控制对于我国局部地区尤其是原水中高有机物含量和受微污染较为严重的水司是非常重要的环节. 而我国目前对 DBP 的控制标准并未给予足够的重视, 所采用的若干标准均是直接引用国外的标准 (如 WHO 和美国的 DBP 饮用水标准). 值得注意的是, 我国不同区域的 DBPFP 特点与去除特性具有显著的差异, 若干受微污染较为严重水源的 DBP 去除现状甚为堪忧. 表 1 概括了若干不同区域对比研究的结果.

表 1 若干区域 THMFP 去除特征对比

Table 1 Removal of THMFP for several source waters

混凝剂	不同区域	THMFP/(μg L ⁻¹)				
		GZPW	SHHW	SJLW	DYYW	HASW
/	原水	42 25	55 74	29. 03	53 31	84 96
FeCl ₃	基线混凝	39 07	35 55	27. 59	37 35	44 01
	强化混凝	18 84	27 11	14. 89	22 73	25 98
Al ₂ (SO ₄) ₃	基线混凝	42 04	39 30	27. 51	42 22	50 83
	强化混凝	28 70	34 39	22. 20	34 19	38 12
PAC	基线混凝	42 19	49 24	26. 75	44 09	63 74
	强化混凝	34 32	47 43	24. 30	36 38	49 99

而近期的研究表明, 一些新的消毒副产物正在引起人们的关注 (如 NDMA 等), 但还未对水质指标中的溴代 DBP 给予足够的重视. 图 6 的结果表明,

不同 DOM 和氯气用量对 THM 形成与分布有显著的影响, 原水和出水的 DOC 浓度分别为 6 mg·L⁻¹ 和 3 1 mg·L⁻¹ 时, 氯气消耗则从 12 mg·L⁻¹ 降至

4. 2 mg L^{-1} (Drikas *et al.*, 2008), 虽然总的 THM 形成量从 $265\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$ 降低至 $141\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$, 但是由于原水中较高溴离子浓度 (0.4 mg L^{-1}), 以至于溴代 THM 成为其中主要的成分. 其他研究也证实了溴 / DOC 比例对 THM 形态组成分布的影响作用. 由于溴代 THM 的毒性远远高于氯代 THM, 对于卤乙酸 (HAAs) 也存在相同的可能性, 这一点对于水工业界尤其是水源中溴离子含量较高的区域具有十分重要的意义.

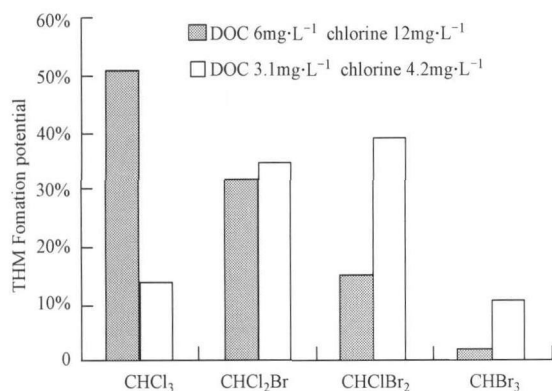


图 6 氯气用量及 DOM 对 THM 形态组成的影响

Fig. 6 Effect of Cl_2 /DOC on THM speciation

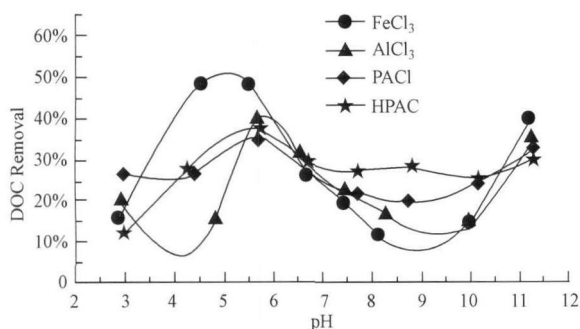


图 7 混凝剂种类以及 pH 对有机物去除的影响

Fig. 7 Effect of coagulants and pH on DOC removal

其次, 针对既定的水源进行优化混凝剂的筛选和根据季节性水质变化建立相应的混凝基本数据库是建立水厂操作规范的首要条件. 在“十五”期间, 本研究组分别以南方 (广州、深圳地区) 和北方 (北京、天津地区) 的典型水源为例, 探讨了微污染水体以及重点保护水源水质的物化特性, 对于其有机物的组成、物理化学组成分布特征、消毒副产物形成特性以及工艺去除特征进行了系统的研究. 同时, 对于不同水质特征进行了混凝剂的优化筛选, 考察了其形态组成、季节变化、作用机理与优化控

制目标之间的相互关系. 研究结果如图 7 和图 8 所示. 另外, 仅仅明确不同有机物的去除特征, 还不能保障工艺出水的安全性. 同时开展消毒副产物形成势和生物毒性的综合评估来优化微污染原水有机物的水处理过程就显得十分必要. 为了确保饮用水的安全性, 在掌握饮用水中此类微污染物质的暴露水平和毒性的基础上, 开展工艺过程去除机制与转化特征及相应毒性变化的研究尤为迫切. 以化学分析和生态毒性为指标, 重点评价原水以及混凝工艺和优化工艺处理的生态安全性, 完善优化混凝工艺处理的毒性评价方法和指标体系, 是实现优化混凝集成工艺的目标所在.

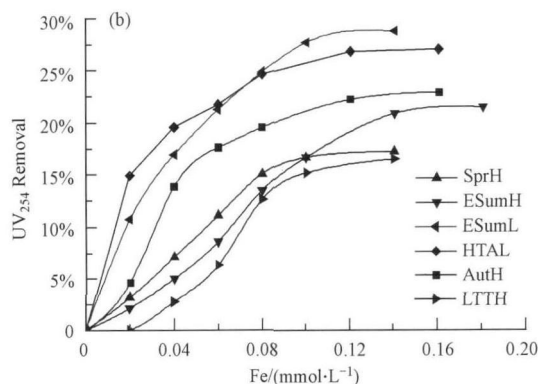
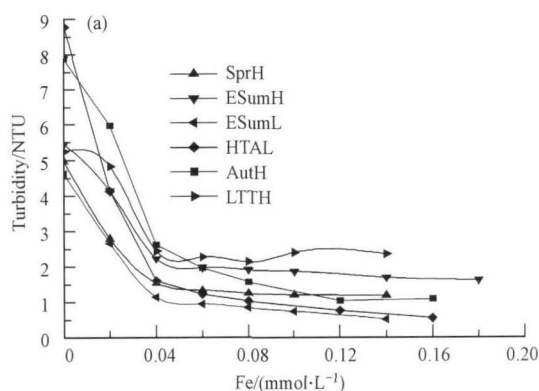


图 8 不同水质分期中 FeCl_3 去除 UV_{254} 及浊度的对比

Fig. 8 Removal of UV_{254} and turbidity by FeCl_3 in the six periods

对于既定的水质体系, 在水质特征与变化规律研究的基础上, 如何进行混凝过程的优化以及各单元技术之间的系统性优化集成, 并形成优化混凝集成技术系统, 是现代混凝技术研究中的前沿热点问题, 也是建立混凝操作规范关键环节所在. 后续研究可重点在典型水源研究的基础上, 在具有一定基础的水厂深入开展生产示范性研究, 建立有机物优化去除模型, 以期达到对实际生产过程的预测与控制. 同时有目标地选择大型水厂进行优化工艺的推

广性研究,并吸取国外相关研究的经验教训,最终形成适合我国特定地区的有机物优化混凝去除工艺和操作规范。

参考文献 (References):

- Amy G L, Collins M R, Kuo C J *et al*. 1987. Comparing gel permeation chromatography and ultrafiltration for the molecular weight characterization of aquatic organic matter [J]. *J Am Water Works Ass* 79(1): 43—49
- 周永强, Fabris R B, Drikas M, 等. 2007. 溶解性有机物的快速表征技术及其应用 [J]. *供水技术*, 1(5): 1—6
- Chow C W K, Fabris R, Drikas M, *et al*. 2007. Rapid characterization technique for DOM and its application [J]. *Water Technology*, 1(5): 1—6 (in Chinese)
- Chow C W K, Fabris R, Drikas M. 2004. A rapid fractionation technique to characterise natural organic matter for the optimisation of water treatment processes [J]. *J Water SRT-Aqua* 53(2): 85—92
- Chow C W K, Fabris R, Van Leeuwen J *et al*. 2008. Assessing natural organic matter treatability using high performance size exclusion chromatography [J]. *Environ Sci Technol* 42(17): 6683—6689
- Dentel S K. 1988. Application of the precipitation-charge neutralization model of coagulation [J]. *Environ Sci Technol* 22(7): 825—832
- Drikas M, Singer P, Chow C W K, *et al*. 2008. Disinfection by-products: an Australian view [J]. *Journal of the Australian Water Association*, 35(1): 80—85
- Edzwah J K, Tobiason J E. 1999. Enhanced Coagulation: US Requirement and A Broader View [J]. *Water Science & Technology*, 40(9): 63—70
- Her N, Amy G, Foss D, *et al*. 2002. Optimization of method for detecting and characterizing NOM by HPLC-size exclusion chromatography with UV and on-line DOC detection [J]. *Environ Sci Technol* 36(5): 1069—1076
- Hua G, Reckhow D A. 2007. Characterization of disinfection byproduct precursors based on hydrophobicity and molecular size [J]. *Environ Sci Technol* 41(9): 3309—3315
- Lartiges B S, Bottero J Y, Derrendinger L S, *et al*. 1997. Flocculation of colloidal silica with hydrolyzed aluminum: an ²⁷Al solid state NMR investigation [J]. *Langmuir* 13(2): 147—152
- Lankes U, Ludemann H D, Frimmel F H. 2008. Search for basic relationship between “Molecular Size” and “Chemical Structure” of aquatic natural organic matter: answers from ¹³C and ¹⁵N CP/MAS NMR spectroscopy [J]. *Water Research*, 42: 1051—1060
- Leenheer J A. 1981. Comprehensive approach to preparative isolation and fractionation of dissolved organic carbon from natural waters and wastewaters [J]. *Environ Sci Technol* 15(5): 578—587
- 曲久辉. 2007. 饮用水安全保障技术原理 [M]. 北京: 科学出版社
- Qu J H. 2007. Principle of safe water quality ensurment [M]. Beijing Science Press (in Chinese)
- Stenson A C. 2008. Reversed-Phase Chromatography Fractionation Tailored to Mass Spectral Characterization of Humic Substance [J]. *Environ Sci Technol* 42: 2060—2065
- Van Benschoten J, Edzwah J K. 1990. Chemical aspects of coagulation using aluminum salts: Hydrolytic reactions of aluminum and polyaluminum chloride [J]. *Wat Res* 24(12): 1519—1526
- 王东升. 2009. 微污染原水强化混凝技术 [M]. 北京: 科学出版社
- Wang D S. 2009. Enhanced coagulation technology for micro-polluted water [M]. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Wang D S, Tang H X, Gregory J. 2002. Relative importance of charge-neutralization and precipitation during coagulation with IPF-PACl: Effect of sulfate [J]. *Environ Sci Technol* 36(8): 1815—1820
- Wang D S, Sun W, Xu Y, *et al*. 2004. Speciation Stability of Inorganic Polymer Flocculant-PACl [J]. *Colloids and Surfaces* 243: 1—10
- 王东升, 刘海龙, 晏明全, 等. 2006. 强化混凝与优化混凝: 必要性、研究进展和发展方向 [J]. *环境科学学报*, 26(4): 544—551
- Wang D S, Lin H L, Yan M Q, *et al*. 2006. Enhanced coagulation VS optimized coagulation: A critical review [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(4): 544—551 (in Chinese)
- Wang D S, Wu X H, Huang L, *et al*. 2007. In nan-organic polymer flocculation: from theory to practice [A]. // H. H. Hahn, E. H., H. Odegaard, Ed. *Chemical Water and Wastewater Treatment IX* [C]. IWA, 181—188
- 魏群山, 王东升, 余剑锋, 等. 2006. 水体溶解性有机物的化学分级表征: 原理和方法 [J]. *环境污染治理技术和设备*, 7(10): 17—21
- Wei Q S, Wang D S, Yu J F, *et al*. 2006. Chemical fractionation characterization of AOM: Principle and methods [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control* 7(10): 17—21 (in Chinese)
- Wei Q S, Wang D S, Wei Q, *et al*. 2008. Size and resin fractionations of DOM and THM precursors from four typical source waters in China [J]. *Environ Monit Assess* 141: 347—357
- 武若冰, 王东升, 李涛. 2008. 絮体性能及其工艺调控的研究与进展 [J]. *环境科学学报*, 28(4): 593—598
- Wu R B, Wang D S, Li T. 2008. A critical review on flocculation strength and process control [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 28(4): 593—598 (in Chinese)
- WHO. 1996. Guidelines for Drinking Water Quality, 2nd edition [M]. Geneva, Switzerland: World Health Organization
- Yan M Q, Wang D S, You S J, *et al*. 2006. Enhanced coagulation in a typical north-china water plant [J]. *Water Res* 40(19): 3621—3627
- Yan M Q, Wang D S, Qu J H, *et al*. 2007. Relative importance of hydrolyzed Al(III) species (Al_a, Al_b and Al_c) during coagulation with polyaluminum chloride [J]. *J Colloid Interf Sci* 316(2): 482—489