


## “水体污染控制与治理”科技重大专项成果专栏

楚文海, 杨旭, 周子翀, 等. 形成针对太湖流域三类水源的综合解决方案实现典型和新型污染物的协同控制[J]. 净水技术, 2021, 40(4):6-11,84.

CHU W H, YANG X, ZHOU Z C, et al. Comprehensive solutions for three types of water sources in the Taihu Lake Basin based on the water quality characteristics: Realizing the integrated control of typical and emerging pollutants[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(4):6-11,84.  扫我试试?

## 形成针对太湖流域三类水源的综合解决方案实现典型和新型污染物的协同控制

楚文海, 杨旭, 周子翀, 张瑞华, 肖融, 尹大强\*

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要** 太湖流域是我国典型的水质缺水型地区, 饮用水安全保障工作面临较大挑战。“十三五”水专项“太湖流域饮用水安全保障工程技术与综合管理技术集成研究”课题梳理了太湖流域饮用水专项实施以来的课题及关键技术, 针对太湖流域水源水质特征和区域供水特征, 通过水源水质评估、关键技术遴选、工艺协同优化和示范工程验证, 形成了针对太湖流域三类典型水源水质特征的综合解决方案, 实现了典型和新型污染物的协同控制, 以为太湖流域饮用水安全保障提供技术支撑, 为国家饮用水安全保障战略实施提供可借鉴的方案。

**关键词** 太湖流域 三类水源 综合解决方案 协同控制

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2021)04-0006-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2021.04.002

### Comprehensive Solutions for Three Types of Water Sources in Taihu Lake Basin Based on the Water Quality Characteristics: Realizing the Integrated Control of Typical and Emerging Pollutants

CHU Wenhai, YANG Xu, ZHOU Zichong, ZHANG Ruihua, XIAO Rong, YIN Daqiang\*

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** Taihu Lake Basin is a typical water-deficient area in China, and the safety of drinking water is facing great challenges. The “Taihu Lake Basin Drinking Water Safety Assurance Engineering Technology and Integrated Management Technology Integration Research” project which belongs to “13th Five-Year” Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment, it has sorted out the projects and key technologies since the implementation of the Taihu Lake Basin drinking water projects of Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment. Comprehensive solutions for the three types of source water in the Taihu Lake Basin based on the characteristics of source water quality and regional water supply in the Taihu Lake Basin has been proposed, using source water quality assessment, key technology selection, process collaborative optimization and demonstration project verification, which has realized the integrated control of typical and emerging pollutants. The comprehensive solutions could provide

[收稿日期] 2021-3-16

[基金项目] 国家科技重大专项课题(2017ZX07201005)

[作者简介] 楚文海(1983—), 男, 教授, 从事水质风险识别与控制研究, E-mail: feedwater@126.com。

[通信作者] 尹大强, 男, 教授, 从事水质安全保障理论与技术研究, E-mail: yindq@tongji.edu.cn。

technical support for the safety of drinking water in the Taihu Lake Basin, and could be used for reference for the implementation of the national drinking water safety protection strategy.

**Keywords** Taihu Lake Basin three types of water sources comprehensive solutions integrated control

饮用水是人类生存的基本需求。饮用水安全问题直接关系到广大人民群众的健康<sup>[1]</sup>。太湖流域地跨江、浙、沪两省一市,处长三角核心区域,是我国经济最发达、人口密度最大和城镇化进程最快的地区之一,也是全国水污染最严重的地区之一。水专项实施前,由于水源污染严重、水厂处理工艺落后、水厂运行管理水平粗放,导致供水单位无法应对新的生活饮用水卫生标准,严重影响流域内广大人民群众的生活饮用水卫生安全<sup>[2]</sup>。党中央、国务院高度重视太湖流域水环境综合治理工作。为确保本流域饮用水水质安全,水专项饮用水主题在“十一五”与“十三五”期间,均将太湖作为重点流域开展相关研究和工程示范,为本区域饮用水水质的提升和保障提供有效的科技支撑。

## 1 水专项太湖课题简介

“十一五”期间,依托“长江下游地区饮用水安全保障技术集成与综合示范”项目,在国家 and 地方政府的大力支持和统筹下,由同济大学牵头,与国内多所高校、科研院所和多家大型水务企业联合承担了“区域饮用水源优化配置与水质改善技术集成与示范”、“高藻、高有机物湖泊型原水处理技术集成与示范”、“高氨氮和高有机物污染河网原水的组合处理技术集成与示范”、“微污染江河原水高效净化关键技术与示范”、“饮用水区域安全输配技术与示范”和“饮用水安全区域联动应急技术研究与示范”共6个课题。课题针对太湖流域三类饮用水源的水质污染特征和区域供水特征,研发了水源生物-生态修复技术、预氧化-生物预处理技术、臭氧活性炭-超滤膜深度处理技术等一批单项技术,初步形成了高藻太湖原水饮用水水质净化、高氨氮高有机物河网水源生物-生态修复与水厂处理、微污染黄浦江原水饮用水安全保障等集成技术,通过技术综合示范,示范工程出厂水质达到国家《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)要求。

“十二五”期间,依托“太湖流域地区饮用水安全保障技术集成与综合示范”项目,在国家 and 地方政府的大力支持和统筹下,由同济大学牵头,与国内多所高校、科研院所和多家大型水务企业联合承担

了“江苏太湖水源饮用水安全保障技术集成与综合示范”、“太湖流域上海饮用水安全保障技术集成与示范”、“浙江太湖河网地区饮用水安全保障技术集成与示范”和“太湖流域地区饮用水安全保障管理技术与综合集成”共4个课题。在“十一五”基础上,进一步研发适合于高藻高有机物湖泊型原水、高嗅味高有机物江河型原水和高氨氮高有机物河网原水的“从源头到龙头”的饮用水安全保障系列技术,在无锡、苏州、宜兴、吴江、嘉兴和上海等环太湖重点城市开展综合示范,建设湖泊型、河网型和江河型三类水源龙头水质稳定达标示范区。示范区共400万人口龙头水质满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)要求,初步形成了太湖流域饮用水安全保障技术体系。

“十三五”期间,依照国家水专项实施方案、十三五实施计划和年度项目指南的要求,结合水十条的实施,在太湖流域设置了“太湖流域饮用水安全保障技术集成与综合管理”项目,共包括5个课题,分别在苏州(“苏州市饮用水安全保障技术集成与综合应用示范”)、常州(“常州市太湖流域水源饮用水安全保障技术与应用示范”)、湖州(“湖州南太湖水源供水区饮用水安全保障综合应用示范”)、嘉兴(“嘉兴市城乡一体化安全供水保障技术集成与综合示范”)设置4个技术工程示范类课题,以及1个集成课题(“太湖流域饮用水安全保障工程技术与综合管理技术集成研究课题”),即本课题。本课题的主要目标之一是在“十一五”和“十二五”基础上,结合“十三五”太湖流域饮用水安全保障其他课题的研究,梳理与评估太湖流域饮用水专项实施以来的关键技术与成果,形成针对太湖流域湖泊型、河网型和江河型等三类水源水质特征的综合解决方案。

## 2 太湖流域三类水源水质问题

太湖流域是我国城镇密集、区域城市化水平较高的地区。改革开放以来,随着该区域经济的快速发展和人口的高度集聚,流域污染负荷不断增加,各种已知和未知的、人工和天然的、传统和新型的、原

生和次生的污染物进入环境水体,加剧了水源污染,水质相对较差,复合污染、突发污染、跨界污染等问题较为突出,该地区饮用水安全保障工作面临较大挑战<sup>[3-6]</sup>。

太湖流域河网稠密,水量充沛,有湖泊、河网和江河三类典型水源,具有各自不同的水质特征。以苏南苏锡吴为代表的湖泊型水源太湖具有高藻的水质特征,太湖原水藻类年平均 $>1\ 000$ 万个/L,高藻期为每年的7月—8月,达到 $2\ 000$ 万~ $8\ 000$ 万个/L。由于藻类高,其浑浊度和pH相对也高,藻源性次生代谢产物多,有机物以溶解性小分子量为主,藻源性臭味物质多,含氮消毒副产物生成潜力大。以浙北杭嘉湖为代表的河网水源具有高氨氮的水质特征,嘉兴地区原水的水质氨氮月平均值高达 $1\ \text{mg/L}$ 以上,随季节变化较大,一般夏季氨氮浓度较低,冬季氨氮浓度较高。以上海为代表的长江、黄浦江等江河型水源具有微污染的水质特征,水源水中莠去津、丁草胺、乙草胺、乐果和毒死蜱等农药检出总浓度最高可达到 $1.060\ \mu\text{g/L}$ ,林可霉素、甲氧苄啶、磺胺、磺胺嘧啶、磺胺二甲嘧啶等抗生素频繁检出。

如图1所示,太湖流域是典型的水质缺水型地区,高藻湖泊型、高氨氮河网型、微污染江河型三类水源中也存在复合污染的共性水质问题,如有机物和溴离子浓度均较高,溴代副产物不容忽视,包括臭

氧处理后的溴酸盐,以及氯(胺)消毒后的溴代消毒副产物等。此外三类水源中广泛存在的内源性臭味物质(如2-甲基异莰醇等藻源类臭味物质)、外源性臭味物质(如二甲基二硫醚等硫醚类臭味物质)也不容忽视。



图1 太湖流域三类水源及水质特征

Fig. 1 Three Types of Water Sources in the Taihu Lake Basin and Corresponding Water Quality Characteristics

### 3 针对太湖流域三类水源的综合解决方案

如图2所示,针对太湖流域三类水源有机物、溴离子浓度水平高、臭味问题突出的共性水质问题,在充分发挥饮用水厂常规工艺效能的基础上,增加预处理和深度处理工艺,以提升水厂对共性复合污染问题的解决能力。针对水源高藻、高氨氮、微污染物的特性水质问题,需通过优化强化从水源至水厂各工艺环节。当水源污染负荷过高(例如季节性污染

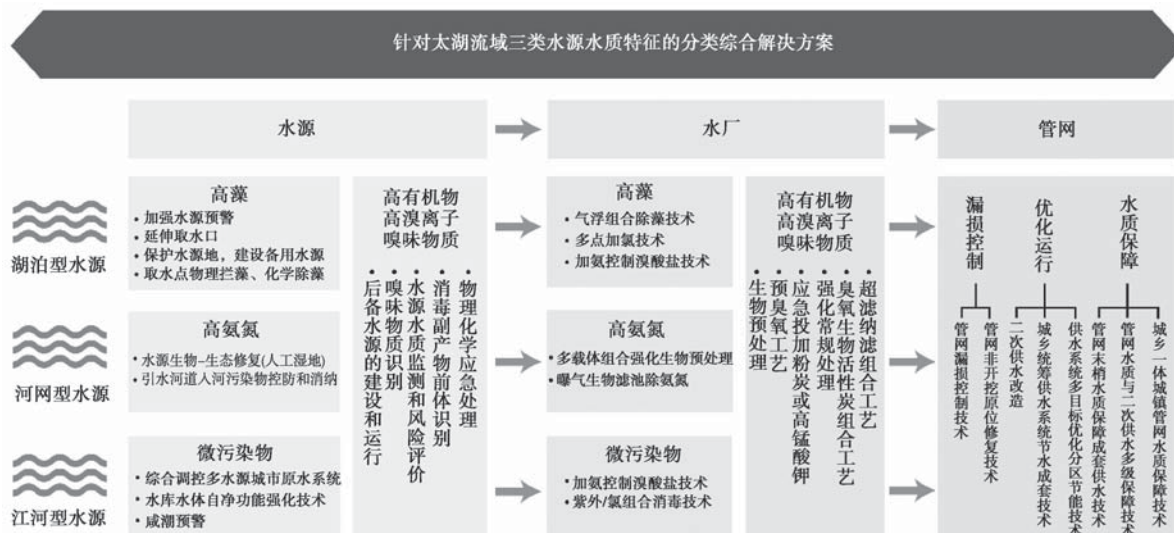


图2 针对太湖流域三类水源水质特征的综合解决方案

Fig. 2 Comprehensive Solutions for Three Types of Water Sources in the Taihu Lake Basin Based on Water Quality Characteristics



或突发性污染)且通过现有水厂工艺无法应对时,可考虑切换水源以保障饮用水供水安全。当水源水质良好时,使用常规工艺即可满足出厂水水质达标。

### 3.1 以臭氧-活性炭为核心的多级屏障综合解决方案

针对太湖流域三类水源有机物、溴离子浓度水平高、嗅味问题突出的共性水质问题,系统梳理了后备水源的建设和运行、嗅味物质识别、物理化学应急投加、水源水质监测和水质风险评价、消毒副产物前体物识别、水厂生物预处理、预臭氧、应急

投加粉末活性炭或高锰酸钾、强化常规、臭氧-生物活性炭组合工艺、管网漏损识别、非开挖原位修复、多级优化加氯、综合水龄控制、二次供水消毒等从源头到龙头全过程保障系列关键技术。提出了“水源预处理与水厂处理工艺协同、水厂处理出水与龙头水质保障协同、污染物协同处理与控制”的原理,形成了“基于太湖流域三类水源水质特征以臭氧-活性炭深度处理为核心的多级屏障集成技术”(图3),实现源头到龙头协同控制和系统保障,提高供水水质和品质。

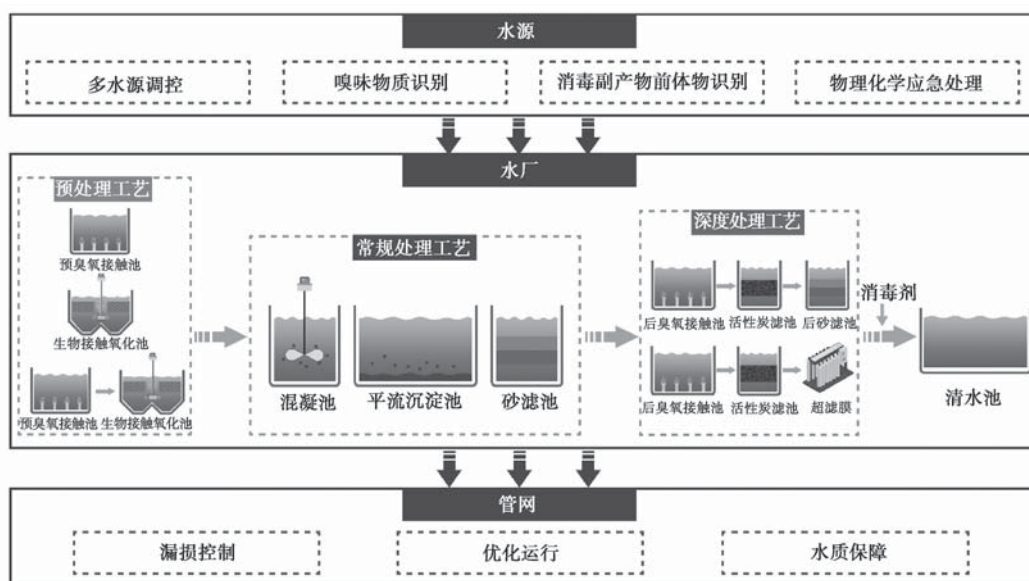


图3 以臭氧-活性炭为核心的多级屏障综合解决方案的工艺流程图

Fig. 3 Process Flow Diagram of the Multi-Level Barrier Comprehensive Solution with Ozone-Activated Carbon-Oriented Process

### 3.2 以双膜法为核心的综合解决方案

针对太湖流域三类水源有机物、溴离子浓度水平高、嗅味问题突出的共性水质问题,可以采用超滤+纳滤工艺以达到优质供水目标,以超滤为核心、用超滤工艺替代传统工艺中的过滤工艺,从而实现水质的提升,成为饮用水处理中的一种重要应用形式(图4)。膜处理可以减少混凝剂和消毒剂的使用,从而降低化学药剂对水质的污染和消毒副产物的生成量。水专项任务承担单位开展了“浸没式超滤+超低压选择性纳滤”工程示范,浸没式超滤去除水中的浑浊度、两虫、细菌、病毒及藻类,保证后续纳滤系统对水质的要求,超低压选择性纳滤膜系统主要去除原水中的总有机碳、氨氮及其他有机物和有毒副产物,出水水质满足《生活饮用水卫生标准》

(GB 5749—2006)和江苏省饮用水水质标准(DB32/T 3701—2019)提标要求。

## 4 典型和新型污染物的协同控制技术——以消毒副产物为例

水专项实施以来,随着臭氧-生物活性炭深度处理工艺的不断推广应用,饮用水消毒副产物综合控制技术的应用规模日趋壮大<sup>[7]</sup>。在无锡、苏州、吴江等城市以太湖水为水源的13座水厂(470万m<sup>3</sup>/d)及其供水区域进行综合示范,整体提升了太湖流域饮用水安全保障水平,在基本消除了饮用水藻类、嗅味物质等广大群众反映强烈的水质问题的基础上,还有效解决了出厂水中含碳、含氮消毒副产物浓度水平波动的问题,有力支撑了太湖流域饮用水安全保障能力的整体提升。

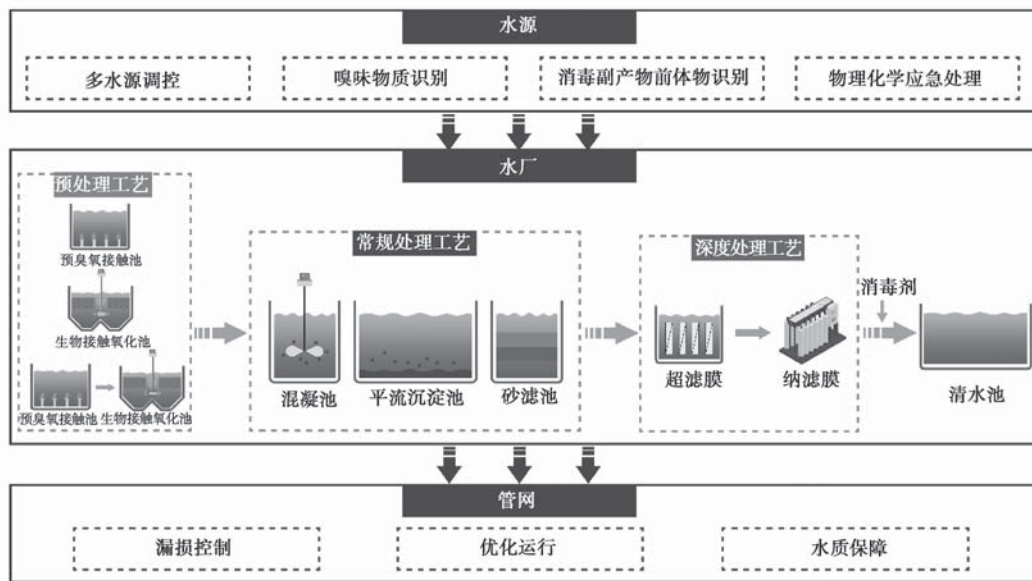


图4 以双膜法为核心的综合解决方案工艺流程图

Fig. 4 Process Flow Diagram of Comprehensive Solution with Double Membrane Method-Oriented

#### 4.1 技术应用与成效

锡东水厂位于江苏省无锡市太湖国际科技园区,水厂原水取自太湖贡湖湾,属于典型的高藻、高有机物湖泊型水源,原水常年存在藻类较高的问题,且季节性特征明显。锡东水厂是在水专项技术支持下在太湖流域建成并投产的第一座基于臭氧-生物活性炭深度处理工艺的大型净水厂,在形成了一套以臭氧-生物活性炭深度处理技术为核心的饮用水安全保障技术的基础上,该水厂二期扩建工程还打破了在出厂前一次投氯消毒的传统观念,首次引入了基于多点加氯的消毒副产物控制技术。

在对锡东水厂出厂水进行消毒副产物检测时,利用开发出的含碳和含氮消毒副产物的定量检测和潜能测定技术,识别出酰胺类、乙腈类、亚硝胺等高风险消毒副产物,有力地支撑了相关规范标准的制定,并为饮用水消毒副产物的综合控制技术奠定了基础。水专项成果显示,示范工程锡东水厂在实现了藻类、嗅味物质、致病微生物等指标的有效控制基础上,还削减了出厂水中典型及新型含碳、含氮消毒副产物浓度水平(图5),出厂水水质优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5649—2006),有力保障了市政供水的安全可靠性。

饮用水消毒副产物综合控制技术在其他水厂的实际运行情况也表明,在出厂水各项水质指标均可

满足国家标准要求的基础上,对消毒副产物的控制效果也十分稳定。对于含碳消毒副产物而言,4种三卤甲烷的浓度水平基本控制在 $20\ \mu\text{g/L}$ 左右,远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中三卤甲烷类限值,2种卤乙酸的总浓度水平基本控制在 $8\ \mu\text{g/L}$ 以下,三氯乙醛的浓度水平稳定在 $2\ \mu\text{g/L}$ 以下。对于含氮消毒副产物而言,卤乙腈、卤代乙酰胺和卤代硝基甲烷均没有超过 $3\ \mu\text{g/L}$ 。基于臭氧-生物活性炭的全流程消毒副产物控制技术和基于多点加氯的消毒副产物控制技术的联合使用,一方面降低了水厂消毒剂的用量(水厂氯耗可降低20%左右),另一方面在确保出厂水生物安全性的同时,还有效降低了含碳、含氮消毒副产物的浓度水平,为我国城镇水厂的新建和老旧水厂的改造提供了有力支撑。

#### 4.2 技术推广与标准支撑

水专项消毒副产物控制技术成果在长三角地区供水系统得到较好的示范应用,同时也在向其他区域推广。此外,为规范消毒副产物综合控制技术在市政给水领域的合理应用,依托水专项研究成果,结合太湖流域出厂水消毒副产物的浓度水平调查以及国内外现有饮用水水质标准对照研究,以消毒副产物的检出率、浓度水平、水厂处理效果、对其优先控制的必要性和可行性等因素作为评价指标,课题成

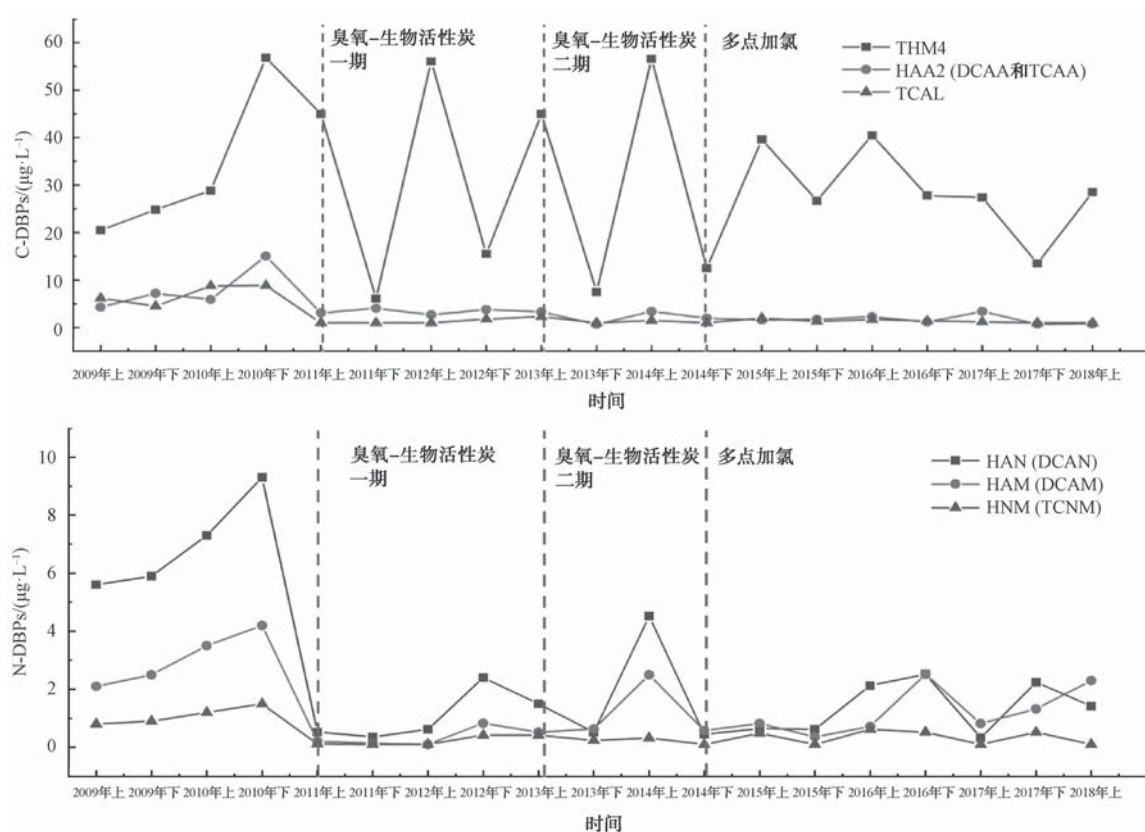


图5 2009年—2018年锡东水厂出厂水含碳、含氮消毒副产物浓度变化情况

Fig. 5 Changes in the Concentration of Carbonaceous and Nitrogenous DBPs in the Finished Water of Xidong WTP during 2009—2018

果支撑了上海净水技术学会团体标准《饮用水中N-二甲基亚硝胺、二氯乙腈、二溴乙腈水质标准》(T/SAWP 0001—2020)、我国首部省级内控标准《江苏省城市自来水厂关键水质指标内控标准》(DB32/T 3701—2019)、我国首部地方饮用水标准《上海市生活饮用水水质标准》(DB31/T 1091—2018)以及我国首部饮用水含氮消毒副产物分析技术标准上海市地标《饮用水中N-二甲基亚硝胺测定液相色谱-串联质谱法》(DB31/T 1215—2020)等一系列标准规范的颁布和实施。

### 5 课题标志性成效

本课题形成了针对太湖流域三种类型水源水质特征的综合解决方案,通过示范推广应用,全面提升了流域饮用水水质和安全保障能力,有力地支撑太湖流域污染防治规划和地方饮用水目标的实现。针对太湖流域三类水源的综合解决方案达到的成效包括:(1)有效解决了太湖水源饮用水长期存在的高藻、藻臭味、消毒副产物等水质问题,

彻底消除太湖藻类暴发的供水危机;(2)攻克了高氨氮冬季处理效率差的技术瓶颈,解决了高氨氮高有机物河网水源饮用水稳定达标难题;(3)基本消除了上海黄浦江水源饮用水臭味,提升超大城市国际形象。

### 参考文献

[1] 邵益生. 关于我国城市水安全问题的战略思考[J]. 给水排水, 2014, 50(9): 1-3.

[2] 于建伟, 李宗来, 曹楠, 等. 无锡市饮用水臭味突发事件致嗅原因及潜在问题分析[J]. 环境科学学报, 2007(11): 1771-1777.

[3] 赵婉婷, 黄智峰, 郭雪萍, 等. 太湖周边饮用水处理厂中抗生素抗性基因污染分布特征[J]. 环境化学, 2020, 39(12): 3271-3278.

[4] 郭庆园, 王春苗, 于建伟, 等. 饮用水中典型嗅味问题及其研究进展[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 82-88.

[5] 杨蕴秀, 李攀, 于水利, 等. 东太湖原水臭氧氧化过程中溴酸盐及溴代有机消毒副产物的控制[J]. 净水技术, 2017, 36(6): 16-21, 29.

(下转第84页)



置,因而,本 BP 神经网络预测模型仅针对预臭氧工艺。后续若条件允许,将进行基于 BP 神经网络的后臭氧投加量的预测,进一步完善水厂臭氧投加量自动化控制系统。

### 3 结论

(1)根据相关性分析,进水流量与臭氧投加量呈负相关,进水浑浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、DOC、 $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与臭氧投加量呈正相关,其中  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、DOC、 $\text{UV}_{254}$  的相关系数更大。

(2)运用 BP 神经网络建立出水水质系统预测模型和臭氧投加量预测模型,通过输入臭氧投加量和进水水质参数,可以预测出水水质情况,也可通过输入进水水质参数和预期出水参数来预测臭氧投加量。在给定的工艺参数条件下,都有着较高的预测精度,相关系数和均方误差较好,说明该模型具有良好的泛化能力,能满足水处理预测的实际要求,对在线控制有指导意义。

(3)将来可应用臭氧投加量预测模型建立臭氧投加控制系统,为臭氧—活性炭深度处理运行的自动化控制提出了新的理论思路。

### 参考文献

- [1] 强志民,陆晓巍,张涛. 饮用水臭氧氧化处理过程中溴酸根的产生及控制[J]. 环境工程学报, 2011, 5(8): 1689-1695.
- [2] 段蕾,高乃云,隋铭皓. 基于人工神经网络的  $\text{O}_3\text{-BAC}$  出水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  预测与结构分析[J]. 给水排水, 2009, 45(s1): 436-439.
- [3] 陆超,张峻,赵俊. 基于神经网络的污水处理厂水质预测模型[J]. 净水技术, 2013, 32(4): 100-105.
- [4] 刘圣誉,李彭,何义亮,等. 基于人工神经网络的反硝化滤池外碳源投加控制[J]. 中国给水排水, 2020, 36(7): 19-25.
- [5] 王冬生,周杏鹏. 净水厂臭氧自动投加控制系统的设计与实现[J]. 给水排水, 2010, 46(9): 108-111.
- [6] GAGNON C, GRANDJEAN B P A, THIBAUT J. Modelling of coagulant dosage in a water treatment plant[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1997, 11(4): 401-404.
- [7] 方荣业,史宇滨,蒋婷,等. 基于 BP 神经网络的城镇污水厂活性炭自动投加系统研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2018, 45(4): 468-475.
- [8] EDWARDS M, BENJAMIN M M. Transformation of NOM by ozone and its effect on iron and aluminum solubility[J]. Journal American Water Works Association, 1992(6): 56-66.
- (上接第 11 页)
- [6] 杨舒,吴梦怡,王慕,等. 太湖某饮用水厂臭味物质迁移特征解析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 57-63.
- [7] 高乃云,马艳,楚文海,等. 高藻和高有机物湖泊型原水处理技术集成与示范[J]. 给水排水, 2013, 49(3): 13-16.

**【项目团队介绍】**同济大学环境科学与工程学院是全国高等院校中最早以学院建制成立的环境教育和科研学术机构,其前身是 1952 年成立的上下水道系及 1981 年成立的环境工程系。学院现设有市政工程系、环境工程系、环境科学系 3 个系,拥有污染控制与资源化研究国家重点实验室、城市污染控制国家工程研究中心、环境科学与工程国家级实验教学示范中心、长江水环境教育部重点实验室、联合国环境规划署-同济大学环境与可持续发展学院等国内最为完善的科研平台。

尹大强,同济大学环境科学与工程学院教授、博士生导师,长江水环境教育部重点实验室主任,上海领军人才,宝钢优秀教师奖获得者,兼任国家“水污染控制与治理”科技重大专项饮用水主题专家组成员、中国环境学会 POPs 专业委员会委员。

楚文海,同济大学环境科学与工程学院教授、博士生导师,兼任国际水协消毒专委会秘书长,主持国家优秀青年科学基金、国家科技重大专项独立课题等,入选国家环境保护专业技术青年拔尖人才、上海市青年拔尖人才等。