

给水深度处理 技术原理与工程案例

中国土木工程学会水工业分会给水深度处理研究会 组织编写

中国建筑工业出版社

给水深度处理技术原理与工程案例

中国土木工程学会水工业分会
给水深度处理研究会 组织编写



中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

给水深度处理技术原理与工程案例/中国土木工程学会水工业分会给水深度处理研究会组织编写. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 7

ISBN 978-7-112-15528-6

I. ①给… II. ①中… III. ①给水处理-研究 IV. ①TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 131704 号

中国土木工程学会水工业分会给水深度处理研究会为纪念成立 25 周年组织编写了本书。全书回顾了给水深度处理研究会的成立及活动; 论述了生物预处理、臭氧-生物活性炭处理、给水膜处理等给水深度处理技术在我国的发展; 编撰了在《给水排水》、《中国给水排水》、《净水技术》上发表的给水深度处理论文题目及作者。本书还在调查基础上较全面地介绍了全国已建和在建的深度处理工程, 并对其中 25 个较典型的工程实例作了详细的介绍。全书内容丰富、资料翔实、信息权威、可读性与纪念性强, 可供城乡供水企业、大专院校、科研单位技术人员参考、借鉴。

责任编辑: 于 莉 田启铭

责任设计: 董建平

责任校对: 张 颖 刘 钰

给水深度处理技术原理与工程案例

中国土木工程学会水工业分会

给水深度处理研究会 组织编写

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21½ 字数: 540 千字

2013 年 7 月第一版 2013 年 7 月第一次印刷

定价: 69.00 元

ISBN 978-7-112-15528-6

(24103)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

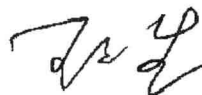
(邮政编码 100037)

序

自 1987 年中国土木工程学会给水委员会深度处理研究会成立至今已经 25 周年。25 年来，我国给水深度处理技术取得了较大发展，目前全国自来水厂臭氧—生物活性炭深度处理工艺的总处理能力已经约 2000 万 m^3/d ，为提高我国饮用水水质，保障饮用水满足国家水质标准的要求作出了贡献。我国给水深度处理的研究始于 20 世纪 80 年代初，在前辈学者陶葆楷教授等人的支持下进行了臭氧发生器的研制，其后清华大学等单位一直持续开展相关的研究工作。为开展深度处理的学术交流，1986 年在贵阳召开的土木工程学会给水排水分会给水委员会上决定成立给水深度处理研究会，1987 年在北京昌平区马池口召开了给水深度处理研究会成立大会，除 1989 年因特殊原因停开外，从那以后每两年召开一次学术交流会议。2000 年以后随着供水行业对深度处理技术需求的显著增加，为顺应形势，深度处理技术交流会也改成一年一次，参会人数也从上个世纪每次会议几十人上升到二百余人。改革开放以来，我国经济社会发生了翻天覆地的变化，但水源水质却受到严重污染，对饮用水水质的安全造成危害。2006 年颁布的《生活饮用水卫生标准》GB 5749—2006 对提升我国饮用水水质有很大指导和促进作用。行业内多位专家曾对我国给水工艺升级和改造的技术路线做过不同的探索，但实践证明臭氧—生物活性炭目前是行之有效的技术，特别在我国的长三角地区、珠三角地区、京津地区、黄河中下游地区，一大批取用江、河、湖泊、水库作水源的城市饮用水水质通过实施臭氧—生物炭深度处理工程得到了明显改善。在水源较严重污染条件下，通过水厂强化常规处理并增加深度处理工程，可以保证出厂水达到标准要求。这就是我们称之为“嘉兴模式”。

为了系统总结现有深度处理工程研究、设计和运行情况，2012 年 10 月在江苏淮安举行的深度处理年会期间，部分理事和专家提出编写一本专著，并由洪觉民先生主编。经过大家的共同努力，这本书在极短的时间内得以完成出版，希望本书对推动我国给水深度处理事业的发展有所裨益。

给水深度处理研究会理事长 清华大学教授



前 言

1988年中国土木工程学会给水委员会深度处理研究会（以下简称“研究会”）成立时，我国给水深度处理研究还刚刚起步。25年来，随着经济建设的大发展，给水深度处理事业从无到有，从少到多，从小型试验到水厂建设取得了令人瞩目的成就。试想，如果给水深度处理的工艺、技术、设备没有及时跟上，在水环境质量又远远没有改善的情况下，我国的长三角地区、珠三角地区、京津地区、黄河中下游地区，一大批取用江河湖泊作水源的城市饮用水质量如何得到保障，新的国家生活饮用水卫生标准如何实施。可以毫不夸张地说，正是由于这些地区的一些水厂在常规处理基础上增设了预处理与深度处理设施，从而使供水水质达到了国家标准，这是我国饮用水处理技术的历史性突破，也标志着我国饮用水处理技术达到了国际先进水平。不可否认也毋庸多言，在我国城市给水深度处理技术发展和实践中，研究会的贡献功不可没。回首往事，思绪万千。2012年10月在江苏淮安举行的深度处理年会期间，大多数理事都认为应该好好总结回顾一下给水深度处理技术发展与实践的难忘经历以纪念研究会成立25周年。

本书共分4章。第1章“中国给水深度处理技术发展回顾”中1.1节“给水深度处理技术及研究会发展历程”由清华大学环境学院组织撰写。清华大学环境学院是研究会理事长单位。25年来，研究会在其主持下始终不渝地坚持创新，坚持研究与实践紧密结合，活动有声有色，得到了同行们的一致赞誉；1.2节“给水深度处理技术在我国的发展”分为三个部分，其中1.2.1节“生物预处理技术发展”由同济大学高乃云教授组织上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司许嘉炯等人撰写。在生物预处理技术的研究与发展方面，上海同济大学许建华教授、高乃云教授，清华大学王占生教授、刘文君教授及上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司和北京市政工程设计研究总院等都作出了重要贡献；1.2.2节“臭氧—生物活性炭处理技术的发展”由王占生、刘文君、刘建广教授执笔。可以说，30余年来，王占生教授几乎以毕生的精力为我国推广和应用给水深度处理技术孜孜不倦、呕心沥血，作出了杰出贡献；1.2.3节“给水膜处理技术发展”由上海市政工程设计研究院（集团）有限公司沈裘昌总工程师执笔。我国给水膜处理技术的推广和应用时间虽短，但发展极为迅速。哈尔滨工业大学李圭白教授以及上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司和北京市政工程设计研究总院等都作出了重大贡献。第2章“给水深度处理技术在全国主要给排水刊物上发表的论文目录”，汇集了《给水排水》、《中国给水排水》、《净水技术》上发表的生物预处理、臭氧—生物活性炭、膜处理等共772篇论文的

题目、作者和期刊位置，基本上涵盖了近 30 年来我国深度处理技术发展的主要成果，读者可以从不同的渠道搜集其全文。第 3 章“全国已建和在建的深度处理工程调查汇总”，提供了全国主要已建、在建水厂共 94 个深度处理工程（日供水能力达 2087 万 m^3/d 其中已建成的 1323 万 m^3/d ）的主要信息。第 4 章“深度处理典型工程”是本书的重点，主要由北京市政工程设计研究总院郗燕秋总工和上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司沈裘昌总工等人组织撰写（各个工程的供稿人都已列在文章的后面），内容主要是每个工程概况、工艺流程、设计参数、工程内容和生产运行及投资等。本书在编撰过程中得到了中国给水排水协会常务副秘书长刘志琪和王晖同志及各省市有关水协的大力支持和协助，得到了《给水排水》、《净水技术》编辑部的大力支持和帮助，岳舜琳、陆坤明等老同志一直在关心和帮助本书的编撰，在此一并感谢。全书由洪觉民、朱建文统稿，王占生、刘文君主审。由于时间仓促，资料收集不全，错误与存在问题全由主编负责，欢迎广大读者批评指正。



2013 年 4 月 20 日

目 录

第 1 章 中国给水深度处理技术发展及回顾	1
1.1 给水深度处理技术及研究会发展历程	1
1.2 给水深度处理技术在我国的的发展	3
1.2.1 生物预处理技术发展	3
1.2.2 臭氧—生物活性炭处理技术的发展	8
1.2.3 给水膜处理技术发展	34
第 2 章 给水深度处理技术在全国主要给排水刊物上发表的论文目录	49
2.1 预处理（175 篇）	49
2.1.1 在《给水排水》上发表的论文及作者目录（97 篇）	49
2.1.2 在《中国给水排水》上发表的论文及作者目录（74 篇）	52
2.1.3 在《净水技术》上发表的论文及作者目录（4 篇）	54
2.2 臭氧—生物活性炭（309 篇）	55
2.2.1 在《给水排水》上发表的论文及作者目录（153 篇）	55
2.2.2 在《中国给水排水》上发表的论文及作者目录（134 篇）	58
2.2.3 在《净水技术》上发表的论文及作者目录（22 篇）	63
2.3 膜处理（185 篇）	64
2.3.1 在《给水排水》上发表的论文及作者目录（72 篇）	64
2.3.2 在《中国给水排水》上发表的论文及作者目录（101 篇）	66
2.3.3 在《净水技术》上发表的论文及作者目录（12 篇）	70
2.4 其他（103 篇）	70
2.4.1 在《给水排水》上发表的论文及作者目录（54 篇）	70
2.4.2 在《中国给水排水》上发表的论文及作者目录（40 篇）	72
2.4.3 在《净水技术》上发表的论文及作者目录（9 篇）	73
第 3 章 全国已建和在建的深度处理工程调查汇总（共 94 个）	74
3.1 北京市（10 个）	74
3.2 天津市（2 个）	76
3.3 内蒙古（1 个）	77
3.4 吉林省（2 个）	78
3.5 河北省（2 个）	79
3.6 河南省（2 个）	80
3.7 山东省（9 个）	81
3.8 上海市（8 个）	83

3.9	浙江省 (18 个)	85
3.10	江苏省 (33 个)	88
3.11	广东省 (7 个)	94
第 4 章	深度处理典型工程	96
4.1	生物预处理工程	96
4.1.1	广州市西洲水厂生物预处理工程	96
4.1.2	东深原水生物预处理工程	105
4.2	臭氧—生物活性炭工程	112
4.2.1	北京市田村山水厂改扩建工程	112
4.2.2	北京市第九水厂深度处理工程	119
4.2.3	广州市南洲水厂深度处理工程	122
4.2.4	深圳市梅林水厂深度处理工程	132
4.2.5	深圳市笔架山水厂扩(改)建工程	142
4.2.6	浙江省嘉兴贯泾港水厂深度处理工程	150
4.2.7	浙江省平湖市古横桥水厂深度处理工程	164
4.2.8	杭州市南星水厂技术改造及扩建一期工程	173
4.2.9	天津开发区水厂三期工程	180
4.2.10	江苏省昆山市泾河水厂深度处理工程	189
4.2.11	昆山市第三水厂扩建工程国产臭氧设备	200
4.2.12	淮安经济开发区水厂臭氧-生物活性炭深度处理工程	207
4.2.13	上海市松江二水厂深度处理改造工程	210
4.2.14	上海市杨树浦水厂 7 号生产系统深度处理工程	216
4.2.15	无锡市充山水厂深度处理示范工程	222
4.2.16	郑州市刘湾水厂工程	233
4.2.17	济南市鹊华水厂深度处理工程	239
4.3	膜处理工程	248
4.3.1	南通芦泾水厂超滤膜法短流程改造工程	248
4.3.2	无锡市中桥水厂超滤深度处理工程	258
4.3.3	东营市南郊水厂超滤膜处理示范工程	264
4.3.4	杭州市清泰水厂深度处理改造工程	269
4.3.5	上海洋山深水港饮用水超滤膜处理工程	274
4.3.6	新疆乌鲁木齐市红雁池水厂超滤膜工程	282
4.4	浙江省嘉兴地区饮用水深度处理工程运行调研报告	291
4.4.1	嘉兴地区原水水质	291
4.4.2	水厂运行总体状况	296
4.4.3	水厂工艺单元运行效果分析	310
4.4.4	结论	332
	参考文献	334

第 1 章 中国给水深度处理技术发展及回顾

1.1 给水深度处理技术及研究会发展历程

(1) 研究会的名称

研究会名称最初想用“微污染水处理研究会”，因清华大学许保玖教授提出，给水深度处理较好，也可是市政自来水，也可是工业方面用水，后决定采用“给水深度处理研究会”。

(2) 历届研究会年会

1986 年在贵阳召开了第一次土木工程学会给水排水分会给水委员会，在会上决定成立 10 个研究会，其中就有给水深度处理研究会，并指定由清华大学、北京市政工程设计院与北京市自来水公司共同负责。

1987 年在北京昌平区马池口召开了给水深度处理研究会成立大会，参加单位有设计院、科研单位、高等院校、自来水公司等 40 余人，并定两年召开一次会议。

1991 年、1993 年在北京清华大学召开了第二次、第三次会议。大家对关心的自来水水质、水质检测方法、存在的问题与研究现状进行了交流与讨论。限于国情，当时大都采用强化常规工艺，如预氧化、强化混凝等技术。

由于臭氧发生器国内研制起步晚，研制的臭氧发生器多是小型的，还不能用于工程（需 10~20kgO₃/h），并且水价很低，市政工程投资有限，还不可能采用臭氧-生物炭工艺。只有在大型企业供水公司，如南京炼油厂、九江石化公司、燕山石化公司、大庆石化公司、胜利炼油厂等开始应用臭氧-生物炭工艺。高等院校中哈尔滨建工学院在北方开始将臭氧-生物炭工艺用于实际工程，同济大学、清华大学主要进行生物预处理的研究。

1995 年，由于蚌埠自来水公司董祥龙经理的支持，研究会开始走出校门在蚌埠召开，参观了生物预处理工程（生物滤池 10000m³/d）。

1997 年，在绍兴召开，参观了生物预处理、深度处理中试装置。

1999 年，在南京东南大学召开，根据发展需要决定每年召开年会。

2001 年，在苏州召开，参观了气浮过滤。

2002 年，在宁波召开，参观了超滤膜净水技术。

2003 年，在浙江嘉兴地区桐乡市召开，参观了深度处理工艺。

2004 年，在嘉兴地区海宁召开，参观了用硅藻土吸附、曝气工艺解决水的色度问题的实例。

2005 年，在嘉兴召开，参观水厂强化常规工艺+臭氧-生物炭（上向流）工艺。

2006 年，在广州召开，参观深度处理工艺（100 万 m³/d 的大学城南洲水厂）。

2007 年，在江苏昆山召开，参观了臭氧-生物炭工艺。

2008 年，在深圳召开，去香港参观了臭氧-生物炭工艺与澳门超滤膜技术。

2009年,在北京清华大学召开,参观北京自来水集团第三水厂、第九水厂深度处理工艺。

2010年,在上海召开,参观了松江二水厂,在常规工艺基础上进行深度处理上向流活性炭的改造工艺。

2011年,在无锡召开,参观了中桥水厂臭氧-生物炭-超滤膜工艺。

2012年,在淮安召开,参观了臭氧-生物炭(上向流)工艺与磁性树脂交换去除溶解性有机污染物工艺。

(3) 嘉兴引水与深度处理之选择

浙江嘉兴地区水源采用的是运河水,水质差,虽经采用强化常规处理仍然不理想,引起嘉兴市政协、人大的关注,曾进行“从外引水还是就地深度处理”的讨论,经激烈争论,最终根据试验结果,决定采用生物预处理与臭氧-生物炭工艺。从此,深度处理工艺在嘉兴地区逐渐推开了,先是桐乡,后嘉兴、海宁、海盐、平湖、嘉善等地,直至覆盖了整个嘉兴地区。嘉兴的水源遭受污染,但当地自来水同行努力开展了强化常规工艺的基础上增加了生物预处理与臭氧-生物炭,突破了原有常规工艺,创造了我国受污染水源进行饮用水处理的模式,从而推动了我国给水的深度处理,被称为“嘉兴”模式。

(4) 臭氧-生物炭工艺运行中的问题与解决方法

任何一种技术都有它使用的条件与其优、缺点。在推广某种技术时一定要讲清其使用条件与优缺点并将其在工程中存在的问题与解决问题的办法一并介绍,这样才是一个成熟的技术,实践中发现,当原水中溴离子大于 $100\mu\text{g/L}$ 时,投加臭氧量较大时就会产生溴酸盐超标($10\mu\text{g/L}$);生物炭应用过程中出现微生物泄漏。针对这两个问题,经同行们共同努力进行研究实践,最终能够得以解决,保证了臭氧-生物炭工艺的正常推广与应用。

(5) 超滤+粉末炭与臭氧-生物炭之选择

无锡因受太湖水藻类分泌物的污染,水发臭,曾认为以超滤膜结合投加粉末炭可以解决臭味问题,但经实践,即使投加 50mg/L 粉末炭,出水仍有臭味。粉末炭对藻类的分泌物,土臭素与二甲基异茨醇是有效的,但对藻类分泌物的代谢产物沉淀中的硫醇、硫醚却效果不佳。后经专家讨论,决定采用生物预处理、常规处理、深度处理(臭氧-生物炭)联用工艺,解决了太湖水的臭味问题,已使用2年多,能保证水质达标。

(6) 水质标准的讨论与修订

2001年6月卫生部颁布了“生活饮用水卫生规范”,2005年2月建设部批准发布了《城市供水水质标准》CJ/T 206—2005,但当时执行的仍然是1985年国家颁布的GB 5749—1985国家标准。由于标准限值上的矛盾,常使给水同行不知所措。2005年研究会组织了19名教授联名向有关部门反映,希望尽快制定新的国家标准,并由当时全国人大环境资源委员会副主任钱易教授通过人大发往有关部门。尽管没有收到答复,但对2006年年底颁布的GB 5749—2006新的国家标准或许有所帮助。

对于水质标准的讨论:在2001年我们积极参与卫生部的“生活饮用水卫生规范”的制订,对新的代表有机污染物的指标耗氧量($\text{COD}_{\text{Mn}} \leq 3\text{mg/L}$)的列入与浊度指标提高至1NTU提出了看法与建议;在“城市供水水质标准”(深圳市水务(集团)有限公司负责起草)制订中又将耗氧量 COD_{Mn} 原先“生活饮用水卫生规范”中特殊情况下不超过 5mg/L (此处特殊情况包括水源限制等情况)改成特殊情况指水源水质超过Ⅲ类即耗氧量 $>6\text{mg/L}$ 。在新国标的耗氧量限值制订中也得到肯定:即“水源限制,原水耗氧量 $>6\text{mg/L}$ 为 5mg/L ”。

这个改动，实际上是更严格了，因我国自来水厂水源大多在地表水环境质量标准中的Ⅲ类（ $\text{COD}_{\text{Mn}} 4\sim 6\text{mg/L}$ ），当超过Ⅲ类水源时， COD_{Mn} 才能 5mg/L ，也就是在Ⅲ类时只能达到 3mg/L ，不能因“水源限制”以 5mg/L 为准。 5mg/L 与 3mg/L 的差别，就让我国大多数居民在有机污染严重时期，尽量少喝一些有机污染以保健康。

(7) 深度处理中关键设备与材料

21 世纪到来之时，推动国内臭氧设备企业研制大型（ $10\sim 20\text{kgO}_3/\text{h}$ ）臭氧发生器，现发展迅速，已研制成管式、板式两类发生器；电源从常压至中压、高压，大型发生器已可达 $120\text{kgO}_3/\text{h}$ ，电耗接近国际水平，适应国内工程的应用。

“十一五”期间在住建部水专项项目课题中列入了臭氧发生器与活性炭的行业标准与其选用指南，现已完成并付诸印刷，使深度处理工艺中关键设备与材料的使用规范化，也为推进深度处理工艺创造物质条件。

“十二五”专项中，已推动建议将非玻璃介质与玻璃放电介质大型臭氧发生器设备研制及其产业化与净水厂用高效活性炭制备产业化列入了“重大装备研发及产业化课题”。

(8) 深度处理的发展与展望

我国臭氧-生物炭工艺从 20 世纪 80 年代开始，仅仅是几个石化公司的水厂在应用，随着改革开放、工业建设迅速发展，逐步成为全国范围采用的深度处理工艺，针对我国水源污染，尤其是有机污染，传统常规工艺只能去除胶体而对溶解性有机污染显得无能为力，缺的是氧化与吸附技术，而臭氧-生物炭正好是弥补常规工艺不足，因此参考国外经验，经过我国的试验，实践逐步形成主要的发展模式。

膜技术是近年来发展的有效水处理技术，超滤能去除胶体与 10 万分子量的大分子有机污染物，今后取代滤池去除微细颗粒与微生物是有前途的技术，但不能去除小分子（分子量在 5000 以下）的有机污染物（包含臭味物质），还不能单独用来解决我国的水污染。

纳滤与反渗透是有希望的水处理技术，但限于其价格、能耗、净水得率，目前尚难应用，但随着技术的进步发展，在其他技术不能见效的情况下，仍然具有很大优势，预计在今后水污染日益严重、水质标准不断提高时，有望作为最终手段用于对付特殊污染物。

我国水污染，尤以藻类分泌物产生的臭味难以去除，即使 106 项水质“全部达标”，臭味物质的去除，因其测定方法的不科学性，尚有待努力。愿 2015 年大多数水厂出水能达标，2020 年臭味能达标，使臭味受害者不再受害，让我们为中国城乡老百姓都能喝上一口好水而努力奋斗！

1.2 给水深度处理技术在我国的发展

1.2.1 生物预处理技术发展

1. 概述

生物预处理一般设置在常规净水工艺流程之前。主要利用微生物的氧化分解及转化功能，以水中有机物（少数以无机物）作为微生物的营养，通过微生物的新陈代谢作用，对水中的有机污染物、氨氮、亚硝酸盐及铁、锰等无机污染物进行初步去除降解。既改善了水的混凝沉淀性能，也减轻了常规处理和后续处理单元的负荷。同时，通过可生物降解的

有机物的去除,还能减少水中“三致”物质的前体物的含量,减少细菌在配水管网中重新滋生的可能性,减少消毒剂需要量及消毒副产物生成量,增加饮用水的生物稳定性。生物处理按微生物在构筑物中的存在方式可分为两类:活性污泥法和生物膜法。由于微污染源水有机物浓度非常低,活性污泥法不太适用,因此均采用生物膜法。目前应用的生物膜法预处理技术主要有以下几种形式:生物滤池、生物接触氧化池、生物转盘、生物流化床及在水源地通过堤岸、沙丘等渗透的土地处理系统等。目前比较成熟的、能用于大规模净水厂实际运用的生物预处理工艺有:弹性填料生物接触氧化池、生物滤池、悬浮填料生物接触氧化池和轻质滤料生物滤池。

生物预处理对氨氮的去除效果非常明显,正常气温下,氨氮去除率在80%以上,即使水温在5℃左右,去除率通常也在50%左右,对有机物、铁、锰在后续处理工艺中有很好的去除率,也能改善絮凝效果;它的设备也比较简单,运行成本较低,主要是鼓风机的电耗和一些水头损失,运行成本一般在0.01元/m³左右。

2. 国内的研究与应用

生物接触氧化工艺属于固着型生物处理方法,是在生物滤池的基础上发展而来,又称“浸没式滤池法”和“接触曝气法”,早在19世纪就用于污水处理。20世纪70年代经日本的小岛贞男博士改进后,开始大量用于生产。我国于1975年开始研究,同济大学起初主要应用于处理工业废水和部分生活污水(如采用生物转盘等)。1979年开始将该法应用于微污染原水预处理的研究工作。

针对我国水源原水水质受污染日益普遍和严重的趋势,同济大学环境工程学院最早在上海将其用于黄浦江原水的预处理研究工作,取得初步成果后逐步与苏州、杭州、宁波等地自来水公司、上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司和中国核电工程有限公司等单位合作,分别在同济大学实验室、苏州胥江水厂、上海南市水厂、周家渡水厂和杨树浦水厂、秦山核电站、杭州祥符水厂及宁波梅林水厂等地,持续分步骤地开展微污染原水的生物预处理(塔式生物滤池、生物转盘、生物接触氧化池和生物流化床等工艺)+传统进水工艺+深度处理(粒状活性炭或臭氧+活性炭)的除污染试验研究,取得多项重要科研成果,获得国家环境保护总局、住房和城乡建设部、教育部和上海市的多项科技进步奖。

1982~1984年,同济大学环境工程学院与上海自来水公司合作进行国家“六五”重点攻关科研项目“黄浦江污染综合防治规划方案研究”子课题“生物滤池预处理黄浦江原水”研究,获得1986年国家环境保护总局环保科技进步一等奖(部级)。

1991年10月,同济大学环境工程学院正式承担了由国家科学技术委员会下达、住房和城乡建设部组织领导的“八五”国家科技攻关计划“85-908-03-01”专题“饮用水微污染净化技术”。同济大学环境工程学院牵头,与杭州市自来水公司和宁波市自来水公司一起承担上述专题中的“85-908-03-01-04a”子专题“生物预处理去除微污染技术”。该课题以宁波梅林水厂360m³/d的生物接触氧化池作为姚江微污染原水的预处理工艺研究对象,开展了生物接触氧化池除污染效果研究、生物接触氧化池连同后续深度处理全流程的除污染效果研究、节约药剂用量研究以及生物接触氧化预处理技术的除污染机理研究等,主要成果包括:①成功地筛选采用了接触氧化池的弹性立体填料;②采用橡胶膜片式微孔曝气器;③生物接触氧化池采用推流反应器方式,生物降解和硝化作用好;④生物接触氧化池采用气水逆流接触的方式,提高对微污染原水的除污染处理效果;⑤生物接触氧化池在水

深 4.5m, 停留时间 1.2~2h 的情况下, 气水比仅需 (0.5~0.7): 1, 可减少曝气量 2/3, 极大地节约了动力费用; ⑥生物接触氧化池工艺设计要点和主要参数选择。

1992 年, 同济大学环境工程学院针对杭州市祥符水厂以西塘河水为原水, 并拟将宦塘原水泵站蓄水池改造成生物接触氧化池的具体要求, 开展生物接触氧化池和后续净水工艺研究, 同时还辅助进行西塘河原水的生物转盘预处理试验研究。

1993~1994 年, 同济大学环境工程学院针对宁波市梅林水厂取姚江水源低浊度原水、解决有机污染的除污染工艺改造要求, 进行生物接触氧化池和后续净水工艺试验研究, 同时还辅助进行姚江原水的生物流化床预处理试验研究。

1994 年 11 月 18 日, “生物预处理去除微污染技术” 课题研究成果通过住房和城乡建设部组织的专家技术鉴定, 认为达到了国际先进水平。研究成果随即应用于 1996 年通水的宁波梅林水厂 (4 万 m^3/d) 和嘉兴石臼漾水厂二期工程 (10 万 m^3/d), 是国内最早采用国产弹性立体填料和微孔曝气器的生物预处理工程, 取得显著效果。

1996 年同济大学环境工程学院和宁波自来水总公司承担国家“九五”科技攻关计划专题“受污染水源水净化集成技术与设备”中的子专题“受污染水弹性填料微孔曝气生物接触氧化预处理生产性研究”(96-909-03-01-02)。该课题依托宁波梅林水厂 4 万 m^3/d 的生物接触氧化池生产工艺流程开展除污染效果、设计参数优化和优化药剂用量研究, 为弹性填料生物接触氧化池的推广应用打下良好的基础。

同济大学城市污染控制国家工程研究中心从 1994 年开始对深圳东深原水展开预处理研究, 1998 年根据工艺优化试验成果, 在深圳水库库首建成日处理水量 400 万 m^3/d 的生物接触氧化预处理渠。

1995 年以来, 同济大学环境工程学院和无锡自来水总公司等多家水司合作, 继续在微污染原水生物预处理方面开展相关研究, 取得丰硕的成果。

上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司是国内早期参与微污染原水生物预处理的科研设计单位之一, 自 20 世纪 80 年代以来, 与同济大学、上海市自来水公司和原水公司等单位合作, 在上海闵行水厂和松浦原水厂等处开展中试和生产性研究, 并开发拥有自主知识产权的轻质滤料生物滤池 (Biosmedi), 成功应用于上海徐泾自来水厂等工程项目中。近年来, 随着研究工作的深入, 生物预处理方面科研成果多次获得上海市科技进步奖, 相关成果广泛应用于上海、浙江和广东等地的相关工程, 并多次获得全国和上海市优秀设计奖。

1999 年, 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司和嘉兴市嘉源给排水有限公司联合对南门水厂水源进行生物滤料试验, 采用多孔瓷粒下向流生物滤池, 滤料层厚 1.4m, 进水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度为 1.05~2.6mg/L, 气水比为 (0.7~1): 1。不同水温下 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率如表 1-1 所示。

不同水温下 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率

表 1-1

水温 (°C)	$\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率 (%)	水温 (°C)	$\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率 (%)
4~9	70.0	12~17	90.0
7~10	81.0	20~25	~98.0

上海南汇惠南水厂生物预处理工程是上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司设

计的首个生物预处理项目。工程规模为12万 m^3/d ，1999年8月投产，2000年4月通过专家评估。水源取自上海大治河，是一条人工排涝河道，平时流量很小，有机污染程度较严重，水中色度较高，氨氮、亚硝酸盐、耗氧量及铁、锰的含量均偏高，在污染严重时，氨氮值达4~5 mg/L ，色度高达60~70 cu ，属中度微污染水源。采用弹性丝填料生物接触氧化池，设计参数为：填料串长度3500 mm ，填料区停留时间1.45 h ，水力负荷2.3 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，气水比(0.8~1.4):1。设两座生物接触氧化池，每池处理能力6万 m^3/d 。

经生物预处理后的平均处理效果为：

- (1) 氨氮去除率77.2%， COD_{Mn} 去除率9.3%；
- (2) 色度去除率20.5%，浊度去除率40.9%。

经生物预处理和后续常规处理的出水水质一般达到：氨氮 $<0.5\text{mg/L}$ ，亚硝酸盐 $<0.002\text{mg/L}$ 。

3. 主要形式

目前国内在生物预处理工程中主要采用的池型有：

(1) 生物接触氧化池

生物接触氧化池又叫浸没式曝气滤池。就是在曝气池中填充填料，经曝气的水流经填料层，使填料颗粒表面长满生物膜，水和生物膜相接触，在生物膜作用下水得到净化。这是一种兼有活性污泥和生物膜法特点的处理构筑物，所以兼有这两种处理法的优点。

这种方法的特点是：水力条件好，填料表面全为生物膜所布满，有利于维护生物膜的净化功能；对冲击负荷有较强的适应能力，污泥量少，不产生污泥膨胀危害；易维护管理。我国多个水厂均有应用。

同济大学等单位在总结国家“八五”科技攻关项目成果的基础上，对生物接触氧化法在生产应用技术上进行了全面的研究，探讨生物处理工艺合理的设计、运行参数及适用条件，并首次在生产上采用弹性填料微孔曝气生物接触氧化工艺取得成功。一般情况下，在停留时间为1~2 h 、气水比为(0.6~1):1和水温适宜的条件下，氨氮去除率可达70%~90%， COD_{Mn} 的去除率为20%~30%。

(2) 生物陶粒滤池

生物陶粒滤池是目前常用的生物处理方法。通过布水装置流到滤池表面的水，以滴流形式下落，在滤池表面生成生物膜。通过生物膜的代谢活动，有机物被降解，使附着水层得到净化。其填料一般不被水淹没，也有填料完全被水淹没的。供氧是影响生物滤池净化功能的重要因素之一。微生物的代谢速度取决于有机物的浓度和溶解氧量，在一般情况下，氧较为充足，代谢速度只取决于有机物的浓度。

这种方法的特点是：处理效果稳定，污染物去除率较高、污泥量少，受外界环境变化影响较小，有机物降解程度较高，净化较彻底，管理操作简单方便。

清华大学对生物滤池不同滤料进行了研究后推荐采用陶粒。1993年蚌埠二水厂建造了1万 m^3/d 的生物陶粒滤池。通过生产运行测试，滤池对原水中有机物有一定的去除效果。 DOC 、 COD_{Mn} 、 TOC 、 UV_{254} 的平均去除率分别为17.3%、27.92%、29.46%、29.22%。对氨氮则有较好的去除效果，在水温为3.5~31 $^{\circ}\text{C}$ 条件下，有充分溶解氧时可维持90%以上的去除率，并有较好的抗冲击能力。广州市自来水公司新塘水厂70万 m^3/d 的曝气生物滤池已使用两年。

(3) 悬浮填料生物接触氧化池

悬浮填料是近年来开发出的一种用于生物接触氧化工艺的新型填料,该填料最早在德国、挪威等地研制成功,并在当地的污水处理中得到广泛应用,据相关文献介绍,国外采用这种池型的污水处理厂已达到数百座。国内也开始逐渐引进和发展。该填料的特点是:

- 1) 一般呈规则状,比表面积大,远高于弹性填料;
- 2) 由聚乙烯、聚丙烯等塑料或树脂制成,相对密度与水接近,在适当曝气时,易达到全池流化翻动状态;
- 3) 填料在流化状态下不会结团堵塞,老化的生物膜可通过水力冲刷自动脱落,促进了生物膜的更新;
- 4) 填料直接投加在水池中,不需支架等附属物,减少了安装工程,且不易堵塞,不需反冲洗,运行管理方便。

由于悬浮填料在曝气时处于流化状态,不但可提高氧的利用率和传质效率,而且通过填料对气、水的分割,有利于布水和布气的均匀,可提高反应效率,减少停留时间。

这种形式由于工艺简单、去除率高、占地少、无需排泥等特点,在上海黄浦江上游540万 m^3/d 原水预处理中得到青睐,已作为一个主要技术方案进行试验比较。平湖市古横桥水厂在进行了一年多小试试验后首先开始建设,随后浙江嘉兴地区和广东等省相继推广应用。

(4) 轻质滤料生物滤池

轻质滤料生物滤池所采用的滤料是一种粒径小、形状一致的球形滤料,具有如下特性:

- 1) 在滤料介质内达到很高的滤速,在微污染原水中,气水同向流的情况下,可以采用较高的滤速;
- 2) 该滤料的原材料来自国内的工业原料,化学性能稳定,可就地生产加工,来源广泛,价格便宜;
- 3) 滤料比表面积大,填料比表面积大于 $1000\text{m}^2/\text{m}^3$,表面适宜微生物生长,处理负荷高;
- 4) 滤料粒径均匀,阻力损失小,在常规情况下,滤层阻力损失不超过 0.5m ;
- 5) 气水比较低,由于滤料密度较小,能浮于水上,实际使用气水比为 $(0.4\sim 1.0):1$,且大多数情况下可运行在 $(0.4\sim 0.6):1$ 。

目前轻质滤料生物滤池已在国内给水和废水处理中投入实际使用,其中上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司研发的轻质滤料生物滤池(Biosmedi,专利号ZL 00216746.8),是国内具有自主知识产权的生物预处理新池型,在上海徐泾自来水厂已正常运行多年,效果良好。采用轻质滤料生物滤池的广州西洲水厂技术改造——生物预处理工程,设计规模达50万 m^3/d ,于2011年通水,目前运行情况良好。

4. 存在的主要问题

从各地应用情况看,生物预处理存在的主要问题是冬季低温期间处理效率较低;悬浮填料生物接触氧化池的填料上生长的生物膜不易清洗,挂膜的支架承重较大;悬浮填料上容易长满螺蛳、蛤蜊等小生物,不易清洗并使填料下沉不悬浮。生物滤池的缺点主要是由于在水厂改造中,常规处理已经建成,不得已将生物滤池设置在最前方,虽可节省混凝剂

用量,但它越俎代庖,将沉淀池最容易去除的颗粒杂质放在生物滤池中去除,增加了水头损失,并容易堵塞管嘴,常须清洗,加重了运行负担。

综合比较,悬浮填料如能克服小生物生长易堵塞的缺点,确保悬浮,使生物膜自动脱落,则具有效率高、运行方便、造价较低的优点,将是今后的发展方向。

1.2.2 臭氧—生物活性炭处理技术的发展

1.2.2.1 深度处理原理

深度处理就是通过物理、化学、生物等作用去除常规处理工艺不能有效去除的污染物(包括消毒副产物前体物、内分泌干扰物、农药及杀虫剂等有毒有害物质、氨氮等无机物),以减少消毒副产物的生成,提高和保证饮用水水质,提高管网水的生物稳定性。对于 COD_{Mn} 及氨氮含量较高的微污染源水来说,经常规混凝沉淀与过滤处理后,水中的污染物质主要为有机物和氨氮。

深度处理的效果可以从三个方面来反映:一是出水的水质指标,应满足有关的饮用水水质标准;二是出水的致突变活性低,致突变试验应为阴性;三是水在管网中的生物稳定性要高,防止管网中细菌的繁殖。

深度处理最主要的目的是去除溶解性有机物。按有机物(以溶解性有机碳 DOC 计)能否被活性炭吸附,可将水中有机物分成可吸附有机物(DOC_A , adsorbable DOC)、不可吸附有机物(DOC_{NA} , non-adsorbable DOC);按有机物能否被生物降解,可将水中有机物分成可生物降解有机物(BDOC, biodegradable DOC)、难生物降解有机物(NBDOC, non-biodegradable DOC)。这几类有机物互相交叉,因此又可将水中的有机物综合分成四类:

- (1) 可生物降解同时可被吸附的有机物(用 $DOC_{B&A}$ 表示);
- (2) 可生物降解、不可吸附有机物(用 $DOC_{B&NA}$ 表示);
- (3) 难生物降解、可吸附有机物(用 $DOC_{NB&A}$ 表示);
- (4) 难生物降解、不可吸附有机物(用 $DOC_{NB&NA}$ 表示)。

其中可生物降解有机物可通过生物作用去除,生物有机物(包括农药、杀虫剂及其他内分泌干扰物)可通过化学氧化作用将其转化成易生物降解有机物再通过生物作用去除,也可通过活性炭吸附作用将其去除。

水中的氨氮可通过生物作用将其转化为硝酸盐,或通过加氯将其去除,但氯化法的氯气消耗量大。

常用的化学氧化方法有臭氧氧化法和高级氧化法,目前在工程中应用最多的是臭氧氧化法。活性炭具有很强的吸附作用,可有效去除水中的有机物,生物膜成熟后成为生物活性炭,可去除水中易降解有机物及氨氮,延长活性炭的使用寿命。传统工艺对水源水中的病原原生动植物(贾第虫、隐孢子虫)去除率较低,生物炭滤池(粒状炭)过滤对贾第虫孢囊和隐孢子虫卵囊的去除效果与砂滤池基本相同,其中,隐孢子虫卵囊比贾第虫孢囊更易穿透活性炭滤池,通用的消毒剂氯和氯胺对隐孢子虫的灭活效率较低,很多研究证明,膜过滤对隐孢子虫卵囊具有非常高的去除率,经膜过滤的水中很少发现隐孢子虫卵囊,其去除机理被认为是膜的截留作用。

臭氧活性炭联合工艺是一种较成熟的深度处理工艺,两者的有机结合使其成为有效去

除有机物的工艺。臭氧氧化可以有效去除农药及其他内分泌干扰物，并将难生物降解有机物氧化分解成可生物降解有机物，这部分有机物可在生物活性炭滤池中通过生物降解被去除；同时，一些不能被活性炭吸附的大分子有机物可被臭氧分解成能被吸附的较小分子有机物，从而通过活性炭吸附去除。臭氧氧化产物中的醛类对人体有害，但由于这些物质容易生物降解，因此，生物活性炭可以将其有效去除。同时，一部分易被吸附的难降解有机物被氧化成易生物降解有机物，在活性炭滤池中通过生物作用被去除，从而延长了活性炭的使用寿命。

深度处理的内涵是在常规处理的基础上提高水质，因此，深度处理并不是单纯的在常规处理工艺后增加臭氧-活性炭工艺，还包括常规处理前的各种预处理工艺、对常规处理工艺单元的改进以及膜过滤技术。预处理包括了化学氧化及生物处理工艺、为提高混凝对有机物的去除效果而采取的各种强化措施、为提高过滤单元对污染物的去除效果采用活性炭或改性滤料代替石英砂滤料。

1.2.2.2 臭氧技术

臭氧自 1840 年由德国的 Schorbin C 发现以来，即作为氧化剂使用。20 世纪初，法国的 Nice 市 Veyage 水厂率先将臭氧应用于饮用水消毒。臭氧是一种很强的氧化剂和消毒剂，其氧化还原电位在碱性环境中仅次于氟，远远高于水厂常用的消毒剂液氯。臭氧不仅有优异的消毒作用，而且作为一种强氧化剂，在水处理中同时具有去除水中的色、嗅、味和铁、锰、氰化物、硫化物和亚硝酸盐等作用，且消毒后饮用水中的三卤甲烷等副产物少。因此臭氧作为饮用水消毒剂越来越引起人们的关注。目前世界上已有许多国家，特别是欧洲国家在水厂处理中均采用臭氧。

研究发现，臭氧与有机物的反应具有较强的选择性，但它对水中已形成的三卤甲烷几乎没有去除作用。

1. 臭氧的主要物理化学性质

臭氧的分子式为 O_3 ，是氧的同素异形体。臭氧与氧有显著不同的特性，氧气是无色、无臭、无味、无毒的，而臭氧却是淡蓝色，且具有特殊的“新鲜”气味。在低浓度下嗅了使人感到清爽，当浓度稍高时，具有特殊的臭味，而且是有毒的。

(1) 臭氧在水中的溶解度

臭氧的相对密度是氧的 1.5 倍，在水中的溶解度比氧气大 10 倍，比空气大 25 倍。臭氧和气态气体一样，在水中的溶解度符合亨利定律：

$$C = K_H P \quad (1-1)$$

式中 C ——臭氧在水中的溶解度， mg/L ；

P ——臭氧化空气中臭氧的分压力；

K_H ——亨利常数， $mg/(L \cdot kPa)$ 。

由上式知，当实际生产中，采用空气为臭氧发生器的氧源时，臭氧化空气（含有臭氧的空气）中臭氧的分压很小，故臭氧在水中的溶解度也很小，例如，用空气为原料的臭氧发生器生产的臭氧化空气，臭氧只占 0.6%~1.2%（体积比）。根据气态方程和道尔顿分压定律知，臭氧的分压也只有臭氧化空气的 0.6%~1.2%。因此，当水温为 25℃ 时，将这种臭氧化空气加入到水中，臭氧的溶解度只有 3~7mg/L。若以氧气为氧源时，臭氧的分压可占到臭氧气的 10% 左右，因此，臭氧在水中的溶解度可大大提高。