

广东省东江—深圳供水工程 原水生物预处理工艺的 应用与研究

主 编 叶旭全

副主编 徐叶琴 张 辉 黄兴南

主 审 王占生



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

利用生物预处理工艺对原水中的有机污染物和氨氮进行氧化、分解预处理,效果好,相应成本亦较低,但在实施中工艺较为复杂。

东江—深圳供水工程原水生物预处理工程,建成后运行4年来,效果很好,对保证向深圳、香港供水水质,起到了不可替代的作用。该工程是目前中国和世界最大的原水生物预处理工程。

本书介绍了该工程的工程布置、水力条件、生物群落的培养保护、运行管理,以及工艺技术和注意事项等。

本书所介绍的原水生物预处理工艺,有着广泛的推广价值,并对微污染原水的合理利用提供了新的有效途径。可供从事供水工程原水处理工艺的设计者、研究者和供水工程管理人员以及环境水利工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

广东省东江—深圳供水工程原水生物预处理工艺的应用与研究/叶旭全主编. —北京:中国水利水电出版社,2003

ISBN 7-5084-1581-7

I. 广… II. 叶… III. 给水工程—水预处理:生物处理—广东省 IV. TU991.27

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第049992号

书 名	广东省东江—深圳供水工程 原水生物预处理工艺的应用与研究
作 者	主 编 叶旭全 副主编 徐叶琴 张 辉 黄兴南
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京鑫丰华彩印有限公司
规 格	965mm×1270mm 32开本 7.25印张 223千字
版 次	2003年7月第1版 2003年7月第1次印刷
印 数	0001—2100册
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



叶旭全(右一)陪同原广东省水利厅厅长关宗枝(左一)参观工程模型



生物处理池由 6 条长 270m、宽 25m、深 5.5m 的过水廊道组成，池内正在均匀曝气



ABS 曝气管网单元试验



悬挂弹性立体填料的 304 不锈钢填料支架

本书编撰人员名单

主 编 叶旭全

副主编 徐叶琴 张 辉 黄兴南

撰稿人 叶旭全 徐叶琴 张 辉 黄兴南

谢汉强 李迎春 陈汉辉 肖 毅

孙国胜 黄振盈 蒋俊辉

序

随着我国工农业的迅速发展，而环保措施未能及时到位，不可避免地使我国地表水源受到不同程度污染，尤以经济发展较快的东莞、深圳地区为甚。

广东粤港供水有限公司（原广东省东江—深圳供水工程管理局）为了提高向香港、深圳供水的水质，与高等院校和设计研究单位合作，经过专家多次评审试验和设计方案，通过试验研究、设计施工和运行管理，克服了重重困难，建成了国际上一流的史无前例的超大型地表水生物预处理工程。

该工程汇集了我国水利和环保工程技术人员，在水库库区建设生物预处理工程，环保与水利工程的配合协调，生物处理效果与基建投资矛盾的统一，生物处理池防止积泥，大面积池的均匀曝气，填料上微生物活性等诸方面的创造性劳动与智慧。

该工程从开始运行至今已很好地发挥了工程效益，有效地改善了供水水质，取得了成功。它不仅在我国给水事业生物预处理方面作出了示范，而且对国际给水事业无疑也是一大贡献。

广东粤港供水有限公司的领导与技术人员系统地认真总结了试验研究、设计和运行管理的成果，尤其是在运行管理中发现问题并认真去解决问题的经验，并使之成书。该书是一本不可多得的、密切结合实际的、给水生物预处理的好书。我愿意向我国给水同行们推荐该书。相信通过阅读，不仅学习到给水生物预处理工程的设计、管理的知识，而且还将有所启迪，从中看到“天下无难事，只怕用心人”的哲理。

中国是世界上人口最多的国家，给水、排水事业尚处于发展阶段，我们能够吸取世界上最好的技术，通过消化、吸收，加上自己的创造，

将其搞得更好。可以预料，21 世纪的中国给水、排水事业将立于世界之颠。

清华大学环境科学与工程系教授
中国土木工程学会给水委员会副主任委员
兼给水深度处理研究会理事长

王占生

2002 年 12 月

前 言

东深供水原水生物处理工程是世界上最大规模的生物预处理工程，日处理原水高达 400 万 m^3 。自 1998 年底建成投产后，一直以氨氮去除率高达 65% 的效果稳定发挥着净水功能。可以说，该工程的建成投产和良好运行，标志着生物接触氧化法处理微污染原水这项处于世界科技前沿地位的高新技术研究成果业已成熟，标志着这项科技成果在前所未有规模的工业生产应用上取得巨大成功。不言而喻，这其中物化了大量有价值的新的研究成果、试验数据、应用方法和管理经验。在当前全球污染加剧、人类努力寻求净化原水方法的大背景下，总结东深供水原水生物处理工程建设和运行管理的研究探索和经验成果，并使之公诸于世，以期推动此项技术的推广和应用，应该是一项十分有益的事情。这也是我们编辑出版这本书的主要目的之所在。

广东省东江—深圳供水工程是经周恩来总理亲自批准，于 1964 年动工兴建的是一宗向香港、深圳及东莞沿线供水的跨流域大型供水工程。东深水一直被视为造福港深人民的政治水、生命水和经济水。进入 20 世纪 90 年代后，随着供水沿线经济从以农业为主逐渐转变为以工业为主，人口急剧增加，东深供水工程的污染速度加快，范围扩大，程度加重，水质日趋恶化。水质危机引起香港政府和广东省政府的关注，解决东深水水质危机迫在眉睫。为此自 1994 年起，我们便开始对预处理工艺技术进行了试验研究，经过对生物法、物理化学法等多种水质净化技术进行深入研究后，最后确定采用生物接触氧化法净化东深供水原水。这项技术是利用大量生长于水中载体（填料）的硝酸细菌和亚硝酸细菌等微生物群体，促进水中氨氮和有机污染物的氧化和分解，达到降解水中氨氮和有机污染物的目的。生物接触氧化法具备本工程对水质处理目标的要求，对污染物如有机物和氨氮等的处理，该法均能满足。其特点为处理负荷高；处理效果稳定良好；运行灵活性好；易于维护管理；受温度影响小；对处理构筑物结构和型式要求低，附属设施少，相对土建投资少，且经常运行费用低，是当前国内外微污染原水处理领域较为经济的工艺，较适合于东深供水工程。

东深供水原水生物处理工程是将生物预处理工艺理论应用于大规模

工业生产的重大科学实践。在此之前，在日本应用生物接触氧化法处理微污染原水也有过一些工程实例，但规模都较小；在国内，自 20 世纪 70 ~ 80 年代开始，不少研究机构和广大科学工作者也对此项技术进行了大量试验研究，取得一批研究成果；90 年代起，上海、宁波、嘉兴地区的一些水厂将此项技术投入小规模的生产应用，也积累了一些实践经验。为了解决该项技术在应用中的若干重大难题，我们与有关研究机构一起进行多项具有创新和开拓性的研究和试验，从而确保了该项工艺在东深供水原水生物处理工程这样空前规模生产应用上的巨大成功。

东深供水原水生物处理工程由同济大学建筑设计研究院和广东省水利电力勘测设计研究院联合设计，其中计算机监控系统由深圳市东深电子技术有限公司设计和施工。该工程于 1998 年 1 月 5 日正式开工建设，并于当年 12 月 28 日建成投入试运行。工程投产后大大改善了对深圳和香港的供水水质及深圳水库的生态环境。说明生物预处理工艺技术在大规模生产应用中获得巨大成功。这种成功一方面得益于工艺技术的成熟，另一方面也得益于投产后运行管理的探索和研究。

在工程投产后，为了提高对生物预处理工艺的应用水平和管理水平，发挥更好的工程效益，我们围绕着如何稳定和提高氨氮和有机污染物去除率，开展了一系列试验研究并将这些研究成果科学地指导运行管理，获得了良好的效果，其中主要有：

(1) 影响生物处理效果的主要因素。其中主要是进水氨氮浓度、水温、气水比、水力停留时间、溶解氧等对去除效果的影响。

(2) 生物处理池的水力特性研究。包括生物处理池的水力坡降、各流层的流速分布和水流混掺特性。

(3) 填料上的生物群落。主要是通过生物镜检，了解填料上的生物种类及其演替规律；分析各种生物对处理效果的影响；反映处理效果的生物指示名单；提出对运行管理的指导意见。

(4) 填料结泥及生物处理池泥沙淤积规律。提出解决填料结泥和减少泥沙淤积的措施。

(5) 生物处理工程的运行管理。包括生物处理池自然接种、填料挂膜、曝气均匀性控制、生物处理池水位控制、生物处理工程的防洪调度和水质调度、生物处理工程计算机集中监控系统的运行管理、生物处理工程在非常情况下（停电，检修，水质、水量突变等）的运行管理。

生物预处理工艺是一门新兴的工艺，尚有许多技术需要去研究、探

目 录

序 前 言

第一章 原水生物预处理工艺的发展与应用·····	1
第一节 广东省东江—深圳供水工程·····	1
第二节 改善水质的综合措施·····	2
第三节 生物预处理工艺·····	3
第四节 工艺优化试验·····	9
第五节 生物接触氧化法面临的主要问题·····	19
第二章 原水生物处理工程概况·····	21
第一节 工程布置·····	21
第二节 工艺参数及工艺设施·····	26
第三节 工艺运行的自动控制·····	29
第四节 计算机监控系统·····	33
第五节 重大技术问题·····	39
第六节 工程施工·····	45
第三章 水力特性的研究·····	50
第一节 研究水力特性的目的·····	50
第二节 水力摩阻与水力坡降·····	53
第三节 流速分布与流量分配·····	62
第四节 水流混掺特性·····	65
第五节 传质动力·····	79
第四章 填料上的生物群落·····	85
第一节 主要生物类型及其作用·····	86
第二节 主要动物种类及其演替规律·····	89
第三节 主要藻类及其影响·····	102
第四节 硝化细菌与水质净化效果的关系·····	105
第五节 填料挂膜启动过程中生物群落的变化·····	117
第六节 停水期间及通水后生物群落变化·····	122

第七节	生物群落研究与工程运行管理对策	131
第五章	影响生物处理效果的主要因素	135
第一节	水温对处理效果的影响	137
第二节	进水氨氮浓度对处理效果的影响	144
第三节	水力停留时间对处理效果的影响	152
第四节	气水比对处理效果的影响	160
第五节	氨氮的填料负荷	164
第六节	亚硝酸盐氮的转化率	166
第七节	处理效果的稳定性	168
第六章	生物处理工程的运行管理	170
第一节	生物处理池的挂膜	170
第二节	曝气均匀性的控制	176
第三节	运行水位的控制	180
第四节	非正常情况下的运行管理	182
第五节	停水期的运行管理	184
第六节	运行调度	188
第七节	生物处理池的泥沙淤积	198
第八节	泡沫成因及对策	205
第九节	工艺设备故障检修	207
第十节	水质污染的发展与对策	210
第十一节	工程效益	212
参考文献		215

第一章 原水生物预处理工艺的发展与应用

第一节 广东省东江—深圳供水工程

广东省东江—深圳供水工程是我国政府为解决香港同胞食用淡水困难，经周恩来总理亲自批准兴建的一宗跨流域大型引水工程。工程北起东莞市桥头镇的东江，南至与香港接壤的深圳河，输水全程 83km。

东深供水工程始建于 1964 年 2 月，1965 年 3 月 1 日建成并正式向香港供水。30 多年来，为了不断满足香港、深圳的用水需求，分别于 20 世纪 70 年代、80 年代和 90 年代进行了三次规模一次比一次大的工程扩建。目前，工程拥有 22 座抽水站、6 座拦河闸坝、2 座中型水库、3 座水电站、5 个供水站和 1 条 6.42km 的大型输水隧洞，总装机容量 8.18 万 kW，年设计供水能力 17.43 亿 m³。具有供水、防洪、灌溉、发电等综合利用功能，是我国跨流域大型供水工程。

东深供水工程经三期扩建后形成东江、司马、马滩、塘厦、竹塘、沙岭等 6 级供水泵站，利用石马河天然河道输水，沿线经常平、樟木头、清溪、塘厦、凤岗以及深圳市的沙湾等乡镇后流入深圳水库。

20 世纪 90 年代，东深供水工程面临前所未有的水量和水质危机。因东江中下游河道超量采砂导致河床严重下切，致使东江泵站不能正常抽水，为此 1996 年 12 月广东省政府决定投资 3.4 亿元兴建太园泵站，1998 年 9 月太园泵站投产，彻底解决了水量危机。随着经济的迅速发展，东深供水沿线污染严重，水质危机迫在眉睫，1998 年 1 月广东省政府又投资 2.8 亿元兴建东深供水原水生物处理工程，该工程于 1998 年 12 月建成投产，有效地改善了对香港和深圳的供水水质。

随着深圳及沿线东莞市属乡镇用水量不断增加，迫切要求扩大供水量；此外原东深供水工程主要利用天然河道作输水道，大量未经处理的污水直接或间接进入输水道，水质受到不同程度的污染。必须尽快采取措施改善和保障供水水质。因此，2000 年 8 月广东省政府决定投资 47 亿元人民币兴建东深供水改造工程。该工程采用专用的输水管道，把供水系统与石马河分离，恢复石马河的天然河道，实现清污分流，兴建新

专用输水管道保证源水不受二次污染。

本工程建造的专用的输水管道与石马河分离,沿专用管线新建莲湖、旗岭、金湖三级供水泵站,与已建好的从东江直接取水的太园供水泵站以及东深供水原水生物处理工程组成新的供水系统。该工程已于 2003 年 6 月建成投产,已彻底解决东深供水工程的水量和水质危机。新的东深供水工程示意图,见图 1-1。

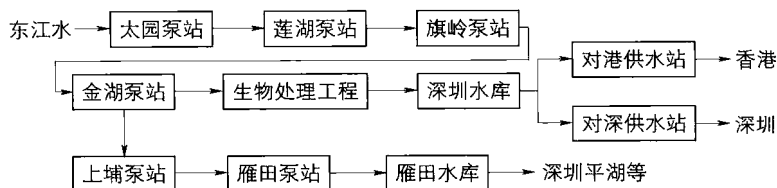


图 1-1 东深供水工程示意图

从 1965 年 3 月 1 日至 2002 年底,东深供水工程累计供水总量为 209.2380 亿 m^3 ,其中,向香港供水 137.1625 亿 m^3 、向深圳供水 45.2696 亿 m^3 、向工程沿线供水 26.8059 亿 m^3 ,为香港的繁荣稳定、深圳经济特区的崛起和工程沿线经济的迅速发展,发挥了重大的作用,取得了巨大的社会效益和经济效益。

第二节 改善水质的综合措施

为了改善东深供水水质,广东省人大、省政府,省水利厅和东江—深圳供水工程管理局在保证工程供水量和改善水质方面采取一系列的行政措施和综合治理措施。

1991 年以来广东省人大、省政府先后颁布了《东江水系水质保护条例》、《东深供水工程水质保护规定》、《广东省东深供水工程管理办法》等 5 部专用法规。

1990 年东江—深圳供水工程管理局委托有关部门完成东深流域水质规划任务,并于 1991 年 4 月通过《东深供水工程水质与水污染控制系统规划研究》;1993 年委托广东省环保局水质监测中心进行《东深流域污染源调查与水污染治理规划》。在对东深流域进行污水控制的同时,从 1992 年开始,委托华南环保科研所研究防治深圳水库富营养化项目,1994 年 6 月委托同济大学采用生物接触氧化法转化氨氮的试验,

1995 年 7 月委托水利部中国科学院水库渔业研究所对深圳水库进行不投饵的网箱养鱼的研究, 1995 年 8 月东深供水工程管理局同暨南大学开展以藻治藻的水网藻的试验研究, 同时还委托广东省水利电力勘测设计研究院开展在深圳水库库尾种植水生植物的规划工作等。

在开展研究防治东深原水污染的同时, 于 1993 年 5 月还用化学方法在深圳水库二期对港供水站量水间出口处, 进行投加漂白粉降解氨氮的试验和 1995 年 11 月在深圳水库对香港供水二期、三期输水管道进行加氯试验。对于本工程, 折点加氯法在实际应用上有以下局限性:

(1) 在水体需去除有机物和氨氮时, 投氯量应为原水氨氮重量的 10 倍 (若还要去除其他污染物时, 投氯量还需增加), 使水处理成本大幅度增加。由于本工程处理水量巨大, 造成加氯绝对值很大。如此大规模加氯量的加氯设施, 目前国内技术及设施均难以适应。同时, 加氯后将产生大量有机氯化物, 对人体健康形成潜在威胁。

(2) 控制管理及安全性问题难解决。液氯是一种严格控制的危险品, 本工程通过计算每天加氯量就需 66.4t, 其用量大, 安全问题更加突出。

(3) 加氯量难以控制。东深供水原水氨氮浓度变化较大, 加氯量不易掌握。加氯控制在折点之前, 易产生一氯胺、二氯胺, 该物质在水中具有恶臭; 加氯过量则造成浪费。

(4) 巨大的液氯需要量的及时生产供应、运输落实困难。

通过试验研究和分析, 认为物理化学法中的折点加氯法不适用于东深供水工程。

第三节 生物预处理工艺

一、物理化学法和生物法

针对微污染水源, 采用的主要处理措施是在常规水处理工艺基础上增加预处理方法, 并可分为物理化学方法和生物方法两大类, 前者主要包括活性炭吸附法、臭氧或高锰酸钾氯化法、折点加氯法等; 后者主要包括生物滤池、生物接触氧化法、生物流化床、生物转盘、淹没式生物粒状滤料池、普通生物砂滤池和慢砂滤池等。

物理化学方法虽然效果好, 可部分去除有机物, 但存在设备费用大, 运行成本高的缺点。且多数化学方法都将产生一定的副作用, 如高

锰酸钾氧化法带来的安全、色度问题；折点加氯法带来的水中三卤甲烷含量增加，从而导致自来水安全性降低问题，出水 pH 值下降问题等。东深供水工程水量巨大，化学方法药剂投加量难以控制，处理安全可靠度相对较低，因此，东深供水工程优先考虑采用运行较稳定可靠、效果良好和无副作用的生物方法。

生物方法中，生物滤池虽然去除有机物及氨氮效果良好，且动力消耗较高。但对场地和构筑物要求高，因此，考虑到东深供水工程处理水量巨大，施工条件限制等因素，不采用该法。下面重点介绍并推荐生物接触氧化法。

生物接触氧化法具备本工程对水质处理目标的要求，对污染物如有机物、氨氮等的处理该法均能满足。其特点为处理负荷高；处理效果稳定良好，运行灵活性好；易于维护管理；受温度影响小；对处理构筑物结构和型式要求低，附属设施少，相对土建投资少，且经常运行费用低，是当前国内外微污染原水处理领域较为经济的工艺，较适合于东深供水工程。

微污染原水物理化学方法和生物处理方法的比较，见表1-1。

表 1-1 微污染原水主要处理方法比较表

项 目	物 理 化 学 方 法				生物处理方法	
	活性炭吸附	臭氧	高锰酸钾	折点加氯	生物滤池	生物接触氧化
BOD ₅ 去除率	高	高	较高	较高	较高	较高
COD _{Mn} 去除率	高	高	较高	较高	较高	较高
NH ₃ —N 去除率	无	高	高	高	高	高
浊度去除率	高	—	—	—	较高	较高
AMES 实验*	阴性	阴性	弱阳性	强阳性	弱阳性	弱阳性
投资费用	高	高	较高	较低	较低	低
运行费用	很高	很高	高	高	较低	低

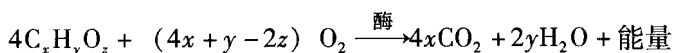
* 原水为强阳性的情况下。

二、生物接触氧化法的工艺原理

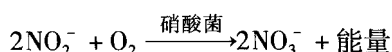
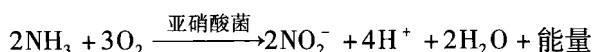
生物处理方法是利用在处理构筑物中驯化培养聚集的优势微生物群体，在生长过程中需利用周围环境中的营养物质，包括水中的污染物质，进行新陈代谢达到降解污染物，净化水质的目的。其污染物去除机

理如下所示：

有机污染物氧化反应为（有机物以 $C_xH_yO_z$ 表示）：



氨氮氧化方程式如下：



生物接触氧化法工艺原理是利用附着在填料（载体）表面上的生物膜（由微生物群体组合的黏状物），使水中有机物被吸附、分解、氧化，有些还作为生物膜上原生动物的食料。由于生物膜上的生物量很大，尽管微污染原水中有有机物浓度很低，也能得到有效处理。而且低浓度可生物降解有机物，有利于贫营养菌的生长，这种菌能降解低浓度有机物。另外，由于不断地充气，水在填料中多次往复循环，生物膜不断更新保证其活性，提高了对有机物的去除效果，该法在国内外已有生产应用实例。

三、国外生物法的应用概况

早在 19 世纪末，人们在研究土壤净化污水的过滤田基础上，创造了生物过滤法，并在当时应用于生产。1914 年又出现了活性污泥法。生物处理法随着城市建设和工业生产的发展已逐步普及，成为城市污水和工业废水处理的主要方法，在全世界已有上万座的不同生产规模的生物处理构筑物在运行，其中规模大者日处理污水量达到 100 多万 m^3 。随着环境保护工作的开展，生物处理方法在污水处理中的应用也日益广泛。

生物处理方法包括活性污泥法和生物膜法两大类，而生物膜法主要包括生物滤池法和生物接触氧化法。

生物膜法在 20 世纪二三十年代，已建造了较多的生物滤池，当时是生物过滤法和活性污泥法并列。这两种方法相比，由于生物过滤法体积负荷和 BOD 去除率都较低，环境卫生条件也较差，处理构筑物又有可能堵塞等缺点，于是 40 年代 ~ 60 年代有逐渐被活性污泥法代替的趋势。但到了 60 年代末期，由于新型合成材料的大量生产和环境保护对水质要求的进一步提高，生物膜法又获得了新的发展，近年来，属于生物膜法的塔式生物滤池、生物转盘、生物接触氧化法和生物流化床得到

比较多的研究和应用。

特别是生物膜法中微生物固着生长，能够适应低浓度的有机物，故可应用于低浓度污水的深度处理和原水的预处理。

生物接触氧化法是生物膜法的一种形式，是在生物滤池的基础上，从接触曝气法改良演变而来的，该法用于污水的生物处理的设想与传统的活性污泥法和生物膜法一样，历史也非常悠久。人们对自然界中存在着硝化作用和反硝化作用有了较清楚的认识，但在污水处理领域中对硝化作用和反硝化作用的研究始于 20 世纪初，美国韦林（Waring），德国迪特（Ditter）等人就试验研究了生物接触氧化处理污水。1912 年克洛斯（Closs）获得了德国的专利登记。但是，发展为正规的污水处理法，还是德国的贝奇（Bach）和美国的布斯维尔（Buswell）分别在埃姆兴（Emscher）、阿尔巴纳（Albana）处理场实现的。这一方法不仅用于生活污水处理，而且还用于除酚和油脂等工业废水处理。1938 年，在日本的岐阜市亦进行过试验研究。但是，当时在接触填料、氧化池构造与设计、运行管理等方面存在着缺陷，限制了它的进一步推广应用。

一直到 1971 年，日本的小岛贞男从河流自净作用出发，在受污染的给水原水处理研究中，采用蜂窝管式填料，在填料和供氧方式上有了较大的突破。

苏联，20 世纪 70 年代中期在接触曝气池的基础上，研究以砂为填料的接触氧化池（曝气颗粒滤池），用于污水的深度处理。

近 20 年来，国外特别是日本，生物接触氧化技术得到迅速的发展。首先，在使用范围上，不仅用于水体富营养化处理，而且广泛地用于生活污水、生活杂排水和食品加工、水果蔬菜罐头等工业废水处理中。1980 年，日本政府建设省发出通告，将接触氧化法列入在小型污水处理中，首先推荐采用的处理工艺。并且公布了构造准则，使接触氧化技术更加通用化、规范化和系列化，1981 年～1985 年的 5 年间，日本新设置的小型污水处理槽为 154 万台左右，而其中接触氧化法处理槽为 81 万多台，占全部装置的 52.5%，由此可见，接触氧化处理技术在日本的污水处理领域中应用的广泛性。

近年来，随着城市的进一步发展，日本为了保护东京湾、伊势湾、濑户内海等主要水域，保证这些水域的水质不至于恶化，并且有所改善，要求削减由于生活污水的排入而引起的污染负荷。日本 1986 年制定了接触氧化技术的开发研究目标，1988 年 3 月，日本政府建设省又