

生物膜法处理污水

郑元景 沈光范 邬扬善 编著

中国建筑工程出版社



生物膜法处理污水

郑元景 沈光范 邬扬善 编著

中国建筑工业出版社

本书主要介绍污水好气生物处理的有机污染物的种类、有机物代谢机理、生物处理中的传质过程、酶的概念、微生物群体概念、微生物群体动态平衡、生物污泥的培养与驯化、污水的生物可处理性等基本理论，并应用基本理论解释生物处理中的各种现象。

本书还阐述了生物膜法的几种工艺特点，及其设备结构和污水处理的生产实践。

本书可供环境保护、给水排水专业、污水处理等部门的技术人员、研究人员、大专院校师生参考。

生物膜法处理污水

郑元景 沈光范 邬扬善 编著

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：10⁷/₈ 字数：292 千字

1983年12月第一版 1983年12月第一次印刷

印数：1—5,400册 定价：1.75元

统一书号：15040·4558

前 言

生物处理是城市污水和工业有机废水处理的主要方法，在生产上广为采用，对水环境保护、防止水体污染方面起着重要作用。

六十年代以来，随着工农业生产的发展，在我国也广泛开展污水生物处理的工作，进行了大量的科研工作，越来越多的处理构筑物投入生产运行。

我们通过对多年来的生产实践和科研成果的初步总结，参考国内外新的技术成就和著作，对生物处理，主要是好气生物处理中的一些基础理论问题加以探讨、阐述，并力求以这些基本论点解释工艺中常出现的一些现象。希望通过本书和读者一起研究好气生物处理的实质以及工艺选择、工艺控制所应遵循的一些基本原则。在本书中也以一定的篇幅介绍好气生物处理的一些新技术和新工艺。

为了叙述上的方便，本书中把活性污泥和生物膜统称为生物污泥，作为整体进行研究。当叙述涉及它们各自具体情况时，仍分别对待。

鉴于在我国出版物中对活性污泥法处理工艺已有一定的论述，故本书在阐述工艺流程和处理设备时，主要讨论生物膜法的处理工艺，诸如塔式生物滤池、生物转盘、生物接触氧化法和生物流化床。

我们的实践还不多，基础知识也较贫乏，所以本书中缺点和错误在所难免，热忱欢迎读者批评指正。

作者
一九八二年

目 录

前 言

第一章 生物处理发展简史.....	1
第一节 概述.....	1
第二节 生物处理进展.....	9
第三节 生物膜法进展.....	14
第二章 有机污染物.....	17
第一节 化学成分.....	17
第二节 去除过程.....	18
第三节 生物转化.....	20
第四节 传质过程.....	22
第五节 生物分解.....	27
第六节 生物合成.....	32
第七节 酶.....	37
第三章 需氧量.....	55
第一节 需氧量指标.....	55
第二节 各指标间相互关系.....	59
第三节 生化需氧量.....	60
第四章 微生物与生物污泥.....	82
第一节 生物污泥.....	82
第二节 菌胶团与生物絮体.....	87
第三节 微生物在处理中的作用.....	110
第四节 细菌生长曲线.....	134
第五节 生物污泥活性测定.....	144
第六节 微生物群体动平衡.....	171
第七节 生物膜及其生物相.....	179

第八节	生物污泥的驯化与培养	192
第九节	一些微生物技术的应用	199
第五章	生物可处理性能	218
第一节	可生物处理性浅释	218
第二节	可生物处理性研究方法	224
第三节	物质组成和结构与生物分解	243
第四节	生物处理极限允许浓度	246
第五节	提高可生物处理性的途径	247
第六节	合成有机物的生物分解	250
第六章	生物膜法技术	257
第一节	塔式生物滤池	257
第二节	生物转盘	276
第三节	生物接触氧化法	297
第四节	生物流化床	320
主要参考书		343

第一章 生物处理发展简史

第一节 概 述

十九世纪末，在研究土壤净化污水的过滤田基础上，创造了生物过滤法，并在十九世纪末应用于生产。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不断发展已逐步普及，到目前为止，已成为城市污水和工业废水处理的主要方法，在全世界有数以万座计的不同生产规模的生物处理构筑物在运行，其中规模较大者日处理水量达到数百万立方米。随着环境保护工作的开展，生物处理在污水处理中的应用也日益广泛。

水中的污染物质可分为两大类，即有机污染物和无机污染物。这些有机污染物如果来自生活污水，可主要分为碳水化合物、脂类、蛋白质等，它们的组成元素分别为：

碳水化合物、脂类：C、H、O。

蛋白质：C、H、O、N、S。

有限的几种元素C、H、O、N、S，由于不同组合，形成大量的物理-化学性质极不相同的有机化合物。这些复杂的化合物，在物理、化学、生物因素的作用下又转化为简单的化合物。污水生物处理就是利用微生物的生命活动使污水中的有机污染物质矿化。同时，微生物还能氧化一些无机的化合物（如硫化氢、氨、亚硝酸盐等）。由于在处理构筑物中微生物数量多、繁殖快，所以能以较快的速度去除污水中有机污染物。

在生物处理构筑物中有大量的微生物，这些微生物按其在水自然界环境中的地位和所代谢的营养物，按其生态学、生理学的特点是极其不同的。它们的生活、发展条件也十分不同。因此，采

用生物法就有可能从污水中去掉各种各样的有机物。生物处理法不仅应用于处理诸如生活污水、食品工业、造纸工业等含天然有机污染物的污水，而且还广泛应用于处理诸如含酚、氰、农药、石油化工产品的剧毒污水。无疑地，种类繁多的微生物的广泛食性及其代谢的完全性，是生物处理法广泛应用的重要基础，也是它在环境保护工作中日益受到重视的基本原因。

生物处理在保护城市环境和治理工业三废方面起着极其重要的作用。污水生物处理在环境保护上的作用可以归结为以下几方面。

一、改善水的物理-化学和公共卫生指标

通过生物处理可以降低污水的COD、BOD、SS值，去除臭味，降低色度，提高水中溶解氧含量。一般来说，生物处理可以改善水质。我国的嫩江曾因在冬季排入大量有机污水，耗尽江水中的溶解氧，使几百里江段鱼类死亡。英国的泰晤士河也曾因大量有机污水的排入而受到严重污染。对这些有机污水，采用生物处理，可使河流的污染减轻。此外，通过生物处理可以使接受污水的水体，免除臭味和改善水体的外观。

二、使污水中的病菌、病毒基本去除

对于生活污水、城市污水和某些工业废水，去除病菌、病毒具有十分重大的意义。污水中的病原体往往是传染病的重要来源。生物处理构筑物中的微生物可以吞食和降解病菌、病毒，或通过生物絮凝使病菌、病毒浓缩于剩余污泥中，便于进一步的处理。一些研究表明，城市污水通过二级处理可使病菌、病毒去除90~99%。生物处理还为污水的进一步加氯消毒，创造了有利条件。污水的生物处理及处理后污水的消毒，对于防止病原体对水体的污染和大大降低污水灌溉蔬菜和其它食物的病原体污染，对于防止传染病，具有十分重要的意义。

三、去除水中有毒物质

在石油、化工、炼焦、印染等工业废水中含有大量的有机毒物，通过生物处理可以大幅度地降低污水的毒性。例如，丙烯腈

工业废水经生物处理后，对于一些鱼类的毒性可降低99%以上。通过生物对毒物的降解，基本上可以防止工业废水中有机有毒物质对水体的污染。

除上述三方面外，近年来国内、外还研究应用生物处理中的生物膜法处理含有机污染物的废气（臭气），在我国和其他国家已经试验成功，并应用于生产。在给水处理中，在用氯杀菌时，氯能和含碳化合物形成含氯有机物，使水质受到新的污染。近年来一些国家的研究者也研究应用生物膜法对给水水源进行预处理，减少有机污染，改善水味，减少消毒时的加氯量，减轻有机氯对水的污染。

随着城市工业的发展，水环境保护工作日益重要，对排放污水的水质提出更高的要求，过去城市污水经处理后水中的BOD、SS均降至20毫克/升以下的标准，已不能完全满足环境保护的要求，因此近年来不少国家正在研究以生物处理法为基础的补充处理方法，使生物处理构筑物的出水进一步改善。

在一些国家中，水体富营养化是水体污染的重要方面。因此研究生物脱氮的工艺，是为了从污水中消除氮的污染。通过生物处理的硝化和脱氮过程可以从污水中去除氮。

生物处理法之所以成为处理有机污染污水的主要方法，是因为和其它处理方法相比，具有以下优点：

（1）基建投资省，处理费用低，适用于大型污水处理厂

污水生物处理，一般采用好气工艺，对于常见的许多污水，仅需提供足够的溶解氧，故费用较低。即使对于一些缺少微生物所需氮、磷的污水，适当投加氮、磷物质的费用也较低。因此，日常费用主要是电费。处理1立方米BOD₅为200毫克/升的城市污水约耗电0.2千瓦小时。

（2）处理效果良好

经过生物处理污水水质得到全面改善，不仅去除了有机物，病原体、有毒物质，还能去除臭味、提高透明度、降低色度等，改善了水的感官性能。

(3) 不造成二次污染

和一些药剂法相比,生物处理法由于不投加药剂,可以避免对水质造成二次污染。

(4) 过程稳定、较易控制、操作简单

生物处理一般都是在常温下进行,污水往往采用重力流,所以过程稳定、较易控制、操作简单、节省人力。同时还具有相当大的缓冲能力,水质水量在一定范围内的变化也不会引起出水水质的激烈波动,所以出水水质比较稳定。

生物处理法的缺点和局限性,主要有以下几方面:

(1) 在一般好气处理工艺中,常产生较多的剩余污泥,这些剩余污泥的处理,需要较多的投资和运转费用。

(2) 在一般的处理工艺中,出水水质还达不到地面水的水质标准,为了达到较高的水质要求需要进一步处理。

(3) 对于进入构筑物的污水水质,有一定的要求。

生物处理是利用微生物的生命活动处理污水,因此在处理构筑物中必须创造适合相应微生物生长的介质条件。在一般情况下,对水质有以下要求:

1. pH值

对好气生物处理,pH值一般应在6~10之间,好气微生物经驯化后,对pH的适应范围较广,但在生产运转过程中,pH不能突然变动太大,否则影响处理效果。好气生物氧化过程中不断放出 CO_2 ,形成碳酸盐,它具有相当的缓冲能力,因此通过生物处理,水的pH往往朝着中性移动。在一些污水处理中,代谢产物往往对水的pH值产生很大影响,如含氮有机化合物丙烯腈、乙腈等,生物代谢的中间产物是氨氮,使水的pH提高。硫细菌氧化硫化物产生代谢产物硫酸盐,使水的pH值明显下降。因此,可以说,进水pH值的允许范围,在某种程度上取决于所形成的代谢产物。

2. 温度

好气法处理污水,水温一般要求在10~40摄氏度,但经较长

期间驯化后低于10摄氏度或高于40至50摄氏度仍然还有相当的处理效果。水温在20~40摄氏度之间,可以获得较好的处理效果。有些工业废水温度太高,在生物处理前要设法降温。近年来有一些研究者致力于研究在高温下(50~60摄氏度)进行生物处理,但尚未见到应用于生产的报导。

3. 养料

微生物的生长繁殖必须要有各种养料,其中包括碳、氮、磷、硫以及微量的钾、钙、镁、铁和维生素。生活污水和城市污水具有上列的全部养料,而有些工业废水可能缺乏氮和磷,需投加生活污水或氮、磷化合物(如尿素、硫酸铵、磷酸氢二钠等)。对于好气生物处理,BOD与氮、磷养料的比例一般为 $BOD:N:P=100:5:1$ 。氮、磷的投加量与生物处理过程中合成生成的剩余污泥量有关,合成产生的剩余污泥量越多,所需的氮、磷投加量也越多。

4. 有毒物质

多数重金属如铜、锌、铅、铬等离子,对微生物表现出毒性,因此必须控制污水中的重金属离子浓度,防止破坏处理过程。某些非金属物质如酚、甲醛、氰化物等也有毒性,在一定浓度以上能抑制生物处理过程,但在一定浓度以下它们又可以被微生物所分解。毒物毒性的强度随污水的pH值、溶解氧、温度以及其他毒物影响等因素的不同,可有很大差异。不同的生物处理工艺也影响有毒物质的允许浓度。

一些物质进入生物处理构筑物的允许浓度将在本书第五章中介绍。

在处理过程中,如果微生物得到逐步驯化,而又有较适合的环境条件,允许浓度可以提高。例如,在污水中的其它有机物较少,经长期驯化后,水中的硫化物允许浓度可以超过100毫克/升,因为此时在生物污泥中将出现大量的硫细菌,它们能将大量的硫化物转化为硫酸盐。

5. 进水 BOD_5 浓度

好气生物处理构筑物进水 BOD_5 浓度一般宜小于 1000 毫克/升，因为浓度过高，将导致水中缺氧，影响好气过程的进行。允许的浓度与污水处理工艺有关。例如，完全混合工艺，通过增加污水处理构筑物中的停留时间，可以提高进水的允许浓度。 BOD_5 的下限一般对于活性污泥法不宜低于 60 毫克/升，因为 BOD_5 过低很难维持活性污泥的正常工作，而对于生物膜法几乎是没有限制。

生物处理由于所利用微生物的不同，处理工艺分为两大类：好气生物处理与厌氧生物处理。在好气生物处理中应用好气微生物。这些微生物是在水中有溶解氧的条件下，通过好气分解有机物进行处理，处理后，水中的含碳、含氮有机物逐步分解为二氧化碳、亚硝酸盐、硝酸盐和水，即所谓有机物矿化。好气生物处理广泛应用于污水处理，通常所采用的活性污泥法和生物膜法均属此类。厌氧处理是利用厌氧微生物在无氧条件下分解有机物。厌氧分解的产物是甲烷、硫化氢、氨氮、氢和二氧化碳等。厌氧工艺多应用于有机污泥和高浓度有机污水处理。本书将着重讨论好气生物处理过程的有关问题。

好气生物处理工艺按微生物在处理构筑物内的生长形式分为两类：活性污泥法和生物膜法。

在活性污泥法中，污水处于搅动紊流的状态下，微生物以细小的生物絮体存在，微生物与水中的污染物密切接触、吸附和分解污水中的有机污染物。当搅动停止后，细小的絮体絮凝成较大的絮体沉降。在沉淀池中沉降的活性污泥回流至曝气池开始新的循环。活性污泥在分解有机物的过程中，产生剩余污泥，经常从沉淀池中排除。活性污泥法的代表性工艺流程，见图 1-1。这些流程是随着技术的进步和为了适应各种进水水质和出水水质的不同要求，适应各种外界条件的特殊要求而发展起来的。近年来又在图 1-1 所示各种流程的基础上研制了几种新的工艺，如纯氧活性污泥法，深井曝气法和射流曝气法等。这些新工艺的基本原理和图 1-1 所述工艺相似，但由于这些新工艺均突出了活性污泥的

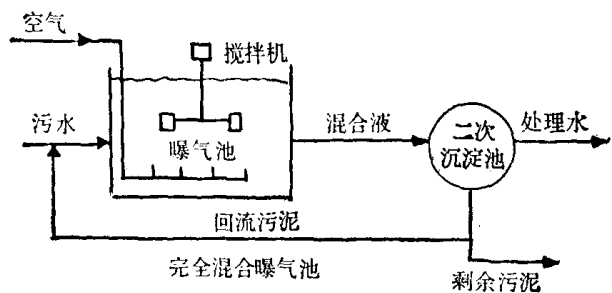
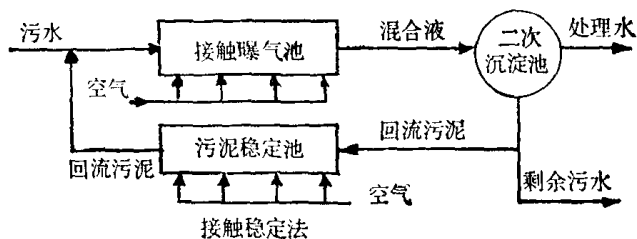
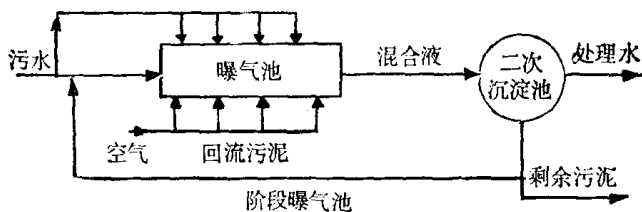
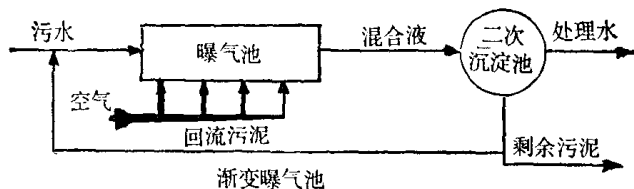
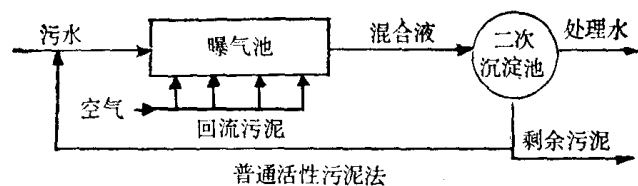


图 1-1 活性污泥法的不同处理流程

充氧过程，或在某种程度上提高活性污泥的活性，而具有较大的处理能力。

在生物膜法中，微生物附着生长在填料的表面，形成胶质相连的生物膜，在处理过程中，水的流动和空气的搅动，使生物膜表面不断和水接触，污水中的有机污染物和溶解氧为生物膜所吸附。生物膜上的微生物不断分解这些有机物。在污水中有机物不断被去除的同时，生物膜本身也不断新陈代谢。衰老的生物膜随处理后的污水从生物处理构筑物中带出，并在沉淀池中分离。最先在生产上获得应用的生物膜法工艺是生物滤池（见图 1-2）。随着科学技术的发展，最近几年生物膜法也获得很大的发展，出现了一些新工艺、新设备，如塔式生物滤池、生物转盘、生物接触氧化法和生物流化床。用以附着生物膜的填料（载体）的种类也有很大的发展。

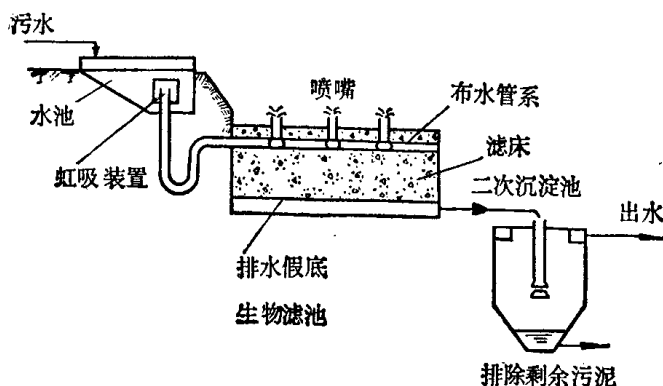


图 1-2 采用固定式喷嘴布水系统的普通生物滤池

在讨论好气生物处理时，本书将着重讨论生物膜法的机理和工艺特点，并介绍几种较新型的生物膜法工艺。

虽然活性污泥法与生物膜法在处理构筑物上有显著的差别，但在微生物对有机物的代谢过程、有机污染物去除动力学、氧的消耗和细胞物质的合成等方面都基本上具有同一规律性，因此本书在研究生物处理的一般规律性时，将这二种工艺放在一起讨论。

第二节 生物处理进展

近几年来,国内外在生物处理方面开展了大量的研究工作,取得不少进展。这些进展主要表现在以下几方面。

一、以普通生物处理法原理为基础,研究高效、低耗的工艺流程

纯氧曝气法、Z—A法 (Zurn-Attisholz process)、深井曝气法、射流曝气法、生物接触氧化法和流化床工艺等均属此类。这几种工艺流程都在不同程度上具有以下特点:单位体积内保持较高的微生物量;微生物代谢速度快,生物污泥活性高;供氧充足;食物(营养)和代谢产物的传质速度快。

纯氧曝气法 氧的利用率高,是此法的突出优点。利用在高浓度溶解氧情况下产生密实的活性污泥,使曝气池内的活性污泥浓度达5~7克/升,比普通曝气池提高2~3倍。但一般工艺参数如 F (食物量)/ M (微生物量)、负荷与出水BOD关系等。基本上仍与普通曝气池相同。

世界第一座生产性纯氧曝气池采用密闭池子,在每格池子安装氧气扩散装置和搅拌器,设备复杂,维护不便。目前趋向研究敞开式的纯氧曝气池,如已出现的跌水曝气、超微气泡曝气、锥体曝气和FMC公司的泡沫扩散器等,均属此类。敞开式的纯氧曝气池,管理简单,维护方便,利于改建现有曝气池。

Z—A法 是一种二段活性污泥法,它的特点是把处理过程分为“粗制”和“精制”两道工序。在第一段内利用兼气性的细菌,以节约动力消耗。通过适当延长沉淀时间,增加回流污泥的浓度,第一段曝气池内的污泥浓度达8~15克/升,从而缩短曝气时间,BOD负荷大约为10公斤/米³·日,BOD去除率为80~85%。在第二阶段,曝气池内污泥浓度为500~1000毫克/升,BOD负荷为3.3公斤/米³·日。

深井曝气法 根据亨利定律,气体在水中的溶解度与分压有

关, 采用深井曝气可使氧的转移率大幅度提高, 每度电可充氧 6 公斤, 从而节约了动力消耗。

射流曝气法 以高速流体(活性污泥和污水的混合液), 在射流器喉管处与吸入的空气混合, 发生激烈的充氧和传质。研究表明, 被击碎的活性污泥具有较高的活性, 从而提高设备的处理能力, 缩小构筑物体积。

生物接触氧化法 从充氧的观点来看, 装有填料的接触氧化池, 可以看作是化工设备中的填料塔, 在填料下曝气, 既提高了氧的利用率, 又增大了单位体积的充氧量, 为实现污水处理高负荷创造了条件。对于不同的水质(主要指不同的充氧系数), 采用适宜的有机负荷, 可以节约动力消耗。由于微生物量大, 新陈代谢较快, 活性高, 使设备处理能力有较大的提高。在普通活性污泥法中, 受到F/M与出水BOD比值的限制, 一般使出水 BOD 小于10毫克/升比较困难, 但在生物接触氧化法中, 这种制约关系被打破了。从这个意义上说, 生物接触氧化法可以将低浓度污水中的有机物进一步分解, 达到较深处理程度。

流化床工艺 微生物附着在细砂、活性炭等载体的表面, 载体在床内呈流化状态。巨大的表面积使单位体积内保持较高的微生物量, 污泥浓度可达 10~40克/升, 从而使负荷较普通活性污泥法提高10~20倍。高速的氧化, 要求有高速的供氧。美国Hy-Flo 工艺由于采用锥体曝气充氧和Sweco脱膜机, 从而可能取消二次沉淀池, 在快速、高效方面达到新的水平。

总之, 上面所列举的几种工艺流程, 都在一定范围内比一般活性污泥法有所提高(如曝气池内污泥浓度和出水水质)。但其基本原理和生物介质的生态学特点以及主要关系式, 仍然与普通活性污泥法、生物膜法相同。应当指出, 在生物法工艺改进中出现的一种新动向是把活性污泥法与生物膜法结合在一起, 吸取活性污泥法有巨大固液接触面积和生物膜法有微生物固定生长的优点, 克服活性污泥法受回流污泥浓度和生物膜法固液交界面的限制。

二、以生物处理为基础，投加助剂，提高净化能力的工艺流程

把生物-物理-化学法结合起来，是污水处理技术发展的趋势之一，也是提高原有曝气池处理能力的经济、简便而有效的方法。炭-生物法、生物-化学法，就是属于这个类型。

炭-生物法 此法正确地利用了活性炭巨大比表面积的吸附性能和微生物氧化有机物的能力，并使二者互相依赖共同促进。国外从七十年代初开始研究，国内近年才开始探索，目前这项技术还属于初期发展阶段，并在实践中出现了多种形式。如粉末活性炭活性污泥法、活性炭流化床、膨胀床、固定床等。活性炭的吸附性能使微生物的外酶和有机污染物在固-液面上浓缩，较高的外酶和有机物浓度造就了较高的氧化速度，打破了原有浓度平衡的界限。而且生物氧化亦使活性炭表面的吸附能力得到一定程度的恢复，至少可延长炭的使用期限。炭-生物法具有负荷大、有机物去除率高、出水水质好、能改善污泥沉降和脱水性能、增加污泥的产气量等优点。从国外的资料看，在生物法中使用活性炭所增加的费用不多，故已在生产上逐渐推广使用。

生物-化学法 普通的生物法对污水中的磷、氮及金属元素去除很少，对一些分子量大的有机氯、有机磷、多环有机化合物处理效果比较差，而化学法却能弥补生物法的这些不足，改善处理过程，使出水水质稳定。常用的化学混凝剂有硫酸铝、铁盐、石灰等。如有些废料（象钢铁厂酸洗废液和铝灰等）可资利用，将降低处理费用。从发展看，采用高速的生物-化学联合处理工艺，即先用生物处理去除水中可溶的 BOD，再用化学混凝沉淀和过滤去除固体絮凝物和磷酸盐，此工艺是有前途的处理方法。

三、改进生物处理后泥水分离技术

泥水分离是生物处理的重要组成部分，分离的好坏，直接影响处理水质。过去，一般采用重力沉降分离，既费时又占地。为了提高负荷，有在二次沉淀池中加设斜板，改革较大的是在流化床工艺中采用机械脱膜的办法，免去了二次沉淀池。近年来，国