



环境微生物学

Environmental Microbiology

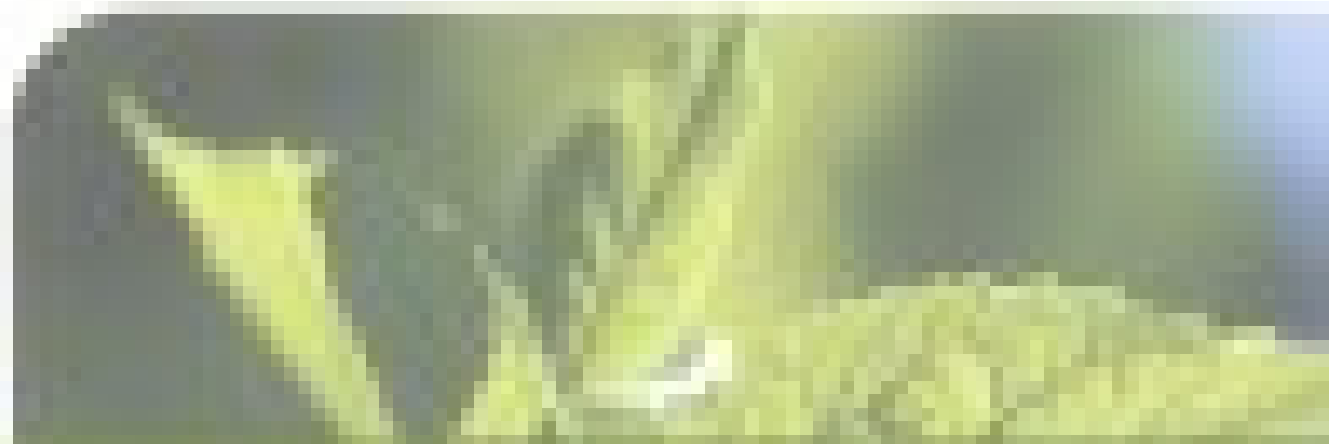
主编 张甲耀 宋碧玉 陈兰洲 郑连爽

下册



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



环境微生物学

Environmental Microbiology

主编 刘建峰 副主编 张永成 张永成 张永成

15



中国环境出版社
CHINA ENVIRONMENTAL PUBLISHING HOUSE

环境微生物学

Environmental Microbiology

主编 张甲耀 宋碧玉 陈兰洲 郑连爽



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

目 录

第九章 污染介质生物处理的微生物学原理	1
第一节 污水好氧生物处理	1
一、污水生物处理的基本原理	1
二、好氧活性污泥法	2
三、生物膜法	12
第二节 污水厌氧生物处理系统	16
一、厌氧生物处理的基本原理	17
二、厌氧处理中的微生物及其相互关系	17
三、厌氧生物处理的控制条件	20
四、厌氧生物处理工艺	21
第三节 污水脱氮除磷生物处理系统	25
一、生物脱氮处理系统	26
二、生物除磷系统	30
第四节 污水生态工程处理系统	34
一、生态工程的概念	34
二、污水生态工程处理系统	34
第五节 微污染饮用水源水(水源水)生物处理系统	42
一、微污染水源水的水质特征	43
二、微污染水源的生物预处理系统	43
三、微污染水源水的生物深度处理工艺	45
第六节 饮用水的微生物去除及消毒	47
一、水中的病原微生物	47
二、水处理过程——混凝、沉淀和过滤技术对微生物的去除	57
三、饮用水的消毒	58
第七节 固体废弃物的生物处理与资源化技术	66
一、有机固体废弃物的堆肥(composting)技术	67
二、有机固体废弃物的厌氧发酵	71
三、有机固体废弃物的卫生填埋	73
四、有机固体废弃物的生物处理和资源化新技术	75
第八节 气态污染物的生物处理系统	76
一、微生物净化气态污染物的原理	76
二、废气生物处理系统	76

第九节 污染控制中生物强化及微生物菌群的选育	81
一、生物强化	81
二、微生物菌群的选育	86
第十章 污染环境的生物修复	87
第一节 生物修复概述	87
一、生物修复技术的产生和发展	87
二、生物修复的典型个例	88
三、生物修复的优势	89
四、生物修复的基本原理	89
五、生物修复工程项目的可行性分析	92
六、生物修复过程的强化	93
七、生物修复中的生物强化	94
八、阻碍生物修复成功的因素及风险评价	100
第二节 生物修复工程的主要处理方法及其发展方向	102
一、处理方法	102
二、生物修复技术的发展方向	112
第三节 污染土壤的生物修复	113
一、适于原位修复的污染土壤	113
二、需要异位处理的污染土壤	114
三、可用原位-异位相结合处理的污染土壤	114
第四节 污染水体及淤泥的生物修复	114
一、适于原位修复的污染水体	114
二、需要异位强化的污染水体	115
三、需要原位-异位相结合强化处理的水体	115
第五节 白腐真菌的生物降解及其在生物修复中的应用	115
一、白腐真菌对木质素及类似有机污染物的生物降解	116
二、白腐真菌降解有机污染物用于生物修复的特点	121
三、白腐真菌生物修复中应用	122
第十一章 微生物与金属污染	124
第一节 微生物与金属的相互作用	124
一、微生物对金属的依赖性	124
二、金属对微生物的毒性效应	126
三、微生物对金属的抗性和解毒机制	129
四、微生物对金属的积累与转化	131
五、环境中金属的生物可利用性	132
第二节 汞的微生物转化	133
一、生态环境中的汞循环	133

二、汞的微生物转化	134
第三节 其他重金属的微生物转化	140
一、砷的微生物转化	140
二、硒的微生物转化	144
三、碲的微生物转化	145
四、铅的微生物转化	145
五、锡的微生物转化	146
六、镉的微生物转化	146
七、铬的微生物转化	146
第四节 含金属污水的生物处理技术	149
第五节 金属污染生态环境的生物修复方法	150
第十二章 微生物的生理生化过程与环境污染	154
第一节 微生物产生的环境污染物	154
一、含氮化合物	154
二、硫化物	155
三、甲基汞 (methylmercury)	155
四、简单的碳化合物	156
五、气味代谢物	156
六、毒素	157
第二节 微生物与酸矿水的产生	157
第三节 水体富营养化	158
一、富营养化水体的特点	159
二、富营养化的影响和危害	159
三、富营养化的评价	161
四、富营养化的成因	162
五、富营养化的控制	162
第四节 生物霉腐与微生物毒素	163
一、微生物产生的霉腐	163
二、微生物与金属腐蚀	165
三、微生物产生的毒素	167
第十三章 污染环境的微生物监测	174
第一节 有毒有害有机污染物对微生物的毒性效应	174
一、有机污染物对微生物的主要作用	174
二、有机污染物对微生物产生的毒性效应	175
第二节 污染压力下的微生物活性及群落结构	176
一、异养菌数量	176
二、物种多样性	177

三、群落结构	177
四、代谢功能	177
第三节 微生物对环境污染物的生物富集	178
第四节 污染环境的微生物监测	180
一、环境污染的指示微生物	180
二、致突变污染物的微生物检测	186
三、污染物生物毒性的微生物检测——发光细菌的微毒检测法	187
四、微生物监测技术的新发展	189
第十四章 环境微生物技术	194
第一节 生物能源	194
一、生物产氢	194
二、微生物产甲烷	196
三、有机废弃物的乙醇发酵	200
第二节 可生物降解塑料 PHAs	203
一、PHAs 的结构与性能	203
二、产 PHAs 的微生物	204
三、PHB 的生物合成	204
四、PHB 的生物降解	205
五、PHAs 的应用前景	205
第三节 生物絮凝剂的开发与应用	206
一、生物絮凝剂产生菌的种类与培养条件	206
二、生物絮凝剂的种类与特性	208
三、生物絮凝剂的絮凝机理	209
四、生物絮凝剂的应用	210
五、前景展望	212
第四节 生物表面活性剂的开发与应用	212
一、生物表面活性剂的种类与性质	212
二、生物表面活性剂的生产方式	214
三、生物表面活性剂的应用	216
四、问题和展望	218
第五节 细菌浸矿	218
一、细菌浸矿的生态学原理	219
二、细菌浸出机理	220
三、影响细菌浸出率的因素	221
四、细菌浸矿的应用	223
五、展望	225
第六节 化石燃料的微生物脱硫	225
一、脱硫微生物的种类及其生理特性	225

二、微生物脱硫的机理	227
三、煤炭的微生物脱硫	229
四、展望	231
第十五章 环境微生物学与现代分子生物学技术	232
第一节 传统环境微生物研究技术	232
一、环境样品采集和处理	232
二、环境微生物的显微观察和计量	235
三、分离计数环境中微生物的培养方法	238
四、环境样品微生物活性的测定	242
第二节 与环境微生物学研究相关的分子生物学技术	248
一、从环境中获取微生物核酸	248
二、基因探针和探针探测 (gene probes and probing)	251
三、聚合酶链反应 (polymerase chain reaction, PCR)	254
四、重组 DNA 技术 (recombinant DNA techniques)	259
五、限制性片段长度多态性 (restriction fragment length polymorphism analysis, RFLP) 分析	260
六、变性温度梯度凝胶电泳 (denaturing/temperature gradient gel electrophoresis)	263
七、质粒分析 (plasmid analysis)	263
第三节 分子生物学技术在环境微生物研究中的应用	265
一、研究生态环境中微生物的群落组成、结构及其多样性	265
二、检测环境样品中功能基因存在及其表达	267
三、研究环境中微生物的生理活性	267
四、监测环境中特定微生物的存在及其动态	267
五、研究微生物的系统发育及序列的变化	268
第四节 降解型基因工程菌的构建及应用	268
一、面对难降解环境污染物的历史性选择	268
二、降解型基因工程菌的构建	270
三、基因工程菌在生物修复等净化过程中的释放和问题	278
四、GEM 用于生物修复过程的监测和控制	280
五、基因工程在原位生物修复等污染控制系统中使用的风险与防护	280
第五节 免疫检测的应用	282

第九章 污染介质生物处理的微生物学原理

微生物繁多的种类、复杂的营养类型、极大的代谢能力以及高度的变异性和适应性，使之在利用各种污染物，去除有害物质甚至废物资源化方面显示出巨大的潜力。微生物代谢类型的多样性，使得环境中存在的各种天然有机化合物，几乎都可以找到能使之降解或转化的微生物，自然环境中原本不存在的人工合成化合物，则因微生物的易变性，可形成诱导酶或新的突变株产生新的代谢功能也能得到降解。生物处理实际上是一生物降解过程，是在人工强化条件下利用微生物的新陈代谢活动将污染介质中的复杂有机污染物分解，转化为简单、稳定、对环境无害的无机物，从而使环境得到净化的过程。目前，以微生物为主体的生物处理方法已广泛用于去除废水、废渣、废气中的溶解及胶体有机物质以及一些有害无机气体物质，是水、大气和固体废弃物污染控制的最重要手段。

第一节 污水好氧生物处理

污水处理是利用各种技术，将污水中的污染物分离去除或转化为无害物质，从而得到净化的过程。有物理、化学和生物处理三大类方法。其中，生物处理法投资少、成本低、工艺简单、运行方便、环境友好，既能彻底降解污染物又不产生二次污染，成为当前生活污水和工业废水处理的最重要手段而得到广泛应用。在实际应用中，物理、化学和生物处理方法往往结合使用，以去除有机物为主要目标的二级处理以及以脱磷、除氮为目标的深度处理一般都采用生物处理技术。

生物处理方法很多，根据微生物对氧气的需求，可分为好氧法和厌氧法两大类；根据微生物在构筑物中的生长状态，又分为活性污泥法和生物膜法，前者微生物悬浮生长，后者则附着生长。好氧生物处理是在有氧条件下，利用好氧和兼性厌氧微生物的作用来进行的，微生物在构筑物中或悬浮生长或附着生长。微生物悬浮性生长的好氧处理系统有氧化塘（沟）和各种活性污泥反应器，前者较接近自然生态系统，用于土地资源不太紧缺的地区以及用作三级深度处理，可有效去除氮、磷；后者则广泛用于生活污水及工业废水处理。微生物附着生长的好氧处理系统则是各种类型的生物膜法，如生物转盘、生物滤池等。

好氧生物处理方法因所需时间短、物质分解彻底、无臭气等优势，得到广泛应用。特别是各类好氧的活性污泥处理技术应用最广泛，全世界的生活污水处理大约有 80% 都是通过该法实现的。生物膜法则主要用于处理规模不太大的场合。

一、污水生物处理的基本原理

水体自净（self-purification）是指天然水体受到一定量（不超过其自净容量）的污染

后，在没有人干预的条件下，借助水体自身的物理、化学和生物降解作用，自动清除污染物，使本身得以净化，水质回复污染前的水平和状态的自然现象。水体的自净容量是指该水体能自我净化的污染物的最大数量。水体自净过程主要包括稀释、沉降、扩散等物理作用，絮凝、氧化、还原、分解等化学作用和生物降解（或称生物净化）作用。其中，以微生物为工作主体的生物降解作用是水体自净的根本动力。微生物在生命活动过程中将污染物作为营养摄取，通过代谢活动将其分解为简单有机物和无机物以获取生命活动所需的能量和合成细胞成分所需的物质，微生物得以生长繁殖，同时有机污染物被分解转化为相对稳定的小分子无机物质。有机污染物生物降解的终产物为 CO_2 、 H_2O 、 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等。

污水生物处理是在人工强化条件下，天然水体生物自净原理的具体应用，是利用微生物的新陈代谢活动使废水得以净化的过程，通过人为创造适宜微生物生命活动的各种条件，使微生物高浓度密集生长在特定的构筑物（即污水生物处理装置）中，充分利用微生物的作用，高效率地分解、转化污水中的污染物。在污水生物处理装置中微生物具有很强的吸附和氧化分解有机物的能力，又具有良好的沉降性能，污水经处理后在其后的沉淀过程中进行泥水分离，微生物沉入污泥，上清液则为澄清水作为出水排走，从而使污水得到净化。

各种生物处理构筑物中的微生物均为混合群体，基本上包括了微生物的所有类群。细菌和其他微生物因营养联系构成以碎屑食物链为主的复杂的食物网，起氧化有机物作用的主要是细菌，但废水的降解是所有微生物共同作用的结果，微生物群落与理化环境构成一完整的生态系统，其间各类微生物相互作用从而实现废水的净化。

二、好氧活性污泥法

活性污泥法自 1914 年在英国由阿登（E. Arden）和洛基特（W. T. Lockett）创始以来已经有近一个世纪的历史，在城市污水和工业废水的处理中得到了广泛运用。

活性污泥法是利用含有大量好氧和兼性厌氧微生物的活性污泥，采用人工曝气的手段，使得活性污泥均匀分散并悬浮于反应器中，同废水充分接触，利用微生物的代谢作用去除水中的有机污染物。该法通常作为二级处理，接纳从初级沉淀池的来水进行需氧生物氧化处理，主要降解溶解和胶体有机物。

1. 活性污泥的组成及性质

活性污泥（activated sludge）是指由多种好氧和兼性厌氧微生物（兼有少量的厌氧微生物）与污水中的有机和无机固体物混凝交织在一起，形成的絮状体或绒粒（floc），静置时能凝聚成较大的绒粒而沉降。活性污泥具有很强的吸附、氧化分解有机物的能力。

活性污泥外观上呈黄褐色，有时亦呈深灰、灰褐、灰白等色，含水率在 99% 左右，颗粒大小为 $0.02 \sim 0.2 \text{ mm}$ ，表面积为 $20 \sim 100 \text{ cm}^2/\text{ml}$ ，相对密度为 $1.002 \sim 1.006$ 。呈弱酸性（pH 值约为 6.7），对进水 pH 的变化有一定的承受能力。

2. 活性污泥中的微生物群落及其在净化污水中的功能

活性污泥结构和功能的中心是菌胶团。菌胶团是活性污泥的基本成分，是一些具有荚膜或黏液层，能起絮凝作用的细菌相互聚集由公共荚膜包围所成的细菌集团。菌胶团上吸附有大量碎屑、有机颗粒，菌胶团的表面生活着各种各样的微生物。菌胶团不但具有很强的生物吸附和氧化分解有机物的能力，还为其他微生物提供了良好的生存环境和附着、摄食场所，原生动物、微型后生动物有的固着生活在其表面，有的在其上爬行、穿梭取食，大大提高了

微生物的摄食和分解效率。此外,菌胶团还可指示活性污泥的性能,菌胶团生命力旺盛,吸附和氧化能力强,老化的菌胶团颜色深,结构松散,吸附和氧化分解能力差,一旦菌胶团被破坏,则有机物的去除能力大为降低。

活性污泥的微生物相十分复杂,除大量细菌外,还有一定量的原生动物、霉菌、酵母菌、放线菌、单细胞藻和某些微型后生动物如轮虫、线虫、寡毛类等。由于不断人工充氧和污泥回流,个体较大、生命周期长的微生物较难存活。

(1) 细菌(真细菌、古细菌)

活性污泥中的微生物主要由细菌组成。细菌是污水处理中最重要的一类微生物,是去除污水中有机污染物的主力军,其数量可占污泥中微生物总量的90%~95%,密度为 $10^8 \sim 10^9$ 个/ml。活性污泥中的细菌主要是菌胶团细菌和丝状细菌,它们构成了活性污泥的骨架。

活性污泥中出现的细菌种类很多,主要有假单胞菌(*Pseudomonas*)、动胶菌(*Zoogloea*)、产碱杆菌(*Alcaligenes*)、黄杆菌(*Flavobacterium*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)、埃希氏菌(*Escherichia*)、微球菌(*Micrococcus*)、葡萄球菌(*Staphylococcus*)、甲烷杆菌(*Methanobacterium*)、甲烷八叠球菌(*Methanosarcina*)、甲烷球菌(*Methanococcus*)、无色杆菌(*Achromobacter*)、气杆菌(*Aerobacter*)、节杆菌(*Arthrobacter*)、亚硝化单胞菌(*Nitrosomonas*)、贝氏硫细菌(*Beggiatoa*)、不动细菌属(*Acinetobacter*)、球衣菌属(*Sphaerotilus*)、大肠菌属(*Coliform*)、八叠球菌(*Sarcina*)、诺卡氏菌属(*Nocardia*)、蛭弧菌属(*Bdellovibrio*)等。

活性污泥絮凝体中以无色杆菌属、黄杆菌属、假单胞菌属和产碱杆菌属占优势,主要种类有生枝动胶菌 *Zoogloea ramigera*、蜡状芽孢杆菌 *Bacillus cereus*、中间埃希氏菌 *E. intermedia*、粪产气副大肠杆菌 *Paracolobacterium aerogenoides*、放线形诺卡氏菌 *Nocardia actinomorpha*、假单胞菌属 *Pseudomonas*、产碱杆菌属 *Alcaligenes*、黄杆菌属 *Flavobacterium*、大肠杆菌 *E. coli*、产气气杆菌属 *Aerobacter aerogenes*、变形菌类 *Proteus* 等。另外,硝化细菌、球衣细菌、贝日阿托氏菌、发硫菌等也很常见。

好氧活性污泥中的细菌大多包含在胶质中,以菌胶团的形式存在。胶质是菌胶团形成菌分泌的蛋白质、多糖及核酸等胞外聚合物。在活性污泥形成初期,细菌多以游离态存在,随着活性污泥的成熟,细菌增多并聚集成菌胶团,进而形成活性污泥絮状体(floc)。菌胶团的形状有球形、蘑菇形、椭圆形、分枝状、垂丝状及不规则形。典型的菌胶团细菌是动胶菌,如生枝动胶菌(*Zoogloea ramigera*)和垂(悬)丝动胶菌(*Zoogloea filipendula*)。

菌胶团在污水处理中的作用主要表现在:①有很强的生物吸附能力和氧化分解有机物的能力。一旦菌胶团受到各种因素的影响和破坏,则对有机物去除能力明显降低,甚至无去除能力;②菌胶团对有机物的吸附和分解,通过去除毒物、提供食料、升高溶解氧等途径,改善了污水中的环境条件,为原生动物和微型后生动物提供了良好的生存环境;③为原生动物和微型后生动物提供附着场所;④具有指示作用:通过对菌胶团的颜色、透明度、数量、颗粒大小及结构的松紧程度可衡量好氧活性污泥的性能。例如新生菌胶团颜色浅、无色透明、结构紧密,则说明菌胶团生命力旺盛,吸附和氧化能力强,即再生能力强。老化的菌胶团颜色深、结构松散、活性不强、吸附和氧化能力差。

活性污泥中还有一些丝状细菌(filamentous bacteria)。常见的丝状细菌主要有球衣菌(*sphaerotilus*)、铁细菌(*Crenothrix*)、贝日阿托氏菌(*Beggiatoa*)和发硫菌(*Thiothirix*)等。丝状细菌不分枝或有假分枝。丝状菌在污(废)水处理中作用重要而独特。在正常的污水

生物处理系统中,这些丝状菌与菌胶团细菌形成互惠关系,或附着在菌胶团上,或与菌胶团交织在一起,成为活性污泥的骨架。这种结构性的丝状细菌对维持污(废)水处理系统稳定性,提高系统抗冲击负荷能力有重要意义。丝状细菌对污染物质的降解也有一定的积极作用,如球衣菌对有机物的分解氧化能力相当强;硫磺细菌能将水中硫化氢氧化为硫,并以硫粒形式存在于菌体内,当水中溶解氧高时(大于1mg/L),体内硫粒可进一步氧化而消失。但丝状细菌过度繁殖,特别是游离于菌胶团之外的非结构性丝状细菌的大量繁殖,会引起污水处理系统的污泥膨胀。

(2) 放线菌

放线菌(Actinomycete)是原核微生物,形态为具有分枝的丝状体。大多数放线菌都是好氧性的,革兰氏染色呈阳性,利用有机物提供碳源和能源。生长最适pH值为7~8,最适的温度为25~30℃。放线菌中的一些种类在污水处理中具有特殊的作用,如诺卡氏菌(*Nocardia*)能分解氧化无机氰化物和烃类化合物,在处理含烃类和无机氰化物的污(废)水中起着重要的作用。

(3) 原生动物

原生动物的重要性仅次于细菌,起净化水质和指示生物的作用。

原生动物一般是好氧性的,主要附聚在活性污泥的表面。活性污泥中的原生动物密度为5000~20000个/ml,已鉴定的种类大约有300种,纤毛虫最多,另有一定量的肉足虫和鞭毛虫。原生动物种类繁多,营养类型复杂,渗养性种类如一些小的裸肉足虫可以利用溶解有机质,吞噬性种类可取食有机颗粒、细菌等,有的能取食藻类,还有的以捕食为生,取食细菌甚至其他原生动物。

活性污泥中常见的原生动物如波多虫 *Bodo*、滴虫 *Monas*、变形虫 *Amoeba*、简变虫 *Vamp-kampfia*、表壳虫 *Arcella*、草履虫 *Paramecium*、肾形虫 *Colpoda*、豆形虫 *Colpidium*、漫游虫 *Lionotus*、尖毛虫 *Oxytricha*、盾纤虫 *Aspidisca*、游仆虫 *Euplotes*、钟虫 *Vorticella*、累枝虫 *Epistylis*、盖纤虫 *Opercularia*、聚缩虫 *Zoothamnium*、足吸管虫 *Podophrya*、壳吸管虫 *Acineta*、锤吸管虫 *Tokophrya* 等。

原生动物在污水生物处理的作用有以下几方面:

① 通过促进絮凝和沉淀作用,间接提高了出水水质:原生动物通过分泌一些物质,促进絮凝和沉淀。污水生物处理中主要靠细菌起净化和絮凝作用。但有的细菌需要一定量的原生动物存在,由原生动物分泌一定的黏液协同和促使细菌发生絮凝作用。如有些纤毛虫能分泌多糖类物质促进菌胶团的形成以及活性污泥的絮凝,加大了其沉降性,从而改善活性污泥的泥水分离特性,使出水更加澄清;一些固着型种类如钟虫等的尾柄可以分泌黏液,这些黏性物质会使沉降加速,促进生物絮凝。此外,固着型纤毛虫本身有沉降性能,加上和细菌形成絮体,更完善了二沉池的泥水分离作用。

② 净化作用:首先,原生动物可直接取食有机物质,净化水质。原生动物中的渗养性种类如一些小鞭毛虫和肉足虫可通过渗透作用直接吸收废水中的溶解性有机物质,其他动物性营养种类可吞食有机碎屑、颗粒、细菌以及其他微生物,直接对水质起净化作用。其次,原生动物可通过对细菌的取食提高出水水质。原生动物对游离性细菌的捕食可明显改善出水水质,使出水更澄清。取食活动还有助于菌胶团细菌维持合理的数量和活力,刺激细菌群体的生长繁殖,从而增加污泥沉降性,便于泥水分离,提高水处理效率。原生动物和微型后生

动物吞食食物是无选择性的，它们除吞食有机颗粒外，也吞食菌胶团，原生动物的吞食量不影响整体的净化效果，不会危及净化作用。相反，原生动物尤其是纤毛虫的存在，对出水水质有明显改善。实验表明，人为去除了纤毛虫的生物处理系统，出水始终浑浊。

③ 指示作用：原生动物作为单细胞真核生物，对环境变化极为敏感，加上个体较细菌大得多，在光学显微镜下可以方便地分类鉴定，因此原生动物在污水处理过程中能起指示生物的作用。

不同种类的原生动物对环境条件的要求不尽相同，随污水处理进程有明显的种类演替，如在水体自净过程中，水体理化条件和可利用的营养物质均发生变化，原生动物因对环境条件的要求及营养方式的不同，随着污水净化和水体自净程度的提高，相应出现不同种类。

水体自净过程中，原生动物演替的一般规律是渗养性种类如小鞭毛虫和裸肉足虫——菌食性的鞭毛虫和肉足虫——全毛类纤毛虫——下毛类纤毛虫——固着型纤毛虫。

在污泥培养和系统运行过程中，原生动物和微型后生动物出现的先后顺序是：以溶解和颗粒有机质为生的小肉足虫和鞭毛虫→食细菌的鞭毛虫、肉足虫→游泳型全毛类纤毛虫→游泳型下毛类纤毛虫、吸管虫→固着型纤毛虫、有壳肉足虫→轮虫等后生动物。

此外，当环境条件改变时原生动物的个体形态和生长状况会发生变化。例如，当溶解氧不足时，钟虫（*Vorticella*）的虫体出现气泡，尾柄脱落，虫体变长，最后变为胞囊，甚至解体死亡。

在水处理实践中，可通过出现的原生动物种类组成特别是优势种类判断水处理程度或活性污泥成熟程度，以及原生动物的活动状况如个体形态、生长是否正常来判断进水水质变化及系统运行状况。一般认为，在活性污泥处理过程中，当曝气池中出现大量钟虫等固着型纤毛虫时，说明污水处理运转正常，处理水质良好；当出现大量鞭毛虫、根足虫等时，说明运转不正常，处理水质变差；系统运行正常时，原生动物形态、活动正常，反之，如细胞行动缓慢、细胞内空泡增多、钟虫口纤毛盘凹陷甚至脱落、虫体死亡、形成胞囊等，则表示可能进水中含有有毒物质、供氧不足或有其他冲击负荷。

原生动物和微型后生动物在活性污泥培养过程中具有指示作用，它们与活性污泥培养成熟程度之间的关系为：在活性污泥培养初期，主要出现小鞭毛虫、变形虫；活性污泥培养中期主要是游泳型纤毛虫、鞭毛虫；而在活性污泥培养成熟期，则出现钟虫等固着型纤毛虫、楯纤虫等下毛类纤毛虫，以及轮虫等后生动物。

(4) 微型后生动物

后生动物的作用与原生动物相仿。它们一般在固着型纤毛虫之后出现，这些个体大的微生物可取食碎屑、细菌、原生动物和其他微型后生动物，增加活性污泥的沉降性能等，故它们的存在可进一步提高水质。但线虫的大量出现则预示系统缺氧。活性污泥中常见的后生动物是轮虫、线虫和瓢体虫。轮虫取食游离细菌、有机物颗粒或碎屑。轮虫在系统运行正常时期，一般在有机物含量较低、出水水质良好时才会出现，故轮虫的存在说明处理效果较好。但有时污泥因泥龄较长、负荷较低、缺乏营养而老化解体时，轮虫可因污泥碎屑增多而大量增殖。这时，轮虫的出现则是污泥老化解絮的标志。活性污泥中常见的轮虫如玫瑰旋轮虫 *Philodina roseola* 和猪吻轮虫 *Dicranohorus*。

(5) 其他微生物

活性污泥中的真菌主要为霉菌和少量酵母菌。已报道的霉菌有毛霉属、根霉属、曲霉

属、青霉属、镰孢霉属、枝孢霉属、木霉属、地霉属等。霉菌的出现与水质有关,常出现在 pH 值偏低的污水中。霉菌与絮状体的形成和污泥膨胀均有关系,一定条件下(如低 pH 值、高糖)会引起霉菌性污泥膨胀。活性污泥中偶尔可见少量单细胞藻类,但因曝气池中浊度高影响光线透入,故藻类在其中难以繁殖,为数很少。此外,活性污泥中还混有病毒、立克次氏体等,但都不是活性污泥的主要组分。

(6) 氧化塘中的微生物群落特征

氧化塘可以视为特殊的活性污泥系统。氧化塘一般用于三级深度处理,用以处理生活污水和富含氮、磷的工业废水。与常规活性污泥法相比,氧化塘中的微生物多样性更高,特别是藻类,种类和数量都大得多。氧化塘中的微生物群落与天然湖泊生态系统类似,水体中主要有细菌、藻类、原生动物和微型后生动物,在底泥中则有底栖生物,包括原生动物、线虫、寡毛类以及水生昆虫的幼虫等。

氧化塘主要是靠异养细菌和藻类来完成净化作用的,二者是典型的互生关系:细菌利用水中的溶解氧,将有机物氧化分解为 H_2O 、 CO_2 、 NH_3 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 等为藻类提供光合作用所需物质;藻类利用 H_2O 和 CO_2 进行光合作用合成碳水化合物,再吸收 NH_3 和 SO_4^{2-} 合成蛋白质、吸收 PO_4^{3-} 合成核酸,并繁殖新藻体,光合作用释放出的氧气则为细菌代谢所用。

3. 活性污泥法的微生物学过程

由于活性污泥的比表面积大,吸附能力强,废水进入曝气池与活性污泥充分接触后,其中有机物在 1~30min 的短时间内可被吸附到活性污泥上。大分子的有机物先被细菌的胞外酶分解成为较小分子化合物,然后被摄入细菌体内,低分子有机物可直接吸收。废水中的溶解性有机物直接被细菌吸收,而固体及胶体有机物则先附着在微生物体外,由胞外酶分解为溶解性物质,再渗入细胞,在细菌体内氧化分解。在微生物的胞内酶作用下,有机物的一部分被同化形成微生物有机体,另一部分转化成 H_2O 、 CO_2 、 NH_3 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 $-SO_4^{2-}$ 等简单无机物及能量释出。值得指出的是,活性污泥法的微生物学过程是一个复杂的过程,其中包括一系列的微生物酶引起的复杂生化反应,是多种微生物连续协同作用的结果。

4. 活性污泥法的控制条件

养料:水中 BOD_5 :N:P 以 100:5:1 为适宜,最低要求是 100:2:0.5 (均为质量比)。为解决养料不平衡的问题,可以通过投加粪尿或将生活污水与工业废水混合处理。同时,还要考虑污水中所含有机物浓度。有机物浓度过高微生物难以适应或感到供氧不足,同时出水有机物浓度也会相应提高。浓度过低,微生物营养缺乏也会影响处理效果。一般好氧生物处理进水有机物浓度 BOD_5 不宜超过 500~1000mg/L,不低于 50~100mg/L。

氧气:一般曝气池中的溶解氧在 1.5~3mg/L 时较适宜。

温度:一般污水处理中起作用的为中温性微生物,最适宜的温度为 25~32℃,温度过高气味明显,而低温降低 BOD 的去除率。

pH 值:微生物的生理活动与环境的酸碱度密切相关,只有在适宜的 pH 值下,微生物才能进行正常的生理活动。pH 值过大地偏离适宜值,微生物酶系统的催化功能就会减弱甚至消失。大多数细菌在 pH 6.5~8 生长良好,污水过酸、过碱均须先调解 pH 值,而后再进入曝气池。

有毒物质:当污水中有毒物质达到一定浓度时,能破坏微生物的结构而影响微生物的新

陈代谢，从而影响污水的处理效果。微生物经驯化后能提高对毒物的耐受力。

容积负荷：单位曝气池有效容积单位时间内所承受的有机污染物量，以 $\text{kgBOD}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 表示，普通活性污泥法一般为 $0.3 \sim 0.8 \text{ BOD}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

污泥负荷：是指单位质量活性污泥在单位时间内所承受的有机污染物量，单位一般为 $\text{kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ，普通活性污泥法一般为 $0.2 \sim 0.4 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ，又称有机底物量 (F) 与微生物量 (M) 的比值 (food to microorganism ratio, F/M)，它是影响活性污泥增长速率、氧的利用速率以及污泥吸附凝聚性能的重要因素。

污泥龄：是指曝气池内工作着的活性污泥总量与每日排放的剩余物量之比，又称污泥平均停留时间，单位是 d。污泥龄的长短直接影响曝气池内活性污泥的性质，普通活性污泥法一般为 2~4 天。

水力停留时间：曝气池有效容积与污水流量的比值，表示污水在曝气池中的平均停留时间。普通活性污泥法一般为 6~10h。

5. 活性污泥法运行中常见的问题

活性污泥法运行中的常见问题见表 9-1。

表 9-1 活性污泥法运行中的常见问题

常见问题	主要原因	不良后果
分散生长	微生物呈分散状，不能形成絮凝体，而形成小的凝块或单细胞生长	出水浑浊，活性污泥没有成层沉降
黏性膨胀或非丝状菌体膨胀	微生物出现在大量的胞外黏液中。严重时，黏液使活性污泥稠似果酱	沉淀和压缩比率减小。在严重情况下不发生固体的分离，导致污泥溢出二沉池。有时候还会出现黏性泡沫
微细或针状絮凝体	柔软、紧密的约呈圆形的小絮凝体，其中体积大的沉淀得快，体积小的沉淀得慢	污泥容积指数 (SVI) 低、出水浑浊
丝状膨胀	丝状有机体从絮凝体扩展到溶液中	妨碍活性污泥的压缩、沉降，严重时污泥溢出二沉池
污泥上浮	二沉池中的反硝化作用释放部分溶解的 N_2 ，这些 N_2 依附在活性污泥絮凝体上并使其漂浮在二沉池池面上	活性污泥在二沉池池面上形成浮渣
污泥腐化上浮	污泥因缺氧而腐化，厌氧分解产生大量甲烷及二氧化碳气体附着在污泥体上	污泥发黑发臭
形成泡沫/浮渣	原因有不可降解的表面活性剂和诺卡氏菌属 (<i>Nocardia</i>)、微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 或 1863 型菌的存在	大量活性污泥固体形成浮渣漂浮在处理水的表面上，微丝菌形成的泡沫很稳固并且很难被机械破碎，泡沫累积并会腐烂，固体随二沉池出水溢出

(1) 分散生长

分散生长是由微观结构的毁坏导致的,因为微生物不能相互黏附了,生化絮凝无法发生。这通常是由于在某种特殊的活性污泥生长条件下不可絮凝细菌的出现,它们是单个的细胞或丝状菌。难生物降解表面活性剂亦可通过分散(反絮凝)已絮凝的活性污泥导致分散生长。

(2) 黏性膨胀

黏液或凝胶的形成,被称为“黏性膨胀”或“菌胶膨胀”或“非丝状膨胀”。这是由于微观结构中促进生化絮凝发生的大量胞外物质被毁坏,微生物细胞在有高度保水能力的胞外团块中“分散”,导致活性污泥的黏滞、难沉降和密实。

(3) 针状絮体

微细絮体或针状絮体是由于宏观结构的毁坏,通常发生在低有机负荷的情况下,但在一些工业废水活性污泥体系中,该问题可能是由化学物质对絮凝体形成的干扰(如分散作用)造成的。絮凝体中基本不存在(或只有极少的)丝状生物体,絮凝体很小、大致呈球形、脆弱且在曝气池中很快被分裂并散开。

(4) 丝状膨胀

丝状膨胀是因为丝状微生物(主要是丝状细菌,有时也有由霉菌引起的丝状膨胀)大量存在,它们或产生伸展、扩散的絮凝体结构,或超越活性污泥絮凝体的局限而在分散介质中大量生长并在絮凝体之间架桥,由此妨碍了活性污泥的压缩和沉降。

(5) 污泥上浮

①污泥脱氮上浮:当较长时间的缺氧引起反硝化作用,产生氮气,污泥上氮气吸附过多时污泥就会随气体浮出水面。

②污泥腐化上浮:在沉淀池内污泥因缺氧而腐化,产生的甲烷和二氧化碳使污泥上浮,上浮的污泥发黑发臭。

(6) 泡沫/浮渣

当废水中含有合成洗涤剂及其他起泡物质时,就会在曝气池表面形成大量泡沫。泡沫/浮渣通常是由丝状微生物诺卡氏菌属(*Nocardia spp*)或微丝菌(*M. parvicella*)以及反硝化作用引起的。当脱氮污泥含有大量丝状微生物时,污泥上浮问题会更加严重。泡沫的危害主要表现在:表面机械曝气时,隔绝空气与水接触,降低叶轮的充氧能力;在泡沫表面吸附大量活性污泥固体时,影响二沉池沉淀效率,恶化出水水质;有风时随风飘散,影响环境卫生。

诺卡氏菌属(*Nocardia spp*)和微丝菌(*M. parvicella*)的细胞表面都是疏水性的,当它们在活性污泥中大量生长繁殖时,改变了絮凝体的疏水性质并使其与空气泡黏附。这些附有空气泡的絮凝物聚集体比水轻,因此漂浮在表面上。既然它们是疏水性的,所以一旦到达表面就停留在那了;它们积累起来形成了一层很厚、呈巧克力棕色的漂浮物或浮渣。

二沉池中的脱氮作用会产生外观上类似的漂浮物。在曝气池中产生的硝酸盐,在二沉池池底缺氧环境的活性污泥中被转化成极难溶于水的氮气(N_2)释放出来。氮气进而充当了很好的絮凝物浮选剂作用。 N_2 气泡很小,又是在活性污泥絮凝体内部产生,故能很好地黏附絮凝体,这些附有气体的固体聚集体比水轻,上升到表面成为漂浮物。

由反硝化反应引起的浮渣和由诺卡氏菌属(*Nocardia spp*)或微丝菌(*M. parvicella*)引

起的浮渣有所区别：由诺卡氏菌属（*Nocardia spp*）或微丝菌（*M. parvicella*）引起的浮渣中生物体在混合液面上有明显的聚集，曝气池中的气泡大而坚固；由反硝化反应引起的则主要是在二沉池中有氮气小气泡，且浮渣和混合液之间难以区别。

(7) 剩余污泥

剩余污泥（*excess sludge*）的形成：在正常运行条件下，系统内的微生物不断进行新陈代谢，将有机污染物氧化分解为二氧化碳、水和各种中间代谢产物，同时利用分解代谢所释放出的能量，将一部分基质合成细胞物质，供微生物生长，系统内活性污泥量不断增加。在系统开始运行时，这种积累是必要的，但当活性污泥达到一定数量，能满足废水处理的需要之后，新增的污泥不再是处理过程所需要的，应予以排除，这部分排出的活性污泥称为剩余污泥（*excess sludge*）。其中，固体物质占 0.5% ~ 2%，主要是微生物细胞物质（生物质，*biomass*）和少量的重金属、有机污染物质等。

常规活性污泥工艺的污泥产量系数（*sludge production coefficient*）一般为 0.5，污泥量通常占污水量的 0.3% ~ 0.5%（体积），或污水处理量的 1% ~ 2%（质量），如果进行深度处理，污泥量还会增加 0.5 ~ 1 倍。因此，城市人口增长、污水处理率提高、处理程度加深等，都会导致剩余污泥量增加。

剩余污泥的处理和处置投资大、花费多。剩余污泥需经浓缩、消化（通常是厌氧消化）、调节和脱水等步骤进一步处理，以减少病原体、稳定有机质、消除臭气、去除重金属、减少体积等，处理后形成的沉淀物则被焚烧、填埋、土地利用或海洋倾倒。在大多数城市污水处理厂，剩余污泥的处理费用占整个污水处理费用的 25% ~ 65%，欧洲、美国普遍占到总费用的一半甚至 60%。然而，尽管耗资巨大，目前这些污泥处置措施没有一种能继续推广应用，随着公众健康意识的加强和环保法规的日趋严格，现行手段越来越受到限制。如填埋占用土地和污染地下水，海洋倾倒会污染海洋，焚烧会污染大气，污泥的农用影响人畜健康。目前，海洋倾倒已被许多国家禁止，污泥的农用在发达国家已受到严格的卫生法规限制。

6. 丝状微生物与活性污泥性质

丝状微生物对活性污泥絮凝体的性质会产生重要影响，丝状微生物的存在和数量与活性污泥絮凝体的性质有极大关系。活性污泥絮凝体有三种情况：理想絮凝体、针状絮凝体和丝状膨胀污泥，区别主要就是丝状微生物的存在状况（表 9-2）。

表 9.2 活性污泥絮凝体中微生物的构成特征

指标	理想污泥	针状絮凝体污泥	丝状膨胀污泥
丝状微生物量	一般	少或无	多
丝状微生物与絮凝体微生物关系	平衡	/	丝状微生物占优势
絮凝体性质	大、坚固	小、脆弱	大、疏松
丝状菌是否妨碍污泥沉降和压缩	否	否	是
污泥容积指数 SVI	低	低	高
出水水质	清澈	浑浊	清澈