

# 好氧颗粒污泥污水处理技术

张翠雅 马广东 ○ 著




 上海科学技术出版社

# 好氧颗粒污泥污水处理技术

张翠雅 马广东 著



 上海科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

好氧颗粒污泥污水处理技术 / 张翠雅, 马广东著

. -- 上海 : 上海科学技术出版社, 2024. 6

ISBN 978-7-5478-6619-1

I. ①好... II. ①张... ②马... III. ①污水处理—生  
物处理—研究 IV. ①X703.1

中国国家版本馆CIP数据核字(2024)第084620号

好氧颗粒污泥污水处理技术

张翠雅 马广东 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社

(上海市闵行区号景路159弄A座9F-10F)

邮政编码 201101 www.sstp.cn

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9

字数: 200千字

2024年6月第1版 2024年6月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-6619-1/X·70

定价: 75.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

# Preface

## 前言

水是人类赖以生存的自然资源之一,是生态系统必不可少的组成部分,洁净的水资源对人类及动植物的生存起着至关重要的作用。但是,随着人们生活质量的提高,生活污水排放量逐年增加,且我国是养殖大国,随着养殖密度的增加,水体受到生活污水和养殖尾水带来的承载压力越来越大。大量污染物处理不当会加剧水域富营养化程度。在污水的生物处理系统中,生物膜的处理效果优于悬浮性活性污泥。好氧颗粒污泥是一种由细胞自聚形成的特殊生物膜。好氧颗粒污泥独特的分层结构使其具有较高的生物多样性,具备同时去除有机碳、氮和磷的潜能,且其比重大、生物致密的特性使其具有快速的沉降速度,有利于泥水分离、缩小或者省去污泥二沉池、简化工艺流程、降低污水处理系统的占地面积和投资成本。因此,好氧颗粒污泥被誉为一项具有前景的污水生物深度处理技术。近年来,对好氧颗粒污泥形成机理探索、形成条件选择、结构特性考察以及污染物降解功能驯化的研究已经成为热点,但是颗粒化时间长且长期运行稳定性差限制了其广泛应用。

本书通过优化好氧颗粒污泥的培养条件,尝试从控制粒径的角度提高其长期运行过程的稳定性。本书共八章,详细介绍了反硝化除磷好氧颗粒污泥的形成过程和稳定性控制优化研究方法。其中,引入灰关联分析判定好氧颗粒污泥形成过程中的关键影响因素,给出其最佳值或最佳调控范围。并利用 pH 值、氧化还原电位和溶解氧调整 SBR 的厌氧、好氧和缺氧时长,优化好氧颗粒污泥的运行参数,同时解决非丝状菌膨胀问题。针对长期运行过程中好氧颗粒污泥稳定性差的问题,基于已获得的优化条件,筛选出有效控制粒径不断增长趋势的耦合选择压。此外,针对好氧颗粒污泥中反硝化除磷微生物活性的测定方法进行深入研究,分析传统测定方法的弊端,并提出准确地评估各类菌体活性的实验改进方法。考察了电气石的投加对反硝化除磷好氧颗粒污泥培养和处理性能的影响。最后,采用养殖底泥为接种污泥,培养稳定耐盐反硝化除磷好氧颗粒污泥,进而开展海水养殖尾水处理性能等研究,对于我国海水养殖水环境保护具有积极的意义。实验成果可降低海水养殖底泥的生态风险,实现其无害化和资源化利用,降低底泥处理成本,并为提高海水养殖尾水循环利用提供技术支撑。

本书通过阐述反硝化除磷好氧颗粒污泥培养条件优化、脱氮除磷功能微生物活性测

定,为提高好氧颗粒污泥的稳定性提供参考方法和理论依据,同时为生活污水和养殖尾水处理领域的工程技术人员,水产养殖工程、化学工程及环境工程等相关专业师生提供技术参考,具有较好的学术价值和应用价值。

本书涉及的研究由作者及其所在研究团队相关研究人员共同完成,本书由马广东(第1~4章)和张翠雅(第5~8章)撰写。研究生国显勇同学负责本书文献整理。本书参阅了国内外有关文献和相关书籍。同时,在编写过程中得到了大连理工大学、大连海洋大学和大连塞姆生物工程技术有限公司等单位给予的大力支持和指导。在此表示诚挚的谢意!

限于作者的水平和视野,本书难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

**作 者**

2024年1月

## 主要符号与缩写表

符 号	意 义	单 位
SBR	序批式反应器	
A/O/A	交替运行的厌氧-好氧-缺氧模式	
A/O	交替运行的厌氧-好氧模式	
A/A/O	交替运行的厌氧-缺氧-好氧模式	
A/A	交替运行的厌氧-缺氧模式	
DO	溶解氧	mg/L
ORP	氧化还原电位	mV
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	氨氮	mg/L
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	硝氮	mg/L
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	亚硝氮	mg/L
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	磷酸盐	mg/L
COD	化学需氧量	mg/L
TOC	总有机碳	mg/L
TN	总氮	mg/L
HRT	水力停留时间	h/min
SRT	污泥停留时间	day
SEM	扫描电子显微镜	
CLSM	共聚焦激光扫描显微镜	
FISH	荧光原位杂交技术	
GST	灰色系统理论	
GRA	灰关联分析	
GRC	灰关联系数	
GERG	灰熵关联度	
SVI	污泥体积指数	mL/g
H/D	高径比	
AT	曝气时长	min
SGV	表观气体流速	cm/s
ST	沉降时间	min
OLR	有机负荷	kg COD/(m <sup>3</sup> · d)

(续 表)

符 号	意 义	单 位
EPS	胞外聚合物	mg/g MLSS
PS	胞外多糖	mg/g MLSS
PN	胞外蛋白	mg/g MLSS
LB PS	松散结合型胞外多糖	mg/g MLSS
TB PS	紧密结合型胞外多糖	mg/g MLSS
LB PN	松散结合型胞外蛋白	mg/g MLSS
TB PN	紧密结合型胞外蛋白	mg/g MLSS
PAOs	聚磷菌	
DNPAOs	反硝化聚磷菌	
DNIPAOs	可利用 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的反硝化聚磷菌	
DNAPAOs	可利用 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的反硝化聚磷菌	
GAOs	聚糖菌	
DNGAOs	反硝化聚糖菌	
SAPUR	比好氧吸磷速率	mg/(g VSS · h)
SNPUR	比缺氧吸磷速率	mg/(g VSS · h)
SADR	比好氧反硝化速率	mg/(g VSS · h)
SANADR	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 比好氧反硝化速率	mg/(g VSS · h)
SANIDR	$\text{NO}_2^- - \text{N}$ 比好氧反硝化速率	mg/(g VSS · h)
SNDR	比缺氧反硝化速率	mg/(g VSS · h)
SNNADR	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 比缺氧反硝化速率	mg/(g VSS · h)
SNNIDR	$\text{NO}_2^- - \text{N}$ 比缺氧反硝化速率	mg/(g VSS · h)
SOUR	比好氧速率	
PHA	聚- $\beta$ -羟基烷酸酯	
FNA	游离亚硝酸	

# C ontents

## 目 录

<b>第1章</b>	<b>概述</b>	<b>1</b>
1.1	好氧颗粒污泥形成机理探索	2
1.2	好氧颗粒污泥形成过程中的影响因素	5
1.2.1	接种污泥	5
1.2.2	进水基质组成和负荷	5
1.2.3	SBR 运行模式	7
1.2.4	环境影响因子	8
1.3	好氧颗粒污泥形成过程的优化研究进展	9
1.3.1	投加辅助材料或改变接种污泥组分	9
1.3.2	调控运行条件	10
1.3.3	耦合选择压	12
1.4	好氧颗粒污泥稳定性强化的研究进展	13
1.4.1	提供适宜的运行条件	13
1.4.2	筛选富集生长速率慢的微生物	16
1.4.3	抑制厌氧生长	16
1.4.4	强化厌氧内核	17
1.5	生物硝化、反硝化和除磷研究	18
1.5.1	生物脱氮	18
1.5.2	生物除磷	19
1.5.3	好氧颗粒污泥脱氮、除磷研究	22
1.6	本书主要内容	24
<b>第2章</b>	<b>好氧颗粒污泥培养和分析表征方法</b>	<b>27</b>
2.1	引言	28
2.2	SBR 反应器	28
2.3	实验配水成分	29
2.4	常规测试项目及方法	29

2.5	污泥粒径和形态	30
2.6	EPS 提取与测定方法	30
2.7	比好氧速率测定	31
2.8	荧光原位杂交	31

### 第3章 基于灰色系统理论识别好氧颗粒污泥的关键影响因子 ..... 35

3.1	引言	36
3.2	研究方法	36
3.2.1	GRA 方法	36
3.2.2	参考数列和比较数列	38
3.2.3	数据获取	38
3.3	GRA 计算过程	39
3.3.1	标准化处理	39
3.3.2	GRC 计算	40
3.3.3	最优值和最佳范围	43
3.3.4	GERG 计算	44
3.4	结果讨论	46
3.4.1	SGV 影响分析	46
3.4.2	AT 和 OLR 影响分析	46
3.4.3	ST 影响分析	47
3.4.4	H/D 影响分析	47
3.5	本章小结	48

### 第4章 基于环境参数优化培养好氧颗粒污泥 ..... 49

4.1	引言	50
4.2	实验与方法	51
4.2.1	实验装置和运行条件	51
4.2.2	配水组成和接种污泥	52
4.2.3	周期实验	52
4.3	实验结果与讨论	52
4.3.1	环境参数优化周期时长	52
4.3.2	颗粒化过程形态变化及特征	55
4.3.3	颗粒化过程污染物去除能力	57
4.4	环境参数调控非丝状菌膨胀污泥颗粒化过程研究	58
4.4.1	实验装置和运行条件	58

4.4.2	接种污泥和进水组成	59
4.4.3	pH 值、ORP 和 DO 与生化反应关联分析	59
4.4.4	非丝状菌膨胀原因分析及控制策略	61
4.4.5	非丝状菌膨胀污泥形态和处理效果	61
4.4.6	颗粒化过程形态变化和污染物去除能力	65
4.4.7	EPS 变化情况	66
4.5	本章小结	66

## 第 5 章 基于粒径控制实现好氧颗粒污泥长期稳定运行 69

5.1	引言	70
5.2	实验与方法	71
5.2.1	SBR 运行条件的优化选择	71
5.2.2	接种污泥和进水组成	72
5.3	实验结果	72
5.3.1	颗粒化过程形态变化及特征	72
5.3.2	EPS 分泌量变化情况	74
5.3.3	FISH 分析	75
5.3.4	PAOs、AOB 和 NOB 活性测定	76
5.3.5	颗粒化过程污染物去除能力	77
5.4	稳定好氧颗粒污泥形成机理分析	79
5.5	本章小结	79

## 第 6 章 好氧颗粒污泥内反硝化除磷菌功能识别及活性测定方法研究 81

6.1	引言	82
6.2	实验与方法	82
6.2.1	批次实验设计	82
6.2.2	$\text{NO}_2^- - \text{N}$ 投加剂量研究	84
6.3	实验结果与讨论	85
6.3.1	$\text{NO}_2^- - \text{N}$ 对好氧吸磷和缺氧吸磷的影响	85
6.3.2	批次实验测定结果	86
6.4	本章小结	90

## 第 7 章 电气石对好氧颗粒污泥形成过程和处理效能影响 93

7.1	引言	94
-----	----	----

7.2	实验与方法	94
7.2.1	实验材料	94
7.2.2	装置及运行条件	95
7.2.3	分析项目和方法	95
7.3	实验结果与讨论	96
7.3.1	活性污泥的颗粒化过程	96
7.3.2	反应器处理性能比较	97
7.3.3	比好氧/缺氧吸磷速率批次实验	99
7.3.4	电气石对好氧反硝化的影响	100
7.4	本章小结	101

## 第8章 好氧颗粒污泥处理海水养殖尾水研究 103

8.1	引言	104
8.1.1	养殖底泥处理技术概况	104
8.1.2	海水养殖尾水处理技术概况	104
8.1.3	好氧颗粒污泥处理水产养殖废水及底泥的研究	105
8.2	实验与方法	106
8.2.1	底泥和进水水质	106
8.2.2	SBR 反应器及启动调控	106
8.2.3	测试项目和分析方法	106
8.2.4	细菌同源进化性分析	107
8.3	实验结果与讨论	107
8.3.1	海水养殖底泥颗粒化过程中形态变化	107
8.3.2	EPS 变化趋势	108
8.3.3	驯化过程中底泥的污染物脱除效果变化	109
8.3.4	微生物群落动态及功能群鉴定	112
8.4	本章小结	114

参考文献	115
------	-----

# 第 1 章

## 概 述



水体的富营养化和有机污染是水环境受到污染的主要特征,尤其是前者在世界各地的水域中日趋严重,对水生生物、人类健康以及工、农业造成严重危害。引起水体富营养化的主要原因是氮、磷的过量排放,因此污水在排放前必须将氮、磷移除<sup>[1]</sup>。目前的污水生物处理技术存在诸多问题,比如工艺流程长、程序复杂、占地大、投资和运行成本高,而且多数生物处理系统同时去除有机物、氮和磷的效果较差。因此,对新型高效脱氮除磷工艺的研究已被列为目前水污染控制工程领域研究的重点和热点之一。

好氧颗粒污泥是一项具有前景的污水生物深度处理技术<sup>[2-4]</sup>。研究证实,在污水的生物处理系统中,生物膜的处理效果优于悬浮性活性污泥<sup>[3]</sup>。好氧颗粒污泥是一种由细胞自聚形成的特殊生物膜。好氧颗粒污泥比重大、生物致密的特性使其具有快速的沉降速度,有利于泥水分离、缩小或者省去污泥二沉池、简化工艺流程、降低污水处理系统的占地面积和投资成本。而且,好氧颗粒污泥较高的污泥浓度和容积负荷可以承受水质波动和高有机负荷带来的冲击,保证良好的出水水质。另外,好氧颗粒污泥的颗粒结构使得  $O_2$  在传输过程中受到传质阻力,由外向内依次分为好氧层、缺氧层和厌氧层,为不同微生物提供适宜的生存空间,这种独特的分层结构使其具有较高的生物多样性,具备同时降解有机碳、氮和磷的潜能。因此,近年来对好氧颗粒污泥形成机理探索、形成条件选择、结构特性考察以及污染物降解功能驯化的研究已经成为热点。

### 1.1 好氧颗粒污泥形成机理探索

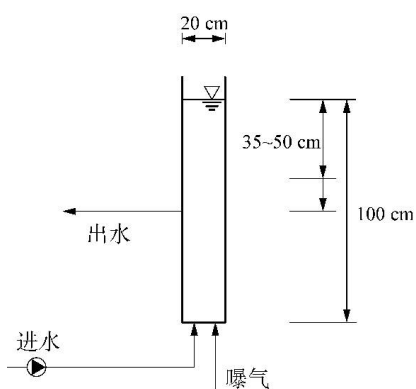


图 1.1 SBR 系统<sup>[6]</sup>

1991 年 Mishima 和 Nakamura<sup>[5]</sup>首次在连续流好氧污泥生物反应器内获得好氧颗粒污泥。Morgenroth 等<sup>[6]</sup>在 1997 年第一次利用序批式反应器 (sequencing batch reactor, SBR) 培养出好氧颗粒污泥 (图 1.1)。Heijnen 等<sup>[7]</sup>在 1998 年对其申请专利。

与其他工艺相比, SBR 具有处理构筑物少、占地面积小、对水质和水量的变化适应性强、不易发生污泥膨胀等优点,因此目前大部分研究者均选择 SBR 培养好氧颗粒污泥<sup>[8-17]</sup>。通过灵活调整 SBR 进水、曝气、沉淀、排水、等待、排泥等环节,改变 SBR 的运行方式。调控曝气和非曝气可以创造交替厌氧、缺氧或好氧条件,有利于不同微生物共存于一个反应器内并执行不同的生化反应 (如硝化、反硝化和除磷)。

目前对好氧颗粒污泥形成机理的探索仍未形成统一的理论。一般认为,颗粒化过程是微生物在一定条件下为适应环境不断地调整自身代谢活动产生的自发凝聚现象。在生物学范畴内,将微生物自聚假定为属内、属间和多属之间通过细胞表面受体的交互作用进行的细胞与细胞的黏附过程,如胞外蛋白 (extracellular proteins, PN) 与胞外多糖 (extracellular

polysaccharides, PS)之间,或 PN 与 PN 之间的交互作用<sup>[18]</sup>。Tay 等<sup>[19]</sup>将好氧颗粒污泥的形成过程视为一种不依赖载体的微生物自固定化过程(图 1.2~图 1.4)。Beun 等<sup>[8]</sup>提出无载体

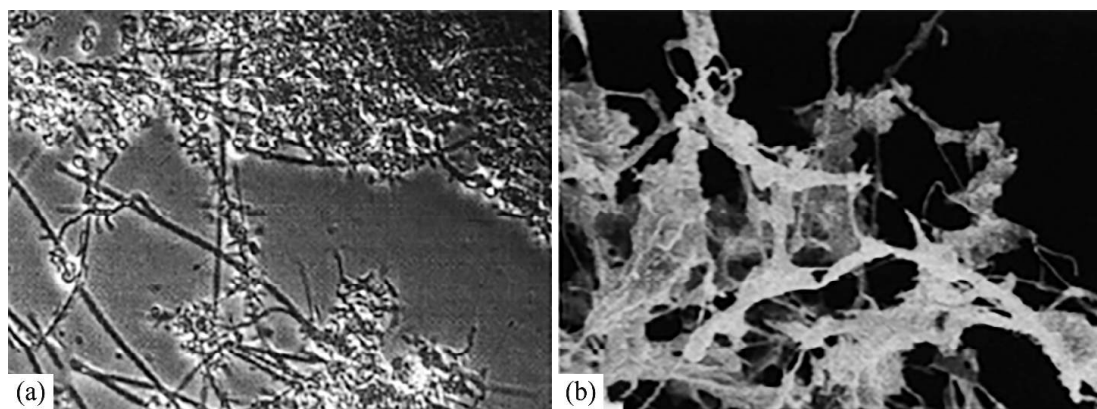


图 1.2 接种活性污泥形态<sup>[19]</sup>

(a)光学显微镜;(b)扫描电镜

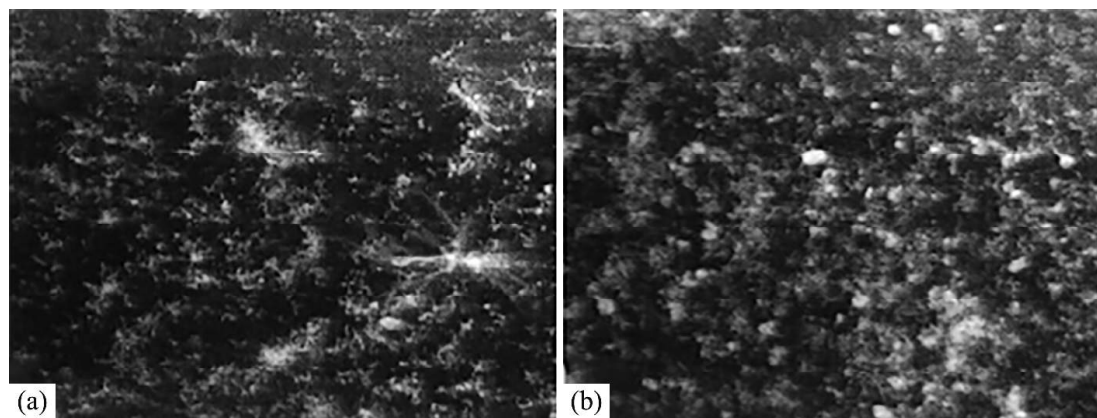


图 1.3 培养 1 周的微生物聚集体<sup>[19]</sup>

(a)投加葡萄糖;(b)投加乙酸盐

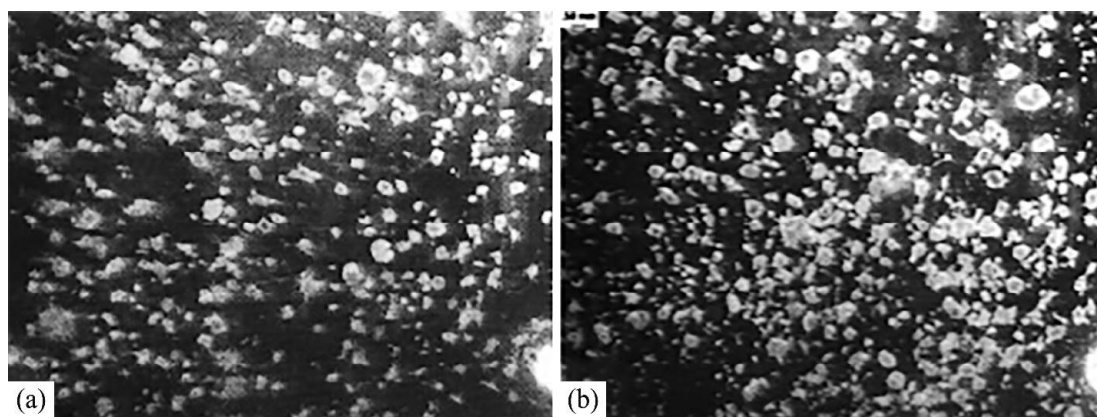


图 1.4 培养 2 周的颗粒污泥<sup>[19]</sup>

(a)投加葡萄糖;(b)投加乙酸盐

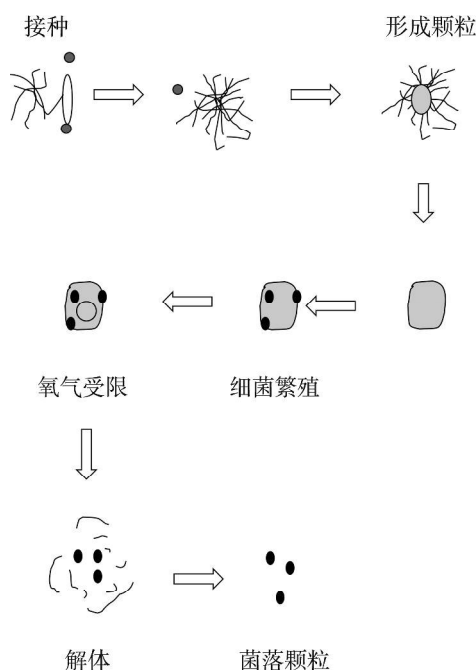


图 1.5 SBR 中好氧颗粒污泥形成机理假设<sup>[8]</sup>

条件下好氧颗粒污泥形成的模拟过程,如图 1.5 所示。

Liu 等<sup>[20]</sup>提出好氧颗粒污泥形成过程的四步理论。

第一步:在剪切力、扩散作用、重力、热力学作用力和/或细胞移动的作用下,细菌发生物理运动形成聚合微粒。

第二步:由物理作用力、化学作用力或生物化学作用力形成的最初动力诱导形成初始颗粒。其中,物理作用力包括范德华力、正负电荷引力、热力学作用力(表面自由能,表面张力)和丝状菌链接或桥联单独细胞。其中,细胞表面疏水性在生物膜最初形成过程中起到重要作用<sup>[19]</sup>。在热力学理论范畴内,提高细胞表面疏水性会降低其表面过剩的吉布斯自由能(Gibbs free energy),继而促进细胞间相互作用,为细菌脱离水相发生自聚提供最初动力。在此过程中,丝状菌可构建三维结构,为黏附生长的细菌提供稳定的环境。化学作用力包括氢键、离子配对和三价离子配对等。生物化学作用力包括细胞膜融合、细胞受体吸引和细胞表面脱水。

第三步:微生物作用力促使微粒逐渐成熟,如分泌胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)、细胞集群生长,以及环境刺激导致细菌的新陈代谢和基因表达变化。

第四步:外界水力剪切力稳固颗粒的三维结构。

研究者为了进一步探索好氧颗粒污泥形成过程的机理,利用共聚焦激光扫描显微镜(confocal laser scanning microscopy, CLSM)、荧光染料、荧光微球和寡糖苷酸探针<sup>[21-24]</sup>考察好氧颗粒污泥形成过程中颗粒内部组成的变化情况<sup>[25-27]</sup>。在颗粒化过程中,在污泥上同时标记 PN、油脂、 $\alpha$ -胞外多糖( $\alpha$ -extracellular polysaccharides,  $\alpha$ -PS)和  $\beta$ -胞外多糖( $\beta$ -extracellular polysaccharides,  $\beta$ -PS)、总细胞和死亡细胞。结果证实微生物聚集是颗粒形成

的关键步骤,微生物聚集后在附着位点处繁殖并分泌 EPS,逐渐转变成大粒径絮状污泥。黏附在絮状污泥上的微生物大量繁殖和凝聚,形成好氧颗粒污泥。在外界剪切力的作用下,颗粒的结构逐渐变得紧实。PN 和 PS 形成好氧颗粒污泥的非生物性内核,为颗粒抵御外部剪切力提供有力支撑。成熟好氧颗粒污泥光滑的表面将颗粒之间的碰撞摩擦最小化。然而粒径不断增大会导致基质传送受阻,引发内部细胞死亡。

## 1.2 好氧颗粒污泥形成过程中的影响因素

众多参数会影响好氧颗粒污泥的形成过程,比如接种污泥、基质组成、有机负荷(organic loading rate, OLR)、进食策略、反应器构型、沉降时间(settling time, ST)、体积交换律和曝气强度(体现水力剪切力)等。

### 1.2.1 接种污泥

活性污泥系统中较多的微生物群落对好氧颗粒污泥的形成过程具有重要影响,因此大部分研究选取活性污泥作为培养好氧颗粒污泥的接种污泥<sup>[2]</sup>。不同菌体具有不同的物理-化学特性,导致其表现出不同的凝聚能力<sup>[28]</sup>。相对于亲水性细菌而言,疏水性细菌更易黏附在污泥絮体上<sup>[29]</sup>。接种污泥中疏水性微生物越多,越容易快速地形成沉降性能好的颗粒污泥<sup>[30]</sup>。

### 1.2.2 进水基质组成和负荷

适于培养好氧颗粒污泥的基质种类繁多,包括乙酸、葡萄糖、苯酚、乙醇、淀粉、蔗糖、糖浆和合成污水<sup>[31-35]</sup>,也有研究者利用实际污水培养好氧颗粒污泥<sup>[36-39]</sup>。研究显示碳源会显著影响颗粒的种群结构<sup>[19]</sup>,以苯酚作为碳源和能源物质培养好氧颗粒污泥,优势种群为 *Proteobacterium*<sup>[35,40]</sup>。以无机碳源和氨氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )作为培养基质,好氧颗粒污泥中优势种群为亚硝化菌(ammonia oxidizing bacteria, AOB)和硝化菌(nitrite oxidizing bacteria, NOB)<sup>[41,42]</sup>。以葡萄糖和乙酸作为碳源、硝氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )作为氮源,好氧颗粒污泥中优势种群为 *Epistylis*、*Poteroiochromonas*、*Geotrichum* 和 *Geotrichum klebahnii*<sup>[43]</sup>。Xiang 等<sup>[44]</sup>以高负荷苯胺作为单一碳源和氮源培养好氧颗粒污泥,在颗粒中分离出两株纯菌,分别是 *Pseudomonas* sp. adx1 和 *Achromobacter* sp. adx3,它们对苯胺的降解效果分别达到 0.924 g/(g·h)和 0.645 g/(g·h)。

OLR 会显著影响好氧颗粒污泥的形成速度和颗粒中种群结构<sup>[45]</sup>。在 OLR 较低的条件 下[1.5 kg COD/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ )],好氧颗粒污泥的形成速度较慢,粒径小,结构紧实,且微生物多样性高。较高的 OLR[4.5 kg COD/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ )]会加速好氧颗粒污泥的形成过程,但是,好氧颗粒污泥粒径大、结构疏松。Li 等<sup>[46,47]</sup>研究证实,好氧颗粒污泥中生物多样性会随 OLR 增加而降低。可见,好氧颗粒污泥的形态和动力学特性均受 OLR 影响。然而目前的研究表明,OLR 在 2.5~15 kg COD/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ )范围内均可以培养出好氧颗粒污泥<sup>[48,49]</sup>,可见好氧颗粒污泥的形成并不单纯取决于 OLR。

Yang 等<sup>[50]</sup>研究 N/COD(5/100~30/100)对好氧颗粒污泥形成过程的影响,结果发现只有在游离氨(free ammonia, FA)浓度低于 23.5 mg/L 的环境下才能培养出好氧颗粒污泥(图

1.6),这是因为高于此阈值时,FA 会显著降低细胞疏水性,并影响 EPS 产量,继而阻碍好氧颗粒污泥的形成过程。但是,当处理无机污水时,FA 对颗粒化过程的影响并不显著。Shi 等<sup>[51]</sup>以高负荷  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  无机污水为进水,经过 120 天培养出了平均粒径为 0.32 mm 的自养硝化好氧颗粒污泥。Chen 等<sup>[52]</sup>通过迅速提高  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  负荷(由 200 mg/L 增至 1000 mg/L)结合短 ST 运行模式,经过 55 天培养出自养硝化好氧颗粒污泥。

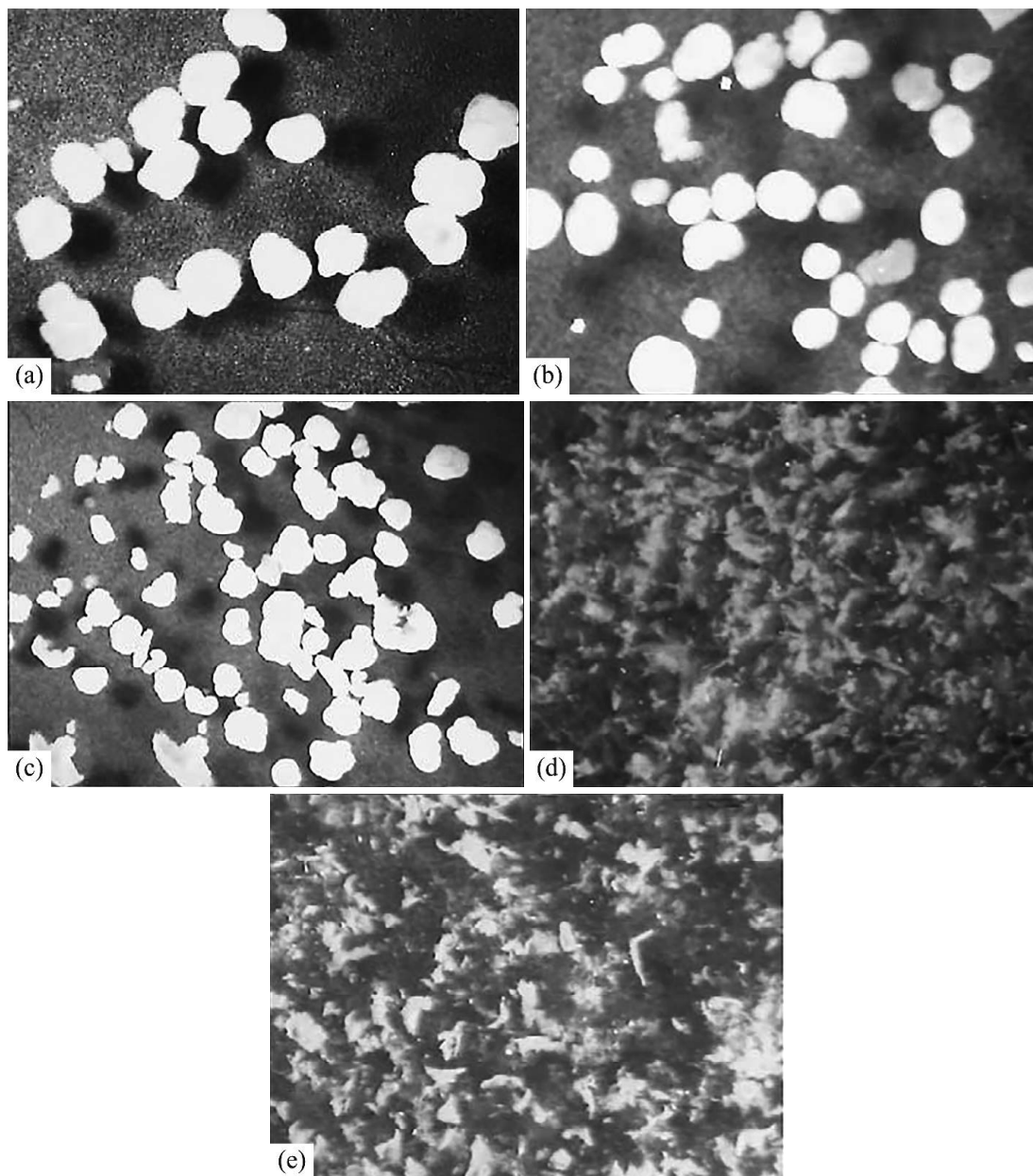


图 1.6 不同 N/COD 条件下培养的污泥形态<sup>[50]</sup>

(a)N/COD 为 5/100 的反应器中的颗粒污泥;(b)N/COD 为 10/100 的反应器中的颗粒污泥;(c)N/COD 为 15/100 的反应器中的颗粒污泥;(d)N/COD 为 20/100 的反应器中的污泥;(d)N/COD 为 30/100 的反应器中的污泥