



同济大学 1907-2017
Tongji University



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

余光辉 何品晶 著

基于絮体多层结构的污水厂 污泥脱水和颗粒化机制研究

Mechanism of Sludge Dewatering and Granulation of
Wastewater Treatment Plants Based on the Multi-layers
Structure of Floccs



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

 同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

余光辉 何品晶 著

基于絮体多层结构的污水厂 污泥脱水和颗粒化机制研究

Mechanism of Sludge Dewatering and Granulation of
Wastewater Treatment Plants Based on the Multi-layers
Structure of Flocs



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书研究了影响污泥脱水性能的主要因素,探明了超声波和碱预处理调控污泥絮体结构和有机质分布模式的效果,比较了污泥絮体各层用作絮凝剂的絮凝效果及机制,探讨了污泥絮体去除胞外聚合物后细胞相优化好氧污泥颗粒化工艺的现象与机制。

本书立意新颖,理论与实践紧密结合,研究设计科学规范合理,分析深入,表述清晰,结论可靠,有很好的生产应用价值。本书可供高等院校环境专业及相关专业、环保决策人士及有兴趣的读者参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

基于絮体多层结构的污水厂污泥脱水和颗粒化机制研究 / 余光辉,何晶晶著. —上海: 同济大学出版社, 2017. 8
(同济博士论丛 / 伍江总主编)
ISBN 978-7-5608-6964-3

I. ①基… II. ①余… ②何… III. ①污水处理厂—污泥处理—研究 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 093002 号

基于絮体多层结构的污水厂污泥脱水和颗粒化机制研究

余光辉 何晶晶 著

出品人 华春荣 责任编辑 陆义群 卢元姗

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
排版制作 南京展望文化发展有限公司
印 刷 浙江广育爱多印务有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 15.25
字 数 305 000
版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6964-3

定 价 71.00 元

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侏红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何晶晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城 莫天伟 夏四清 顾 明 顾祥林 钱梦騷
徐 政 徐 鉴 徐立鸿 徐亚伟 凌建明 高乃云
郭忠印 唐子来 閻耀保 黄一如 黄宏伟 黄茂松
戚正武 彭正龙 葛耀君 董德存 蒋昌俊 韩传峰
童小华 曾国荪 楼梦麟 路秉杰 蔡永洁 蔡克峰
薛 雷 霍佳震

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

前言

污泥脱水不仅是污水厂污泥无害化处理处置必不可少的前处理环节,也是污水厂污泥管理过程中应用最为普遍的共性技术;而由污泥絮体中微生物产生的大分子有机物——胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)是决定污泥脱水性能的关键物质。鉴于污泥的脱水性能由污泥絮体结构和有机组成特征决定,本书通过构建和表征污泥絮体多层结构,结合三维荧光光谱-平行因子(EEM-PARAFAC)分析,及荧光染色-共聚焦激光显微镜原位观察方法,建立对污泥脱水性能具有关键影响的污泥絮体结构和有机组成特征的创新研究方法。基于此方法,本书研究了影响污泥脱水性能的主要因素;探明了超声波和碱预处理调控污泥絮体结构和有机质分布模式的效果,及对后续厌氧与好氧消化过程中的脱水性能和消化性能的改善机制;比较了污泥絮体各层用作生物絮凝剂的絮凝效果及机制,分析了其用作生物絮凝剂提高污泥脱水性能的潜力;还探讨了污泥絮体去除 EPS 后的细胞相(pellet)优化好氧污泥颗粒化工艺的现象与机制。本书获得了如下的创新研究成果。

1) 基于污泥絮体具有剪切力敏感性的特征,通过具有不同剪切力的离心和超声波方法,构建了污泥絮体多层结构模式,即污泥絮体从外向内分成上清液(supernatant)层、黏液(slime)层、疏松结合 EPS(LB-EPS)层、紧密结合 EPS(TB-EPS)层和细胞相(pellet)层;发现污泥脱水性能主要受 supernatant、slime 和 LB-EPS 层的蛋白质 ($R^2 > 0.72$, $p < 0.01$) 和蛋白

质与多糖的比值 ($R^2 > 0.51$, $p < 0.01$) 影响,而不受其他层或整个污泥絮体的蛋白质和蛋白质与多糖的比值影响,也不受任何污泥絮体层或整个污泥絮体中的多糖影响。而在以前的同类研究中, supernatant 和 slime 层因含较少的有机质,通常是被可忽略的。

2) EEM-PARAFAC 的非破坏性表征方法,首次被应用于研究影响污泥脱水性能的主要因素。结果表明:所研究的生活污水源(3个厂)、生活垃圾源(4个厂)、工业污水源(4个厂)和特殊工业污水源(1个厂)的污水处理厂污泥的 EEM 光谱都可被 PARAFAC 方法分成 6 个荧光组分;污泥脱水性能在 supernatant 层主要受类蛋白质物质 [$Ex/Em = (220, 280)/350$] 影响,而在 slime 层、LB-EPS 层和 TB-EPS 层则不仅受类蛋白质物质影响,同时也受类腐殖酸和类富里酸物质 [$Ex/Em = (230, 280)/430, (250, 340)/430, (250, 360)/460$] 影响。而在以前的同类研究中,类腐殖酸和类富里酸对污泥脱水性能的影响均未被关注。该结果还表明,虽然 TB-EPS 层在污泥絮体中不影响污泥脱水性能,但转化为可溶态时也会劣化污泥脱水性能,即具有影响污泥脱水性能的潜力。

3) 利用荧光染色-共聚焦激光显微镜方法,原位观察过滤过程中有机质,在所形成滤饼中的分布状况,及影响过滤性能的主要因素。结果表明,在 supernatant、LB-EPS 和 TB-EPS 层,蛋白质、 α -多糖和脂肪均会影响污泥过滤性能;在 slime 层,蛋白质和脂肪对污泥过滤性能有重要的影响;而在污泥絮体各层, β -多糖均不影响污泥过滤性能。而在以前的所有同类研究中,由于多糖没有被进一步区分, α -多糖对污泥过滤性能的影响常被忽略。原污泥过滤阻力是由可溶性 EPS(supernatant+slime+部分 LB-EPS)中的蛋白质和 α -多糖控制的,而超声污泥过滤阻力仅由 TB-EPS 中的蛋白质控制。该结果也表明,TB-EPS 层转化为可溶态时,会劣化污泥脱水性能。

4) 以不破坏污泥絮体中的细胞,而最大限度地释放 EPS 固定的胞外有机质和胞外酶为确定最优工艺条件的依据,超声波预处理污泥的最优工艺条

件为 20 kHz、10 min 和 3 kW/L。在该最优工艺参数下,超声波预处理通过调控污泥絮体各层中有机质组成和分布(空间结构)特征,释放污泥絮体内层(TB-EPS 和 pellet)中的蛋白质、多糖及胞外酶到外层(slime 和 LB-EPS),创造有机质与胞外酶充分接触的环境,达到更有效降解后续消化工艺中可溶性有机物的效果,从而达到同时改善后续厌氧/好氧消化工艺中的污泥脱水性能和消化性能的目的。

5) pH 10.0 时,可以大幅度提高污泥中温和高温水解酸化过程中挥发性脂肪酸(VFA)产量,同时有效阻断甲烷化途径;但致使其污泥脱水性能严重劣化。其机制是 pH 10.0 提供了污泥连续碱预处理的条件,不断转化污泥絮体内层(TB-EPS 和 pellet)中难以被微生物利用的颗粒态有机质,到外层(slime 和 LB-EPS)为易于微生物利用的可溶态有机质,解除了 EPS 对污泥水解的限制作用,明显提高了水解酸化过程中 VFA 浓度。因此,pH 10.0 的水解酸化工艺可以作为污水厂三级处理的一部分。

6) 原生污泥中的 EPS 在接种培养好氧颗粒污泥时,可能起到空间位阻的作用,延缓了好氧污泥的颗粒化过程;而 pellet 接种,可以加速好氧颗粒污泥的培养过程,同时,pellet 接种的完全混合式反应器(CSTR)也可以培养出少量好氧颗粒污泥;六倍荧光染色-共聚焦显微镜原位观察和污泥絮体分层结合的分析结果表明,污泥颗粒化过程中,丝状菌起着骨架的作用,球状菌附着生长在其上,该结果对探明好氧颗粒污泥的形成机制具有重要意义。

7) 探明污泥絮体中的胞外酶和有机质分布模式,对资源化利用污泥中酶资源和生物絮凝剂资源,及发展新的污泥管理模式都有重要意义。回收的酶与生物絮凝剂资源,可以回用于污水处理工艺,提高污水处理效率;通过预处理调控污泥絮体结构,可以达到同时改善后续厌氧/好氧消化工艺中污泥脱水性能和消化性能的目的,为污泥高效脱水预处理技术的科学研究和工程应用提供理论基础与技术支撑;EEM-PARAFAC 方法可以作为一种有应用价值的污泥脱水性能监测工具,应用该方法测定污泥脱水性能时,仅需过

滤或稀释等简单的样品预处理,不需要任何化学试剂;疏松结合的污泥絮体层(即 supernatant, slime 和 LB-EPS 层)受污水来源影响较大。因此,疏松结合的污泥絮体层的 EEM 谱图可以用于区分污水的来源。

缩写词对照表

缩写	英文全名	中文名
ADM	anaerobic digestion model	厌氧消化模型
CLSM	confocal laser scanning microscopy	共聚焦激光显微镜
COD	chemical oxygen demand	化学需氧量
CST	capillary suction time	毛细吸水时间
CSTR	continuously stirred tank reactor	完全混合反应器
DNA	deoxyribonucleic acid	脱氧核糖核酸
EDTA	ethylenediaminetetraacetic acid	乙二胺四乙酸
EEM	excitation emission matrix	激发发射矩阵
EPS	extracellular polymeric substances	胞外聚合物
FI	fluorescence intensity	荧光强度
FRI	fluorescence regional integration	荧光区域综合指数
FT-IR	fourier transform-infrared spectroscopy	傅里叶红外光谱
GC	gas chromatogram	气相色谱
GPC	gel permeation chromatography	凝胶渗透色谱
ICP	inductively coupled plasma	电感耦合等离子体
IWA	International Water Association	国际水质协会
LB-EPS	loosely bound - EPS	疏松结合 EPS
LC	liquid chromatogram	液相色谱
OUR	oxygen uptake rate	好氧呼吸速率
PARAFAC	parallel factor analysis	平行因子分析

续 表

缩 写	英 文 全 名	中 文 名
PBS	phosphate-buffered saline	磷酸盐缓冲溶液
PCA	principal component analysis	主成分分析
PSD	particle size distribution	粒径分布
SBR	sequencing batch reactor	序批式反应器
SCOD	soluble COD	可溶性化学需氧量
SEC	size exclusion chromatography	尺寸排除色谱
SEM	scanning electron microscopy	扫描电镜
SMP	soluble microbial byproduct	可溶性微生物副产物
SRF	specific resistance to filtration	比阻
TB - EPS	tightly bound - EPS	紧密结合 EPS
TOC	total organic carbon	总有机碳
TSS	total suspended solids	总悬浮固体
VFA	volatile fatty acids	挥发性脂肪酸
VSS	volatile suspended solids	挥发性悬浮固体
WAS	waste activated sludge	废弃活性污泥

目 录

总序

论丛前言

前言

缩写词对照表

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 文献综述	5
1.2.1 污泥脱水性能的影响因素	5
1.2.2 污泥絮体中胞外酶的分布	10
1.2.3 污泥 EPS 的表征方法	11
1.2.4 预处理对后续厌氧/好氧消化过程中污泥消化和脱水性能的影响	14
1.3 研究目的	19
1.4 研究内容	20
1.5 研究技术路线	20
第 2 章 研究方法 with 实验内容	22
2.1 污泥絮体分层方法	22
2.2 荧光光谱的平行因子(PARAFAC)分析方法	23
2.3 荧光染色与共聚焦激光显微镜(CLSM)原位观察方法	24
2.3.1 荧光染剂制备与流程	24
2.3.2 冷冻切片	25