

| 水处理科学与技术·典藏版 03 |

城市污水污泥过程减量 及资源化利用理论与技术

田 禹 左 薇 陈 琳 卢耀斌 李之鹏 著



科学出版社

水处理科学与技术·典藏版 03

城市污水污泥过程减量及资源化利用 理论与技术

田 禹 左 薇 陈 琳 卢耀斌 李之鹏 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在概述污水污泥产生途径、组分特性及处理处置技术最新研究进展的基础上,着重介绍了解偶联、生物捕食、高温热解等污泥处理处置前沿技术,探讨了污水污泥减量化及资源化过程中的关键影响因子,阐释了污泥组分的转化规律及产物的形成途径,剖析了污泥处理处置技术的发展瓶颈,并提出了相应的对策和解决方案。

本书既可作为从事市政工程、环境科学、环境工程等学科和专业的硕士生、博士生以及高校教师的教学用书,也可作为相关学科科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水处理科学与技术:典藏版/曲久辉,任南琪,彭永臻,等编著. —北京:科学出版社, 2017.1

ISBN 978-7-03-051235-2

I. ①水… II. ①曲… ②任… ③彭… III. ①水处理 IV. ①TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 305492 号

责任编辑:朱 丽 / 责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2017 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2017 年 1 月第一次印刷 印张:29 3/4

字数:580 000

定价:3980.00 元(全 25 册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

随着我国城市化进程的加快和污水处理率的不断提高,城市污水污泥的产量不断增加,至 2010 年底,全国污泥日产量已达 40 万 t(以含水率 80%计)。由于技术和经济因素的制约,我国城市污水污泥处理处置技术远远落后于国际先进水平,大量的污泥随意外运、填埋或堆放,对城市环境与人民健康造成了极大的危害。污泥的处理处置已经成为我国可持续发展过程中亟待解决的重大环境问题。

本书全面介绍了污泥的解偶联、生物捕食、高温热解等城市污水污泥处理处置的前沿技术,重点阐述了污水污泥主要成分在处理处置过程中的转化规律及内在机理,深入剖析了处理处置过程中出现的科学问题,并针对可能出现的二次污染问题,提出了相应的控制手段与规避措施。本书是在整理和凝练作者所主持三项国家自然科学基金研究成果的基础上编著而成的,介绍了作者在研究过程中形成的污泥处理处置新思路、新观点。全书突出理论创新与实践可行并重的思想,强调污水与污泥协同处置,对提高我国污水污泥处理处置水平具有一定指导意义。

全书共分为 4 章。第 1 章在介绍城市污水污泥产生途径与组分特性的基础上,概述了国内外污泥处理处置技术的发展与现状。第 2 章介绍了污泥的解偶联技术,揭示了微生物代谢过程中能量解偶联发生的原因、内部驱动和维持的机制,分析了不同解偶联剂作用下的污泥减量效果,研究了解偶联剂在水处理系统内的迁移转化规律。第 3 章介绍了污泥的生物捕食技术,重点阐述了作者开发的蠕虫附着型污泥减量工艺,探讨了蠕虫捕食过程中氮、磷营养物释放与重金属迁移的内在机理,揭示了蠕虫捕食作用对污泥活性及沉降性能影响的作用机理,提出了基于生物捕食技术的污水与污泥协同处理方案。第 4 章介绍了污泥微波热解资源化技术,重点阐述了污水污泥在微波场内的升温特性与影响因子,揭示了热解产物的生成规律及转化机理,提出了微波热解污泥危害产物的控制措施。

在本书完成之际,诚挚感谢郑蕾、方琳、陈琳、张军、张晓琦、苏欣颖、吴迪、柳锋、陈东东、延崇建、张赛、曹长玉、吴伟男、赵娟、祝初梅、任正元、林海莲、祁伟、赵博研、姜天凌、谭涛、王宁等,他们在研究生期间的研究成果为本书的完成提供了重要的数据和资料。本书在编写过程中参阅了大量的国内外论文及论著,已列入参考文献中,在此对文献原作者一并致以由衷的谢意。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不足之处,敬请有关专家和广大读者不吝指正。

作 者

2012 年 1 月

目 录

前言	
第 1 章 城市污水污泥的来源、性质及其危害	1
1.1 城市污水污泥的来源	1
1.1.1 全球污水处理现状	1
1.1.2 城市污水污泥的定义	2
1.1.3 城市污水污泥的产生途径	2
1.1.4 城市污水污泥的现状	4
1.2 城市污水污泥的性质	5
1.2.1 污水污泥的水含量	6
1.2.2 污水污泥的复杂组成	7
1.2.3 污水污泥的农用价值	7
1.2.4 污水污泥的毒害性	10
1.3 污泥处理处置技术	18
1.3.1 传统的污泥处理技术	18
1.3.2 污泥减量新技术	20
1.3.3 传统的污泥处置技术	23
1.4 我国污泥处理处置现状	25
1.4.1 我国污水污泥的产量	25
1.4.2 我国污泥管理的发展历程	26
1.4.3 我国污泥处理处置面临的问题	27
1.5 本书的目标	29
第 2 章 代谢解偶联剂污泥减量技术	30
2.1 代谢解偶联剂污泥减量技术概述	30
2.1.1 代谢解偶联技术用于剩余污泥减量化研究背景	30
2.1.2 代谢解偶联剂用于剩余污泥减量化的研究基础	35
2.1.3 代谢解偶联剂用于剩余污泥减量化的主要研究方向	41
2.2 高效低耗代谢解偶联剂筛选及其工艺运行参数优化	42
2.2.1 高效低耗代谢解偶联剂筛选	42
2.2.2 代谢解偶联剂技术用于剩余污泥减量化工艺运行参数优化	45

2.3	解偶联剂对活性污泥系统综合运行效能的影响	59
2.3.1	解偶联剂污泥减量效果的长效性研究	59
2.3.2	解偶联剂对系统运行效能的影响	61
2.3.3	解偶联剂对活性污泥系统硝化作用的影响	63
2.3.4	解偶联剂对活性污泥特性的影响	71
2.4	解偶联剂在活性污泥系统内的迁移转化规律	77
2.4.1	解偶联剂在活性污泥中的短期分配行为	78
2.4.2	解偶联剂在活性污泥系统长期运行下的迁移转化行为	83
2.5	铜离子与解偶联剂协同下的污泥减量作用研究	86
2.5.1	添加铜离子与解偶联剂的活性污泥工艺研究	86
2.5.2	活性污泥工艺处理含铜废水中的解偶联剂作用研究	94
第3章	生物捕食污泥减量技术	100
3.1	污泥生物捕食技术概述	100
3.1.1	生物捕食技术削减剩余污泥量的理论基础	101
3.1.2	典型的生物捕食污泥减量工艺	108
3.1.3	目前发展趋势及存在的瓶颈问题	121
3.2	蠕虫高效污泥减量工艺研发	123
3.2.1	高效污泥减量蠕虫种群的筛选	123
3.2.2	蠕虫长期稳定生长的限制因子量化与调控	127
3.2.3	蠕虫附着型生物床设计	146
3.3	蠕虫附着型生物床运行参数优化	150
3.3.1	最佳填料板布置形式	151
3.3.2	单因素影响分析	165
3.3.3	DO 和 ISC 对污泥减量效果及蠕虫固着状态的作用	169
3.3.4	蠕虫附着型生物床的效能研究	172
3.4	蠕虫附着型生物床污泥减量工艺关键科学问题和内在机制	180
3.4.1	蠕虫附着型生物床中同步硝化反硝化作用的存在机制	181
3.4.2	蠕虫捕食污泥过程中重金属的迁移特征及影响研究	186
3.5	污水污泥协同处理组合工艺	207
3.5.1	SBR+蠕虫附着型生物床组合工艺	207
3.5.2	MBR+蠕虫附着型生物床组合工艺	214
第4章	污泥热解技术	257
4.1	污泥热解技术基本原理及特点	258
4.1.1	污泥热解技术的基本原理	258
4.1.2	污泥热解技术的各相产物的特点及其应用途径	265

4.1.3	污泥热解工艺的分类	268
4.1.4	污泥热解技术影响因素分析	278
4.1.5	微波热解简介	284
4.2	微波高温热解污水污泥反应系统的研制及产物分析方法	288
4.2.1	污泥微波热解反应系统设计	288
4.2.2	微波热解污泥产物收集系统	290
4.2.3	微波热解污水污泥产物分析技术	291
4.3	污泥微波热解技术制取燃油技术	295
4.3.1	污泥微波热解技术制取燃油影响因素	295
4.3.2	污泥微波热解油类产物性质及形成机制	309
4.4	微波污泥热解技术制取燃气技术	318
4.4.1	微波污泥热解技术制取燃气影响因素研究	319
4.4.2	污泥微波热解气态产物性质及形成机制	322
4.5	微波热解城市污泥固态产物性质分析及吸附剂制备	332
4.5.1	污水污泥微波热解固态产物特性分析	332
4.5.2	影响因素对污泥吸附剂吸附能力的影响	334
4.5.3	污泥热解灰吸附剂多次回用实验	336
4.5.4	污泥热解灰吸附剂处理染料废水的研究	343
4.5.5	吸附过程动力学与热力学研究	346
4.6	微波热解城市污泥固态产物制备微晶玻璃技术	354
4.6.1	微晶玻璃介绍	354
4.6.2	传统制取工艺介绍	358
4.6.3	微波热解城市污泥固态产物微晶玻璃制备工艺设计	360
4.6.4	微波热解城市污泥固态产物微晶玻璃性能测试	385
4.6.5	重金属固定化检测	386
4.6.6	特殊用途的微晶玻璃制备	387
4.7	微波热解污泥危害产物形成机制及控制技术研究	393
4.7.1	微波热解污水污泥气态产物中 H_2S 形成途径及控制技术	393
4.7.2	微波热解污水污泥含氮气态产物形成途径及控制技术	396
4.7.3	微波热解污水污泥油类产物中二噁英形成机理及控制技术	432
4.7.4	微波热解污水污泥固定产物重金属迁移转化途径及固定机理	433
4.8	微波热解污水污泥的能量平衡及经济分析	441
4.8.1	微波热解污水污泥的能量平衡	441
4.8.2	微波热解污水污泥经济技术浅析	444
	参考文献	446

第 1 章 城市污水污泥的来源、性质及其危害

1.1 城市污水污泥的来源

1.1.1 全球污水处理现状

水资源作为人类赖以生存和发展的基础性的资源,亘古以来一直是决定社会和经济发展的关键因素,区域水资源条件不仅与一个国家的能源、农业、工业等各领域的发展息息相关,而且直接决定了该地区的经济发展模式。然而,随着人类科技的不断进步以及城市经济的不断发展,水资源却首当其冲成为了最大的牺牲品。大到工业和农业用水,小到家庭日常用水,急速膨胀的人口密度使得人类对水资源需求量越来越高,对水资源的使用也越发频繁,并最终使得水资源短缺和水环境恶化问题日益严重。

值得肯定的是世界各个国家和地区在 20 世纪末到 21 世纪初期纷纷采取了包括制定相关法规政策,研发新型污水处理技术以及兴建污水处理设施等大规模的污水治理举措来应对、解决水污染和水资源紧缺问题。欧洲于 1991 年 5 月 21 日颁布实施了污水指令(91/271/EEC),该指令以减轻生活污水、工业废水的排放对环境造成的污染为目标,制定严格的污水处理标准,推动欧洲大批污水处理厂的兴建和升级、改造。我国“九五”、“十五”以及“十一五”规划中,均重点强调了水体污染的控制与治理,包括开展流域水生态功能区划,研究流域水污染控制,开发安全饮用水保障集成技术和水质水量优化调配技术,建立适合国情的水体污染监测、控制与水环境质量改善技术体系等措施,使得我国的污水处理产业得到了快速发展,污水处理能力及处理率迅速增长。截至 2010 年,我国已建成污水处理厂 1993 座,污水日处理能力达到 1.25 亿 m^3 ,城市污水处理率由 2005 年的 52% 提高到 2010 年的 75% 以上。在未来几十年里,随着各国经济(尤其是发展中国家)不断发展,全球污水处理行业仍将会以更加惊人的速度继续发展。正是在这样一个大背景下,污水净化过程中的必然产物——污水污泥,其产量正以每年超过 10% 的增长率迅速增加。对于传统的好氧活性污泥工艺,进水生化需氧量(biochemical oxygen demand, BOD)的 40%~60% 将会转化为污泥,其产量占总处理水量的 0.5%~1.0%,而真正意义上氧化分解的 BOD 仅占 30%~40%。因此,对大部分污水处理而言,进水污染物将以污水污泥的形式向自然界转化。污水污泥具有环境的危害性和资源可利用性的双重属性,它不仅是一种浓缩了污水中几乎全部有

毒有害物质(重金属、难降解有机污染物、病原微生物)的潜在污染物质;同时它还富含丰富的有机物和营养元素(氮、磷等),是一种可以回收利用的资源。因此,污水污泥的安全处理及资源化处置成为继污水处理之后又一个国内外研究和讨论的焦点。

1.1.2 城市污水污泥的定义

城市污水处理厂在处理污水的过程中会产生两个主要产物,一种是出水或被称为处理后的水,它将会被排放到自然水体中;另一种就是通常所说的污水污泥。污水污泥通常是以液态形式存在的,并且富集和浓缩了污水中几乎全部的物质,包括有机污染物、重金属、致病微生物、营养元素等。受到污水污泥的来源、性质等多种因素的影响,国内外对于污水污泥的定义不尽相同。欧盟委员会将污水污泥定义为污水初级处理(物理、化学处理)、二级处理(生物处理)以及深度处理(通常指氮、磷等营养物质的去除)过程中所产生的剩余物质,并将污水预处理过程中产生粗糙的固体颗粒物、砂砾以及油脂等残渣定义在污水污泥的范畴之外。美国和澳大利亚更倾向于用“生物固体”这一名词来替代“污水污泥”,主要原因是稳定化后的污水污泥是一种有资源利用价值的有机质固体。本书所称“城市污水污泥”是指在城市污水处理厂的初沉池、生物处理池以及二沉池等水处理构筑物中,伴随污水的一级处理(去除水中悬浮物或颗粒物)、二级处理(去除水中有机物)以及深度处理(去除水中 N、P 等营养元素)等污水处理过程所产生的、富集了微生物菌胶团、病原菌、有机污染物、重金属以及大量颗粒物的固液混合物(Smith, 2009; Aparicio et al., 2009)。

1.1.3 城市污水污泥的产生途径

图 1-1 所示的是一座城市的污水由产生到处理,再到排放的过程。可以看到,城市污水主要包含居民生活污水、机关、学校、医院、商业服务机构等各种公共设施排水,工业废水、农业废水以及初期雨水等。大量的污水经由城市污水管网收集后送到城市污水处理厂进行统一处理,达到排放标准的出水可以直接排入自然水体或进行回用。

一座常规的城市污水处理厂的包含格栅、沉砂池(未画出)、初沉池、生物处理池、二沉池等水处理单元,每一个水处理单元都对应着污水处理的每一个过程,一般来说,污水处理过程可以分为预处理、一级处理、二级处理以及三级处理四个阶段(图 1-2)。

污水进入污水处理厂后,首先进入预处理阶段,这一阶段的主要处理构筑物有格栅和沉砂池,污水中大部分浮渣、漂浮物、大颗粒杂质等物质在重力(沉淀)或机械力(筛分)作用下从水中脱离出来,最终形成半固态残渣,它们一般并不属于污水

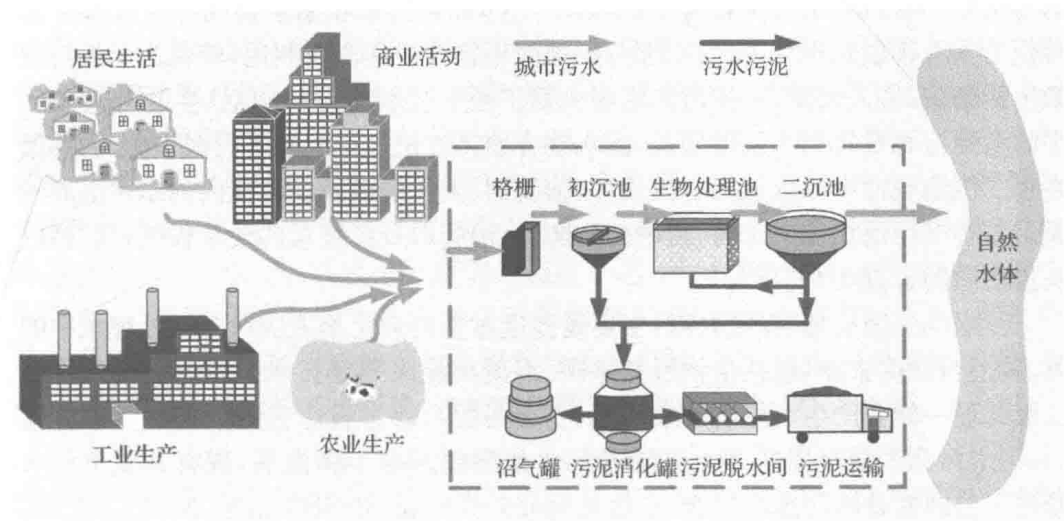


图 1-1 城市污水的产生、处理及排放

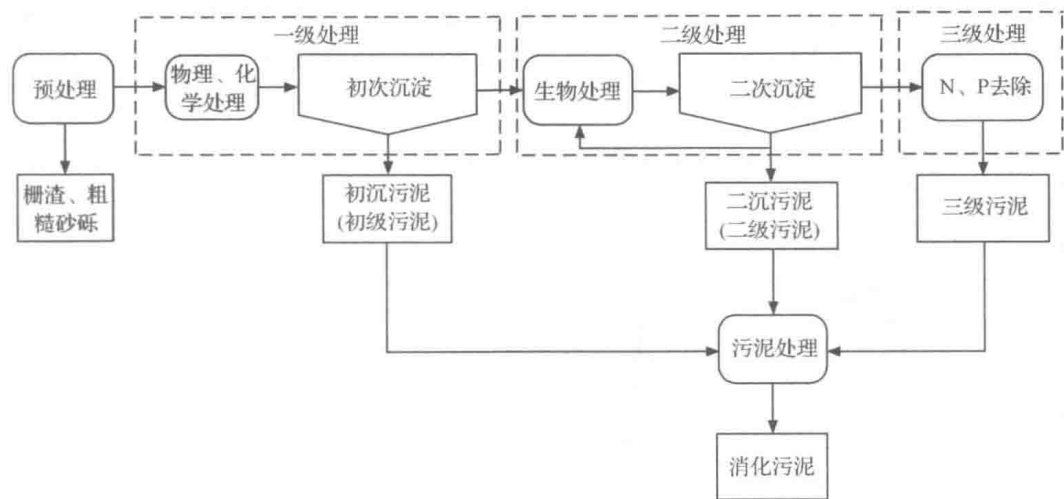


图 1-2 城市污水污泥的产生过程

污泥的范畴。

随后污水将进入一级处理阶段，这一阶段最常见的处理单元是初沉池，此外，为了提高污水中小颗粒物、胶体物质等悬浮物质的沉降效果，通常还引入絮凝和混凝等物化手段。经过一级处理后，污水中 50%~70% 的悬浮物以及 25%~40% 的 BOD 将从污水中分离出来，最终在初沉池底部形成了以无机物为主的初沉污泥。

紧接着，污水将进入以生物处理为主的二级处理阶段，该阶段通常采用活性污泥法对污水中的有机物进行降解，活性污泥中含有大量的菌胶团和细菌，它们将利

用污水中的有机物来维持自身生长,其中一部分有机物在微生物的呼吸作用下被转化为 CO₂排放到空气中,另一部分则被微生物合成代谢所利用,转化为活性污泥微生物细胞,进入污泥,致使污水污泥大量产生。生物处理结束后,生物处理单元中的活性污泥量得到大幅度增长,泥水混合物将被送入二沉池进行泥水分离,并最终在二沉池底部中形成包括有机残片、菌胶团、无机颗粒及胶体在内的二次沉淀污泥。与初沉污泥相比,二沉污泥中的脂肪酸、油脂以及纤维素的含量较低,氮、磷以及蛋白质的含量相对较高。

污水的三级处理(深度处理)主要是指通过生物或化学方法对二级处理水中的氮、磷进行深度去除,包括生物脱氮除磷、混凝沉淀除磷等技术。该阶段同污水的二级处理一样会产生大量的剩余污泥(三级污泥),通常设有三级处理的污水处理厂,污水污泥产量将提高 30%。随着污水处理技术的不断发展,现有的城市污水处理工艺通常是将污水的二级、三级处理合并到一起,如 SBR 工艺、MBR 工艺,因此也将二级污泥和三级污泥统称生物污泥。

一般来说,城市污水污泥主要由初沉污泥和生物污泥组成,其产量受到污水的污染程度、处理工艺以及污水处理厂出水排放标准等多个因素影响。一般而言,城市污水处理厂的污水污泥产量与污水处理效率成正比,即出水水质要求越高,污水污泥产量越大。例如,粗放的生物处理工艺,如稳定塘、湿地等污水自然处理工艺,其处理效果相对活性污泥法低,污水污泥产量也相对较低;而对于那些因为需要严格控制出水氮、磷含量而采用脱氮除磷等深度水处理工艺的污水处理厂,其污水污泥产量将比普通活性污泥法高出 30%。表 1-1 列举了不同水处理工艺对应的污水污泥产量。

表 1-1 基于单位污水处理量的污水污泥产率

污水处理工艺	干污泥产率(t/万 t)
一级强化处理工艺	0.73
传统活性污泥法	1.48
A/O 和 A ² /O 工艺	1.20
SBR 工艺	0.90
氧化沟工艺	1.09
其他处理工艺	1.34

资料来源：陈中颖等,2009

1.1.4 城市污水污泥的现状

随着污水处理技术的不断进步和发展,以及日益严格的污水排放标准,污水二级处理率不断提高,污水处理厂的规模也不断增大。污水污泥作为污水处理过程

中的必然产物,其产量也在不断增加,带来了日益严重的环境污染问题。表 1-2 给出了世界各主要国家和地区的污水污泥产量增长情况,可以看出在近 20 年的时间里,各国的污水污泥产量均有较大幅度的提高。欧洲污水污泥的年产量从 550 万 t(干污泥)涨到 900 万 t(European Commission,1997, 2001;Magoarou,2000)。中国继美国之后成为已经成为世界上污水污泥产量第二大国,据住房和城乡建设部《2009 年城市、县城和村镇建设统计公报》显示,截至 2009 年年底,我国已建成城镇污水处理厂 1993 座,污水总处理能力超过 1 亿 m³/d,按处理每万吨废水产生干污泥 2.7 t 来算,我国城市污水污泥日产量约为 90 万 t/d(含水率 97%)。产量如此庞大的污水污泥,如果未经妥善处理就排放到自然界中,将造成包括地下水、地表水、空气在内的严重二次污染,给城市环境与人民健康带来极大危害。

表 1-2 世界主要国家和地区干污泥产量一览

国家	干污泥产量(万 t/a)		增长幅度/%	文献出处
	1990~2000 年	2000~2010 年		
美国	615.4	800	30.0	GAOEWSBM(2008);Lee et al. (2002)
英国	158.3	218	37.7	Magoarou(2000);Wilson(1998)
德国	222.7	275	23.5	EC(2001)
意大利	80	100	25	GAOEWSBM(2008)
法国	82	117.2	42.9	EC(2001)
西班牙	68.5	108.8	58.8	EC(2001)
荷兰	28	150	435.7	GAOEWSBM(2008)
葡萄牙	24.5	35.9	46.5	EC(2001)
芬兰	13.6	16	17.6	EC
挪威	85	86.5	1.7	GAOEWSBM(2008)
丹麦	15.1	16	5.9	EC(2001)
比利时	8.5	15.9	87.0	EC(2001)
爱尔兰	3.8	11.3	197.3	EC(2001)
希腊	5.9	9.9	67.8	EC(2001)
中国	400	570	42.5	Lee et al. (2002)
日本	190	230	21.0	GAOEWSBM(2008)

1.2 城市污水污泥的性质

污水的净化过程中实际上是污染物由水相转移到泥相的过程,污水中绝大部分污染物质、颗粒物质会在物理、化学、生物等联合作用下富集到污水污泥中。因

此,对污水处理效果产生影响的所有影响因素,如污水的组成、污水受污染程度、污水处理标准、污水处理技术、水温等,均会对污水污泥的性质产生影响。作为污水净化过程的副产物,人们很难像模拟污水成分一样制得人工污泥,这一点也正是污水污泥处理处置难度较大的最主要原因。充分了解与认识污水污泥的性质,是合理选择污泥处理处置技术的关键。本书将从污水污泥的水含量、组成、农用特性以及毒害性等四个方面对污水污泥的性质进行介绍。

1.2.1 污水污泥的水含量

城市污水污泥是一种含水率极高的物质(97%~99%),采用传统机械脱水技术处理后,污泥的含水率仍然高达80%左右,这也是导致污水污泥体积庞大的最主要原因。国外学者 Vesilind 和 Martel 提出了污泥中所含的水分主要有四种(图 1-3),即自由水、毛细结合水、表面吸附水和结合水。自由水是指没有与污泥颗粒结合的水分,一般占到污泥总水含量的 65%~85%。这部分水是污泥浓缩的主要对象,可以在重力或机械力作用下去除;毛细结合水是通过污泥颗粒之间或颗粒裂缝中的毛细作用固定在污泥絮体表面的水分(Chu and Lee, 2008),这部分水占到总水分的 15%~25%,需要提供较高的机械作用力才能去除;表面吸附水是指在表面张力作用下覆盖于污泥絮体表面的水分,占总水分的 10%~15%;结合水是指经过水合作用,以化学方式与颗粒结合的水分,这部分水分的含量一般只占到污泥总含水量的 5%~10%,需要通过热处理过程才能去除。

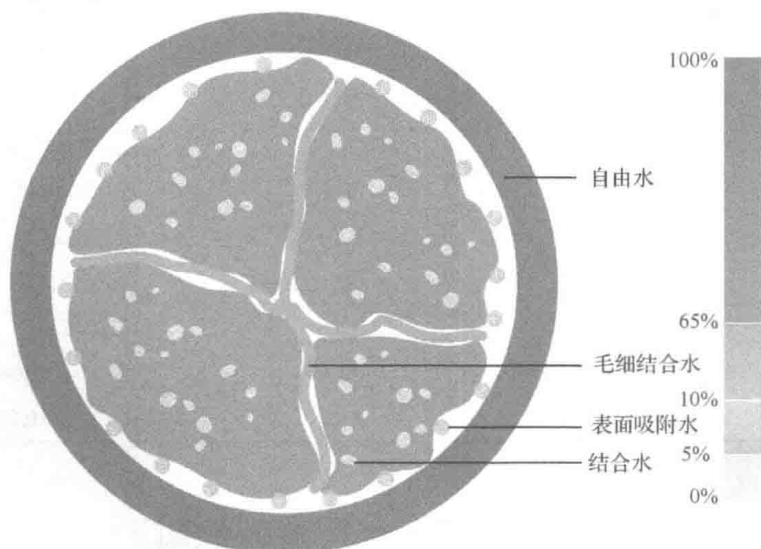


图 1-3 污水污泥的水分组成

1.2.2 污水污泥的复杂组成

污水污泥富集了污水中几乎全部的污染物质,其主要成分有蛋白质、脂肪(脂肪酸盐、油类、油脂)、尿素、纤维素、硅土、氮素、磷酸盐、铁离子、氧化钙、氧化铝、氧化镁以及碳酸钾等(Turovskiy and Mathai, 2006)。此外污水污泥中还含有大量的微生物、重金属、腐殖酸以及多种矿物质(表 1-3)。

表 1-3 污水污泥的组成

污泥的组成	含量
污泥干重/%	0.83~1.16
挥发性固体(占污泥干重)/%	59~88
水分/%	>95.0
脂肪类物质(醚溶性和醚浸出物质,占污泥干重)/%	13.0~75.0
蛋白质(占污泥干重)/%	15.0~41.0
氮(N,占污泥干重)/%	1.5~6.0
磷(P_2O_5 ,占污泥干重)/%	0.8~11.0
钾(K_2O ,占污泥干重)/%	0.0~3.0
纤维素((占污泥干重)/%	8.0~15.0
铁(非硫化物,占污泥干重)/%	2.0~8.0
硅土(SiO_2 ,占污泥干重)/%	10.0~20.0
有机酸(乙酸,占污泥干重)/(mg/L)	200.0~2000.0
总大肠杆菌(个/g 干污泥)	1.2×10^8
链球菌(个/g 干污泥)	2.1×10^5
沙门氏菌属(个/g 干污泥)	7.9×10^2
肠道病毒(个/g 干污泥)	3.6×10^2

资料来源: Metcalf and Eddy, 1995; Rulkens, 2003; Pathak, 2009

1.2.3 污水污泥的农用价值

污水污泥含有大量的具有农用价值的物质,包括能够改良土壤结构的有机质、植物生长发育所需的氮、磷、钾以及维持植物生长的多种微量元素(如钙、硫、镁、铁等)。因此,经过稳定化处理的污水污泥又被称作生物固体。

1. 有机质

污水污泥中含有丰富的有机物质,它们主要以溶解性有机物构成,如碳水化合物、氨基酸、小分子蛋白质以及腐殖酸等物质形式存在。表 1-4 给出了污泥中有机

物质的组成。

表 1-4 城市污水处理厂污泥的有机物组成

有机物种类及其含量(干污泥)	初沉污泥	剩余活性污泥	厌氧消化污泥
有机物含量/%	60~90	60~80	30~60
纤维素含量/%	8~15	5~10	8~15
纤维素含量/%	2~4	—	—
木质素含量/%	3~7	—	—
油脂和脂肪含量/%	6~35	5~12	5~20
蛋白质含量/%	20~30	32~41	15~20

资料来源:尹军等,2005

这些有机物质施加到土壤中,一方面可以改善土壤的结构,增强土壤的强度和持水能力,从而有效缓解土壤的水土流失现象;另一方面这些可生物降解的有机物质也为土壤微生物提供了良好的“食物”,并且在其降解过程会释放氮、磷等农作物生长所需的营养元素。换言之,污水污泥中的有机物不仅可以提升土壤微生物的代谢活性,丰富微生物种类,还能够为农作物和植物生长提供必需的营养物质,促进农作物和植物的生长。通常污水污泥中的有机物质(易降解的)含量占污泥干重的 50%以上,表 1-5 将污水污泥中有机物的含量与城市垃圾、动物粪便进行了比较,可以看到与动物粪便相比,污水污泥普遍具有较高的有价值含量,即便是经过消化或热处理等稳定化的污水污泥,其有机质含量仍然较高,因此在不考虑一些难降解有机物可能对环境造成的不良影响的条件下,污水污泥是非常良好的农业肥料。

表 1-5 污水污泥、城市垃圾以及动物粪便中有机物含量的比较

项目	有机物含量(占干污泥的比例)/%
生污水污泥	59~88
好氧消化污泥	60~70
厌氧消化污泥	40~50
堆肥处理污泥	<40
热处理污泥	50~85
城市垃圾(堆肥处理)	40~60
动物粪便	45~85

2. 营养元素

在污水净化过程中,污水中氮、磷、钾等营养元素会被微生物合成代谢利用,进

入到污水污泥当中。污水污泥中营养元素含量是污泥土地利用的价值和肥效的基础,其含量受到污水性质、污水处理工艺以及污泥处理方式等多个因素的影响。表 1-6 是世界主要国家和地区污水污泥氮和磷含量的比较,可以看到在经济发达地区,污水污泥中氮和磷的含量相对较大,其主要原因为这些地区的居民生活水平普遍较高,饮食质量相对较高,相应的污水中的氮和磷等物质含量也较高。

表 1-6 世界主要地区污水污泥中氮和磷含量 (单位: mg/kg 干污泥)

国家或地区	总氮含量	总磷含量	文献出处
中国	22 600	11 500	Wang et al. (2008)
中国香港	43 800~65 000	10 600~21 800	Wong et al. (2001); Chan et al. (2003)
印度	26 000~38 700	13 400~14 400	Nandakumar et al. ,(1998); Pathak et al. (2008)
阿根廷	19 300	7200	Torri and Lavado(2008)
加拿大	32 500~53 700	8700~16 900	Warman and Termeer (2005)
美国	20 000~60 000	2000~30 000	McMahon(1996)
英国	38 000	22 000	UK Environment Agency(1999)
西班牙	16 300~45 600	4200~16 700	Fuentes et al. ,(2004)

资料来源: Pathak et al. 2009

1) 氮

表 1-7 比较了不同种类及处理工艺污水污泥的氮含量。一般来讲,经过稳定化处理后的污泥的氮含量占干污泥量的 1%~6%,远低于商用肥料中的氮含量(11%~82%)。污泥中的氮主要以有机氮和可被植物直接利用的无机氮的形式存在,其具体含量取决于污泥的产生过程和处理工艺。例如,在厌氧消化污泥中,由于微生物未能对有机物进行彻底的氧化,因此污泥中的氮主要存在于含氮的溶解性有机物和微生物细胞中。在好氧消化污泥中,由于微生物的氧化作用完全,大部分有机氮和氨氮化合物都能够被充分氧化,因此污泥中的有机氮含量要较厌氧消化污泥低,并且好氧消化污泥中氨氮的含量仅占到总氮的 10%,而厌氧消化污泥中的氨氮则占到约 30%。污水污泥中的无机氮能够直接被农作物所利用,而有机氮必须被微生物利用转化为无机氮后才能被农作物吸收利用。因此,在将污水污泥用作氮肥时,需首先考虑污泥中有机氮和无机氮的含量,以确定该污泥的肥效。此外,污泥在被用作氮肥的施加到土壤中时,同样需要满足氮肥的农用标准,即不能超过农作物对氮的吸收利用量,否则过量的氮可能渗透过植物的根系区域,进而对地下水造成污染。

表 1-7 不同种类的污水污泥的氮含量比较

污水污泥的种类/处理方式	总氮含量(占干污泥的比例)/%	氨氮含量(占总氮的比例)/%
液态污泥	1~7	2~70
好氧消化,重力浓缩	5~7	5~10
好氧消化,机械浓缩	4~7	2~8
厌氧消化	1~7	20~70
半固态污泥	2~5	<10
好氧消化,机械脱水	3~5.5	<5
厌氧消化,机械脱水	1.5~3	<5
石灰处理	3.4~5	<10
固态污泥	1~3.5	<10
好氧消化,石灰处理	2.5	<10
堆肥处理	1.5~3	10~20
好氧消化,脱水干化处理	2~3.5	<10
厌氧消化,脱水干化处理	1.5~2.5	<10
干化污泥	3.5~6	10~15

2) 磷

与氮相似,污水污泥中的磷主要以有机磷和无机磷形式存在,它们的含量同样取决于污水的性质以及污泥处理工艺。一般来说,污水污泥中的磷含量占干污泥总量 0.8%~6.1%,略低于商用肥料中的磷含量(8%~24%),因此,相比污泥中的氮而言,污泥更适宜作为磷肥来供农作物吸收和生长。

3) 其他营养元素

除了氮和磷之外,污水污泥还含有农作物生长所必需的钾、硫、镁、硼、硒、钴等微量元素(表 1-8),经稳定化处理后的污水污泥可以很好地满足农作物生长对微量元素的需求,因而具有良好的农用价值。

表 1-8 污水污泥中营养物质含量

物质成分	变化范围	典型值
K ₂ O/(g/kg 干污泥)	0.1~95	4.2
MgO/(g/kg 干污泥)	0.1~122	9.7
CaO/(g/kg 干污泥)	0.1~727	73.7

1.2.4 污水污泥的毒害性

对于城市污水生物法处理工艺而言,污水中的大部分有毒有害物质(如有机污