

城镇生活污水处理厂剩余污泥减量化及资源化处理

郑中洁, 向雄飞, 李庆新*

武汉工程大学化学与环境工程学院, 湖北武汉 430205

摘要:针对我国生活污水处理厂中剩余污泥的存在现状,从减量化与资源化利用两个角度入手对剩余污泥处理处置的现状进行理论分析。根据污泥过程减量与污泥后减量这两个方向梳理了国内外剩余污泥减量化方法以及比较常见的污泥资源化方法;在污泥产生过程对剩余污泥进行脱水处理既能提高水资源的利用率,有效实现了污水的净化,又能与国家实现绿色可持续发展的理念相结合,其中比较常用的技术包括基于微生物隐性生长的污泥减量技术、基于代谢解耦联的污泥减量化技术以及基于微型动物捕食作用的污泥减量技术;而在污泥产生后采用泥窑协同处理污泥以及将污泥做碳源,既能实现污泥减量化,又能变废为宝。

关键词:剩余污泥;污泥处置;减量化;资源化

Reduction and resource utilization of surplus sludge from urban domestic sewage treatment plants

Zhongjie Zheng, Xiongfei Xiang, Qingxin Li*

School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan University of Engineering, Wuhan, Hubei 430205

Abstract: In response to the current situation of surplus sludge in domestic sewage treatment plants in China, a theoretical analysis is conducted on the current situation of surplus sludge treatment and disposal from the perspectives of reduction and resource utilization. Based on the two directions of sludge process reduction and sludge post reduction, this paper summarizes the methods for reducing excess sludge at home and abroad, as well as common methods for sludge resource utilization. Dehydration treatment of excess sludge during the sludge production process can not only improve the utilization rate of water resources, effectively achieve sewage purification, but also combine with the national concept of green and sustainable development. The commonly used technologies include sludge reduction technology based on microbial implicit growth, sludge reduction technology based on metabolic uncoupling, and sludge reduction technology based on micro animal predation. After the sludge is generated, using a sludge kiln to synergistically treat the sludge and using the sludge as a carbon source can not only achieve sludge reduction, but also turn waste into treasure.

Keywords: excess sludge; Sludge disposal; Reduction; Resource utilization

1. 前言

随着经济的发展和科技水平的日益提升,我国在污水治理规模与处理能力上也有了很大的提高,见表1。截止自2021年我国已建污水处理厂共有2827座,污水年排放量为 $6.2508 \times 10^{10} \text{ m}^3$,污水年处理量为 $6.1190 \times 10^{10} \text{ m}^3$,城镇污水处理率达到97.89%^[1]。目前,我国城镇污水处理规模达到2.2亿吨/天,每年产生的80%含水率的湿污泥超过6000万吨^[2],随着污水收集率和处理率的进一步提升和排水管道清淤污泥的产生,预计到2025年我国污泥年产生量将突破1亿吨,污泥处理处置成为阻碍城镇污水处理的短板现象凸显^[2,3]。我国《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》中明确,“十四五”规划期间我国的污泥无害化处理率应达到90%以上,在实现污泥稳定化、无害化处置前提下,稳步推进资源化利用,在2035年全面实现污泥无害化处置^[4]。随着污水处理量的增加,剩余污泥量的增速越来越快,其自身携带大量的病原菌、微生物、重金属以及有机污染物,组成成分比较

复杂。如果污泥处理不当将会对环境造成严重的二次污染,对生态环境构成严重威胁^[5,6],因此对剩余污泥的处理和处置至关重要。

表1 2012~2022年全国城镇污水处理状况调查表^[7,8]

年份	城市污水厂数目/座	污水年排放量(万 m^3)	污水日处理能力/(万 $\text{m}^3 \cdot \text{day}$)	城市污水处理率/%
2012	1670	4167602	11733	87.30
2013	1736	4274525	12454	89.34
2014	1807	4453428	13087	90.18
2015	1944	4666210	14038	91.90
2016	2039	4803049	14910	93.44
2017	2209	4923895	15743	94.54
2018	2321	5211249	16881	95.49
2019	2471	5546474	17863	96.81
2020	2618	5713633	19267	97.53
2021	2827	6250763	20767	97.89

2. 剩余污泥减量化技术概述

我国剩余污泥的传统处理技术主要是通过集中收集后,

再采取各种物理、化学生物的处理手段,如机械脱水、厌氧消化等去达到污泥的减量化、稳定化、资源化的目的;由于这些传统剩余污泥处理技术已经不能满足我加急剧增长的污水处理能力的需求,因而近年来污泥减量化新技术发展较为快速。污泥减量化是国内研究开始得比较晚的污泥处理技术,区别于传统的污泥处理方法。遵从“源头治理”的新思路,使污泥在产生过程中达到减量排泥的效果,从而减轻了剩余污泥的处理压力^[9],为发展环境友好型社会提供了一条发展新思路。

针对剩余污泥的处理,目前国内外的许多学者探究出了一些物理、化学、生物的处理方法使剩余污泥达到减量化目的,主要分为两类:①污泥过程减量技术,主要分为隐性生污泥减量技术、解偶联代谢污泥减量技术两大类。隐性污泥减量技术是指微生物利用衰亡细胞溶解所产生的二次基质生长的过程^[10, 11],它包括细胞溶解和二次基质被微生物利用两步^[12]。通过各种溶胞技术强化微生物的隐性生长可以达到使污泥减量的目的^[13-15]。解偶联代谢污泥减量技术是指在一定条件,如存在影响 ATP 合成的物质、存在过剩能量(底物浓度/污泥浓度)、在不适宜的温度下生长等情况下,细胞的氧化磷酸化过程被抑制、底物被氧化的同时,ATP 不能大量合成,或合成以后迅速由其他途径释放^[16],这样使得细菌在保持正常分解底物的同时,自身合成速度减慢,表观产率系数降低,从而实现降低污泥产量^[10, 16-20]。②污泥后减量技术,即在污泥产生后,通过进一步浓缩、稳定、脱水和最终处置实现污泥减量的目的,如污泥焚烧、土地利用等。

3. 剩余污泥过程减量技术

3.1 基于微生物隐性生长的污泥减量技术

微生物依靠自身细胞溶解产物的生长方式称为隐性生长^[21],微生物隐性生长的过程需要完成 2 个步骤:溶胞和生长^[22]。首先运用相应手段作用于污泥实现溶胞过程;然后将处理后的污泥回流到生物反应器当中促进微生物隐性生长,从而导致污泥产率降低,有效缓解剩余污泥处理问题^[11]。溶胞过程是此类技术达到预期效果的关键点,目前效果较好的溶胞技术主要有臭氧氧化法、超声波法、水热裂解法等。

3.1.1 臭氧氧化污泥减量技术

臭氧氧化技术是目前应用最为广泛的预氧化技术之一,它可以破坏细胞膜,降解菌胶团结构,在剩余污泥的减量化和稳定化处理中已经有工程化应用^[23]。郭恰等人通过研究得知,采用臭氧微气泡减量稳定处理工艺与卫生填埋处置工艺相比,采用单一卫生填埋处理处置工艺减少了 0.42d 的碳排放

量,可以使污泥在脱水环节后达到最大稳定化^[24];何楚茵等对剩余污泥进行臭氧氧化破解实验,实验过程中随着臭氧通入剩余污泥的反应时间增加,使得 TS 和 VTS 均显著下降,其去除率分别达到 57.33% 和 72.76%,滤饼含水率下降到 66.6%,其中 TS 和 VTS 去除率显著下降是由于污泥中的部分无机物质会随着臭氧氧化而溶解,使得污泥的固体物质质量得到减量化;而滤饼含水量的下降说明臭氧氧化处理可有效提高污泥的脱水性能^[25];史锦芳等研究了臭氧对剩余污泥的溶胞效果,在实验过程中采用质子交换聚合物膜电解法 (PEM) 的臭氧发生器产生臭氧对剩余污泥进行氧化处理后可知随着臭氧通入时间的增加,蛋白质被臭氧氧化分解的速率变快,污泥上清液中的 UV₂₅₄ 值呈上升趋势,pH 逐渐下降,这说明臭氧可以促进污泥絮体的破坏,使絮体颗粒变小、变分散,经臭氧处理后的污泥减量化效果明显^[26]。

3.1.2 超声联合其他工艺污泥减量化技术

超声波是指频率高于 20000Hz 的声波,它方向性好,穿透能力强,易于获得较集中的声能。超声波减量化工艺作为一种新型技术,主要利用低频超声波空化和水力剪切的作用,释放酶等物质加速污泥的裂解^[27]。随着对裂解技术的不断研究深入,多种破解技术的联用正在逐渐成为今后的研究方向,不再局限于单一超声波法预处理污泥^[28]。韩青青等利用超声波细胞粉碎机以及离心机对污水处理厂进行 A²/O 工艺处理后的剩余污泥进行研究发现,在适宜的超声条件(超声时间:10min,声能密度为:0.8 W/mL)下利用絮凝剂改善絮体的团聚性能,让超声—絮凝剂联合作用使污泥颗粒尺寸变小且污泥絮体团聚更密实,通过超声作用调整污泥结构,进一步提高污泥的脱水性能^[29]。刘永剑等对剩余污泥进行超声预处理发现污泥经超声—厌氧消化后,污泥溶出的蛋白质浓度远高于未处理污泥和单独厌氧消化污泥,这说明超声处理能够促进水解,从而加快厌氧消化进程,有助于挥发酸等小分子物质的积累,更加有利于污泥的处理,通过研究他们得出超声联合厌氧消化组合工艺的最佳参数(声能密度为:1.5 W/mL,处理时间:30min,厌氧消化时间:7 d)^[30]。罗庆等在超声波频率为 20 kHz,声能密度为 0.5 W/mL,臭氧投加速率为 100 mg/min 的条件下,采用超声波—臭氧工艺反应对剩余污泥进行处理,使污泥减量率达到 40.11%^[31]。刘昌等在超声 30 min(间歇式,脉冲比为 1:1,声能密度为 2 W·mL⁻¹)的条件下采用加碱—超声联合处理剩余污泥,发现清河污泥 TS、VS 在预处理前分别为 5.72% 和 9.26%,但在加碱超声后 TS、VS 的溶出率增加为 18.39% 和 23.76%,这说明碱—超声波处理更能有效破解污泥^[32];章峰等的研究结果表明超声对污

泥的预处理不仅有很好的促进作用还对不同浓度污泥的处理效果有很大区别^[33]。

针对超声时间的选择以上学者所用的时间都不同,但他们一致认为利用超声处理污泥的时间不宜过长,在选用超声波技术对剩余污泥进行脱水处理时既要充分考虑剩余污泥的来源与特点,同时针对不同浓度的污泥应设置不同的超声波频率与超声的时间,确保脱水效率。

3.2 基于代谢解偶联的污泥减量化技术

从能量守恒的角度而言,解偶联是指基质消耗产生的能量大于生长和维持正常生命活动的能量需求。但过剩的能量并未被贮存,而是以无效的热能形式释放到环境中,导致了污泥的表现产率大大减少^[9, 10],因此可以通过控制微生物的同化和异化作用,达到污泥减量化的目的^[11]。

从微生物新陈代谢的角度而言,无论是合成代谢还是分解代谢,都是在细胞中偶联进行^[34]。细胞中用于细胞物质合成的 ATP 约占总量的 1/3^[35, 36],解偶联剂降低了细胞的 ATP 合成速率,必然降低细胞物质的合成速率,影响细胞生长和增殖^{[37] [38]},当 ATP 无法满足微生物生命活动时,由于能量的缺失,一定程度上会影响微生物的繁殖与生命活动从而降低微生物的产生量^[39]。

化学解偶联剂污泥减量化技术是一种以“源头控制”为目标的污泥减量化技术^[9],方便使用,可操作性强,不需要对现有污水处理工艺作大的改进,对污泥的减量化效果好。目前研究的化学解偶联剂主要分为硝基酚类(DNP、p-NP、m-NP、o-NP 等)、氯酚类(TCP、2,4-DCP、PCP、TCS 等)、季铵盐类(如苄基季铵盐)季磷盐类(THPS、THPC 等)以及氨基酚(AP、2,4D、氨基酸等)五种^[9]。

解偶联剂在污泥减量化方向具有良好的应用能力和发展前景,学者林威通过开展 TCS 强化污泥减量化与调质脱水的研究发现向污泥混合液中投加 TCS 会使得微生物的氧化与磷酸化相互解偶联,使生物量减少^[40]的同时降低污泥 MLSS、MLVSS 和污泥产率,提高污泥减量化率,对污泥减量化起到一定作用效果,除此之外 TCS 的投加还可使污泥颗粒粒径明显减小^[40]。但化学解偶联剂具有一定生物毒性,作为环境异体物质,解偶联剂通常为难降解物质,所以在环境中会有残留以致人类体内积累,危害人类健康^[34]。

3.3 基于微型动物捕食作用的污泥减量化技术

生物处理技术是世界上广泛使用的污水处理技术,而污水中产生的污泥又是一种由多种多样的微生物组成的复杂的生态系统。活性污泥中的微生物主要由细菌、放线菌、真菌以及原生动物和后生动物等构成^[41],其中原生动物(如纤

毛虫(Ciliate)和后生动物(如轮虫(Rotifers)、寡毛类、环节动物(Oligochaete)及线虫(Nematode))在食物链的最高端,起捕食者的作用捕食细菌,可以将污泥转化为能量、水和二氧化碳,从而使污泥量减少^[42]。基于这些微型动物的生物捕食作用而开发的污泥减量化技术具有能耗低、不产生二次污染等优点,具有较好的应用前景^[43]。刘博杰等采用序批式投加剩余污泥方式研究了 MBR 中微型动物种类与数量的变化规律以及生物捕食作用对污泥减量化效果的贡献,在实验过程中他们向 MBR 一共投加待处理污泥 126.9g,污泥累积减少量为 100.2g, 而因生物捕食作用引起的污泥累积减少量为 74.0g, 占总的污泥累积减少量的 73.9%,这说明生物捕食在污泥减量化中占有主导作用^[44]。

微型动物所具有的捕食速度以及其捕食作用,既能提高细菌活性,防止细菌种群的退化,又能促进细菌的絮凝作用,因此利用微型动物对污泥进行减量化具有较强的可行性^[45, 46]。

4. 剩余污泥后减量化技术

污水处理后约有一半的重金属会转移至污泥中,其中包括: Zn、Hg、Cr、Cu、Pb、Cd、Ni 和 As 等^[47]。因为污泥自身成分比较复杂,并且携带大量的微生物、病原菌、重金属以及有机污染物^[6],所以剩余污泥应进行最后的处理处置。通过从剩余污泥中回收有价值的物质和能源,既能够实现资源的循环利用而利于环境保护和可持续发展,还可使剩余污泥得到妥善的处理处置^[48]。

4.1 焚烧处理

污泥焚烧是污泥减量化最为显著的一种处置方式,经污水处理厂处理设施排出的污泥含水率一般近 98%,一般情况下,使用焚烧处理技术处理污泥时,污泥含水率应低于 80%。污泥的焚烧处理主要分为单独焚烧以及协同焚烧两大类^[49]。

4.1.1 单独焚烧

单独焚烧作为一项相对成熟的技术,可以在最大程度实现污泥减量化的同时有效控制各类污染物排放^[47]。污泥焚烧产生的热量可以用来发电、供热等,焚烧灰可以做建筑材料、陶瓷等^[50],若灰渣所制砖块中若无重金属渗出,则制得的砖块可用于基础公共设施建设^[51],焚烧后的灰分经过固定化后还可填埋处置。经过浓缩、机械脱水等步骤后含水率仍然很高的污泥直接焚烧会消耗大量的燃料,产生的尾气会含有大量水蒸气,需要在燃烧过程中配备大型烟气处理设备^[52]。若焚烧工艺设置不合理,则会导致在焚烧过程中产生大量飞灰、炉渣和废气,其中酸性气体、重金属二噁英等会对环境造成二次污染^[53],所以必须加强对焚烧排放废气的管理。

4.1.2 协同焚烧

常见污泥协同焚烧工艺包括水泥窑协同焚烧、燃煤热电厂协同焚烧和垃圾焚烧发电厂协同焚烧^[54]。污泥中生物质含量高,其灰分与水泥生料成分相似,适合用作水泥生料替代原料在水泥窑中焚烧^[55],实现污泥的资源化,体现了循环经济“减量化、再利用、再循环”的原则,符合我国循环经济发展模式^[56, 57]。石灰中的钙是生产水泥的潜在原料,污水处理厂采用石灰对污水进行预处理,为污泥在水泥窑内协同处理提供了可行性^[58]。在国际上水泥窑协同处理污泥技术经济环境效益显著,得到广泛研究和应用,在水泥窑协同处置固废领域已经建立相关政策体系和技术标准,市场实现系统化和规范化^[53]。

4.2 作碳源回收利用

随着我国对环境保护的日益重视,随着 2015 年“水十条”的正式发布,对污水处理厂氮磷浓度的排放标准有了更高的要求。碳源不足成为了反硝化脱氮和生物除磷的主要因素,因此需要在污水处理过程中投加外加碳源来提高脱氮效果^[59]。利用剩余污泥厌氧发酵制取碳源,既可将产生的碳源回用解决了反硝化碳源不足的难题,又能进一步提高脱氮效率,实现资源化和无害化的双重效益^[60]。

4.3 农用

污泥中含有大量植物所需的营养成分和微量元素,所以经过处理后得到的剩余污泥可以用于农业应用^[61]。将污泥施用于农田后会增加土壤的肥力,促进作物的生长,但由于污泥中含有重金属(Zn、Hg、Cr、Cu、Pb、Cd、Ni 和 As)等有害物质,大量施用也会对地下水和土壤造成污染^[62];因此,考虑到污泥中所含的重金属对作物的影响,应合理地施用污泥,一般以作物对氮的需要量以污泥施用量的限度,污泥中重金属含量必须符合农用标准,每年不得超过 $30\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,且连续施用不得超过 20 年(GB5284-1984)^[63, 64]。

5. 展望

在当前十分注重节能减排以及对能源需求与日俱增的大环境之下,剩余污泥如何处置,怎样更加环保的去处置在污水处置受到社会各界的广泛关注,对污泥的处置需要结合经济、环境和生态等多方面效益,选择合适的污泥处置方式和技术方案。

基于微生物隐性生长的污泥减量技术中选用的超声波技术处理污泥既能够使污泥颗粒尺寸变小,进一步提高污泥的脱水性能,又能在与厌氧消化、 A^2O 等工艺联用时使污泥絮体团聚更密实,调整污泥结构,促进水解,加快厌氧消化进

程,促进挥发酸等小分子物质的积累,更有利于后期对污泥的资源化、稳定化以及无害化的处理,但利用超声波对剩余污泥进行脱水处理时要充分考虑剩余污泥的来源与特点,针对不同浓度的污泥应设置不同的超声波频率与超声的时间,确保脱水效率。化学解偶联剂污泥减量技术具有减量效果好,可操作性强等优点,但使用的解偶联剂大多对环境有毒害性,所以在今后的研究中探索一种毒害性小且易降解的化学解偶联剂很有意义。污泥焚烧是污泥减量化最为显著的一种处置方式,而水泥窑协同处理技术工艺简单,既能实现污泥减量化,又能变废为宝,是未来污泥处置的一个发展方向,截至 2022 年,我国具有水泥窑协同处置危废经营许可证的水泥企业有 68 家,覆盖 25 个省市,这说明我国水泥窑协同处理污泥的发展空间巨大。

参考文献

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部. 城乡统计年鉴 [EB/OL] [Z]. 2022
- [2]李国,覃福京,覃柳媚, et al. 浅谈我国市政污泥来源特性及处理处置现状 [J]. 广东化工, 2023, 50(02): 107-8+89.
- [3]戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势 [J]. 科学, 2020, 72(06): 30-4+4.
- [4]三部门联合印发《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》明确 2025 年城市污泥无害化处置率达到 90%以上 [J]. 建筑技术, 2022, 53(10): 1428.
- [5]陈宇. 阳江市污泥现状调查及发展处理展望 [J]. 广东科技, 2012, 21(09): 213-4.
- [6]李成涛,崔倩,陈娜, et al. 嗜热微生物促进剩余污泥减量降解工艺优化 [J]. 陕西科技大学学报, 2019, 37(04): 23-8+34.
- [7]中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城镇排水与污水处理状况公报(2015-2020 年) [R], 2022.
- [8]中国水网/中国固废网研究院. 中国污泥处理处置市场分析报告《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》 [R], 2013.
- [9]刘宇辉,解庆林. 解偶联污泥减量技术的研究进展 [J]. 净水技术, 2016, 35(S1): 70-4.
- [10]王嵘. 臭氧破解污泥的溶出机制及同步臭氧氧化对污泥减量效能的影响研究 [D]; 南昌大学, 2008.
- [11]李立欣,赵乾身,马放, et al. 废水处理中污泥减量技术现状及发展趋势 [J]. 水处理技术, 2015, 41(01): 1-4.
- [12]张志永. 生物磁性载体的研制及其在废水处理中的

- 试验研究 [D]; 暨南大学, 2007.
- [13]刘琳, 宋碧玉. 污泥减量化技术新进展 [J]. 工业用水与废水, 2005, (03): 5-9.
- [14]王涌, 王长庆. 污泥减量化技术及其研究进展 [J]. 广州化工, 2013, 41(08): 52-3+80.
- [15]闫家怡, 聂丽曼. 废水处理中污泥减量化技术研究进展 [J]. 科技信息, 2010, (24): 736-7.
- [16]胡海兰, 方芳, 冯骞, et al. 代谢解耦联技术在污泥减量化中的应用研究进展 [J]. 净水技术, 2014, 33(02): 36-41.
- [17]梁鹏, 黄霞, 钱易, et al. 污泥减量化技术的研究进展 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, (01): 44-52.
- [18]刘杰. 改良型 A~2/O 工艺污泥减量及脱氮除磷研究 [D]; 重庆大学, 2010.
- [19]张海珍. MCMP-II 多功能复合微生物制剂用于城市污水处理厂污泥减量的生产性试验研究 [D]; 重庆大学, 2008.
- [20]寇青青, 朱世云, 覃宇, et al. 污泥减量化技术研究进展 [J]. 净水技术, 2012, 31(06): 4-8+13.
- [21]魏源送, 樊耀波. 污泥减量技术的研究及其应用 [J]. 中国给水排水, 2001, (07): 23-6.
- [22]邓雍. 臭氧氧化污泥的试验研究 [D]; 重庆大学, 2013.
- [23]王玉. 剩余污泥超声/臭氧氧化预处理及厌氧消化产气研究 [D]; 山东建筑大学, 2018.
- [24]郭恰, 马艳. 基于质量平衡法的污泥处理处置工艺碳减排核算分析 [J]. 净水技术, 2019, 38(10): 107-11.
- [25]何楚茵, 金辉, 卜淳炜, et al. 臭氧处理剩余污泥的减量化实验研究 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 4228-34.
- [26]史锦芳, 金辉, 游思琴, et al. 臭氧对剩余污泥的破解效果研究 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, 53(02): 83-7.
- [27]Engineering - Chemical Engineering; Reports from Kyonggi University Add New Data to Findings in Chemical Engineering (Enhanced efficiency for better wastewater sludge hydrolysis conversion through ultrasonic hydrolytic pretreatment) [J]. Journal of Engineering, 2017.
- [28]冯怡文. 基于 RSM 模型对超声波强化污水脱氮除磷的试验研究 [D]; 西南交通大学, 2019.
- [29]韩青青, 林雪君, 李燕敏, et al. 超声波预处理城市水厂剩余污泥的研究 [J]. 工业安全与环保, 2016, 42(10): 96-9.
- [30]刘永剑, 刘宇雷, 徐学信, et al. 超声/厌氧消化处理剩余污泥参数优化及机理研究 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(05): 84-90.
- [31]罗庆, 王小雄, 张媛, et al. 超声波协同臭氧处理剩余污泥 [J]. 石化技术与应用, 2022, 40(05): 355-8+61.
- [32]刘昌, 曾萍, 宋永会, et al. 超声与碱预处理对剩余污泥磷及有机物释放的影响 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(05): 1276-84.
- [33]章峰, 朱仁发, 徐冰. 超声法处理污水厂的剩余污泥 [J]. 安徽化工, 2015, 41(06): 65-7.
- [34]李鹤超, 严红, 肖本益. 化学解耦联剂污泥减量技术的研究进展 [J]. 工业水处理, 2015, 35(01): 9-13.
- [35]Roskoski R. Principles of biochemistry - with a human focus: Garrett, R. H., Grisham, C. M [J]. Biochemistry and Molecular Biology Education, 2002, 30(5).
- [36]Book Review: Brock Biology of Microorganisms - 14th edition [J]. Science Progress, 2016, 99(3).
- [37]李旻瑜, 郑平, 张萌. 解耦联剂对废水生物处理系统的污泥减量作用 [J]. 水处理技术, 2016, 42(07): 6-11+24.
- [38]Feng X-C, Guo W-Q, Yang S-S, et al. Possible causes of excess sludge reduction adding metabolic uncoupler, 3,3',4',5-tetrachlorosalicylanilide (TCS), in sequence batch reactors [J]. Bioresource Technology, 2014, 173.
- [39]Low E W, Chase H A, Milner M G, et al. Uncoupling of metabolism to reduce biomass production in the activated sludge process [J]. Water Research, 2000, 34(12).
- [40]林威. 解耦联剂 TCS 强化污泥减量和调质脱水过程的机制研究 [D]; 哈尔滨工业大学, 2020.
- [41]朱海霞, 陈林海, 张大伟, et al. 活性污泥微生物菌群研究方法进展 [J]. 生态学报, 2007, (01): 314-22.
- [42]王琳, 王宝贞. 污泥减量技术 [J]. 给水排水, 2000, (10): 28-31+2-1.
- [43]董亮, 朱荫涓, 胡勤海, et al. 应用 DRASTIC 模型评价西湖流域地下水污染风险 [J]. 应用生态学报, 2002, (02): 217-20.
- [44]刘博杰, 樊慧菊, 封莉, et al. 膜生物反应器工艺中基于生物捕食作用的污泥减量效果研究 [J]. 环境污染与防治, 2012, 34(11): 30-3+9.
- [45]高春娣, 袁金萍, 殷波, et al. 基于强化微型动物捕食作用的污泥减量技术研究 [J]. 安全与环境工程, 2008, (03): 53-5.
- [46]陈小刚, 张洪林, 于冰, et al. A/O MBR 工艺中生物

- 群落结构变化的研究 [J]. 环境工程技术学报, 2011, 1(02): 145-50.
- [47]李赞. 城市污泥焚烧技术研究进展 [J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(03): 46-56.
- [48]李义勇. 基于污泥破解的剩余污泥资源化利用 [D]; 华南理工大学, 2014.
- [49]张冬, 董岳, 黄瑛, et al. 国内外污泥处理处置技术研究与应用现状 [J]. 环境工程, 2015, 33(S1): 600-4.
- [50]黄新文, 林春绵, 何志桥, et al. 制革污泥资源化处理的研究 [J]. 中国皮革, 2002, (17): 9-11.
- [51]汪靓, 朱南文, 张善发, et al. 污泥建材利用现状及前景探讨 [J]. 给水排水, 2005, (03): 40-4.
- [52]Aneta M, Monika K-G, Agnieszka K-K, et al. Analysis of sewage sludge ashes from air and oxy-fuel combustion in a circulating fluidized-bed [J]. E3S Web of Conferences, 2016, 10.
- [53]杨健雄. 水泥窑协同处理污水处理厂剩余污泥的研究进展 [J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(10): 101-3.
- [54]王成, 陈柏校, 夏玉坤, et al. 污泥焚烧技术现状及发展趋势 [J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(06): 121-4.
- [55]Huang Y, Li H, Jiang Z, et al. Migration and transformation of sulfur in the municipal sewage sludge during disposal in cement kiln [J]. Waste Management, 2018, 77.
- [56]杭世珺, 关春雨, 戴晓虎, et al. 污泥水泥窑协同处置现状与展望(上) [J]. 给水排水, 2019, 55(04): 39-43+9.
- [57]杭世珺, 关春雨, 戴晓虎, et al. 污泥水泥窑协同处置现状与展望(下) [J]. 给水排水, 2019, 55(05): 41-5.
- [58]Xu W, Xu J, Liu J, et al. The utilization of lime-dried sludge as resource for producing cement [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 83.
- [59]晏鹏, 毛建红, 曾荣辉, et al. 剩余污泥碳源化特性及利用途径研究 [J]. 中国给水排水, 2013, 29(23): 27-31.
- [60]罗锋, 彭进湖, 张忠祥, et al. 南方污水处理厂污泥厌氧发酵制取碳源及投加策略 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(03): 1-6.
- [61]李向荣, 张艳君, 张志强. 剩余污泥的资源化利用 [J]. 环境卫生工程, 2011, 19(05): 35-8.
- [62]Bergkvist P, Jarvis N, Berggren D, et al. Long-term effects of sewage sludge applications on soil properties, cadmium availability and distribution in arable soil [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 97(1).
- [63]丘锦荣, 郭晓方, 卫泽斌, et al. 城市污泥农用资源化研究进展 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(S1): 300-4.
- [64]黄雅曦, 李季, 李国学. 污泥处理与资源化利用现状分析 [J]. 农业环境科学学报, 2003, (06): 765-8.
- 第一作者简介: 郑中洁, 女, 汉族, (2000年9月), 贵州遵义, 硕士研究生; 电子邮箱:1582243831@qq.com。