

DOI:10.13205/j.hjgc.202506005

刘博,张毅彪,黄凯文,等. 城市污泥调理脱水影响因素与技术应用进展[J]. 环境工程,2025,43(6):41-50.

LIU B, ZHANG Y B, HUANG K W, et al. Influencing factors and technology application advances in urban sludge conditioning and dewatering[J]. Environmental Engineering, 2025, 43(6): 41-50.

## 城市污泥调理脱水影响因素与技术应用进展

刘 博<sup>1</sup> 张毅彪<sup>2</sup> 黄凯文<sup>2</sup> 王 硕<sup>2,3\*</sup> 李 激<sup>2,3</sup>

(1. 无锡市太湖湖泊治理股份有限公司, 江苏 无锡 214000; 2. 江南大学 环境与生态学院 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 江苏省高校水处理技术与材料协同创新中心, 江苏 苏州 215009)

**摘 要:**随着我国污水处理能力的增加,污水处理过程中产生的剩余污泥量也与日剧增。污泥处理问题亟待解决,其中污泥脱水是关键环节。污泥高含水率会为后续处理带来诸多处理难题,增加处理成本。综述了污泥脱水技术,涵盖机械脱水和污泥干化等方式,并对其在实际应用中的优劣势进行了分析。对影响污泥脱水性能的因素进行了系统研究,明确胞外聚合物(EPS)、胶体颗粒物等多种因素的作用机制。此外,全面介绍物理、化学和生物调理方法及其效果,并对每种调理脱水方式列举应用案例,总结了污泥脱水效果,为污泥处理提供参考。在此基础上,展望了污泥脱水实现资源化和低碳化的未来方向,主要包括技术创新以及协同处理等,旨在促进污泥处理领域的可持续发展。

**关键词:**城市污泥;污泥脱水;影响因素;深度脱水;污泥调理

### Influencing factors and technology application advances in urban sludge conditioning and dewatering

LIU Bo<sup>1</sup>, ZHANG Yibiao<sup>2</sup>, HUANG Kaiwen<sup>2</sup>, WANG Shuo<sup>2,3\*</sup>, LI Ji<sup>2,3</sup>

(1. Wuxi Taihu Lake Restoration Co., Ltd., Wuxi 214000, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, School of Environment and Ecology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. Jiangsu College Water Treatment Technology and Material Collaborative Innovation Center, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** With the increase in China's sewage treatment capacity, the amount of residue sludge generated during the wastewater treatment process has also been increasing gradually. The issue of sludge treatment urgently needs to be addressed, and sludge dewatering is a key link. The high water content in sludge brings many difficulties to subsequent treatment and increases treatment costs. This paper provides a comprehensive overview of sludge dewatering technologies, including mechanical dewatering and sludge drying, while analyzing the advantages and disadvantages in practical applications. A systematic study was conducted to investigate the factors affecting sludge dewatering performance, clarifying the action mechanisms of various factors, including extracellular polymeric substances (EPS) and colloidal particles. In addition, the physical, chemical, and biological conditioning methods and their effects were comprehensively introduced. For each method, multiple application methods and their effects were listed, providing a comprehensive reference for sludge treatment. On this basis, future directions for sludge dewatering were prospected with a focus on resource utilization and low-carbonization, mainly including technological innovation and collaborative treatment, aiming to provide a reference for sludge treatment and promote the sustainable development in sludge treatment and disposal.

**Keywords:** urban sludge; sludge dewatering; influencing factors; deep dewatering; sludge conditioning

收稿日期:2025-02-12; 修改日期:2025-05-11; 接收日期:2025-05-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3207602);江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BE2022303)

第一作者:刘博(1989—),男,主要研究方向为土壤及固废处置研究。20313923@qq.com

\* 通信作者:王硕(1984—),男,副教授,主要研究方向为污水生物处理、污泥处理处置。shuowang@jiangnan.edu.cn

## 0 引言

近年来,随着我国人口的不断增加、城市化进程的推进以及社会经济的不断发展,城市废水排放量大幅增长。我国持续投资建设城市污水处理厂,提高污水处理能力。随着我国污水处理厂的扩增、处理能力 & 处理率的提高以及污水处理排放标准日趋严格,其副产物污泥的产量也在快速增加。据统计,2021 年我国污水处理厂的污泥(80% 含水率)产量约 5552 万 t。污泥含水率高达 95%~99%,会为污泥的运输和后续处理处置带来诸多困难,而现有工艺仅能将其含水率降至 80% 左右,无法满足填埋要求。因此,要实现污泥的资源化利用需要进行污泥的减量化处理,即进行污泥调理脱水。

污泥处理工艺一般是先进行污泥浓缩。污泥浓缩方法主要有重力浓缩、气浮浓缩和机械浓缩,经浓缩处理后的污泥含水率为 95%~97%,体积依然很大。为了进一步降低其含水率,一般都需要对污泥进行脱水处理,但在此之前需要对污泥进行调理,改善污泥的脱水性能,提高脱水设备的效率 and 生产能力。污泥调理技术主要是通过物理、化学和生物方法使污泥絮体结构改变,并通过向污泥施加能量或加入化学药剂来降低污泥颗粒之间的作用力,使污泥中的结合水被有效分离,从而达到降低污泥含水率的目的。调理后的污泥经带式脱水机或离心式脱水机处理后,其含水率一般为 75%~85%,体积仍较大,此时往往需要对污泥进行二次脱水(即深度脱水)<sup>[1]</sup>。

此外,污泥中含有大量的有毒有害物质,如难降解有机污染物、重金属、致病菌和病毒等,未经处理随意堆放,会造成细菌滋生、大气污染、水体污染等。不当的污泥处理处置方式不仅会大大降低污水处理系统的处理能力,而且会对生态环境和人类活动造成严重威胁。因此,本文主要对污泥脱水的影响因素以及污泥调理脱水的过程与效果进行系统梳理,以期为进一步优化污泥处理工艺、提升资源回收效率和环境保护水平提供参考依据。同时,通过对污泥调理各环节内容的梳理,旨在增强对污泥处理过程的理解,促进技术创新,从而更有效地应对污泥处理过程中面临的挑战。

## 1 城市污泥基本性质

### 1.1 城市污泥的来源及分类

城市污泥是污水处理厂处理污水过程中产生的有机和无机沉淀物、悬浮物和胶体的统称,其中含有

许多重金属等有害物质以及氮、磷等营养物质,需要进行妥善处置,避免对环境产生二次污染和危害<sup>[2]</sup>。按照污泥的定义和来源大致可以将污泥分为初沉污泥、二沉污泥和化学污泥。其中初沉污泥主要来自于初沉池,包括进水中所含有的所有可沉降性物质;二沉污泥主要来自于二沉池,是 BOD 生物去除过程以及曝气池活性污泥所产生的沉降产物,常采用浓缩法对其进行处理;化学污泥主要来自于化学沉淀池,是化学除磷或者混凝沉淀去除 SS 过程中形成的污泥<sup>[3]</sup>。

### 1.2 污泥中水的存在形式

城市污泥的含水率较高,经过浓缩处理后含水率在 95%~97%。污泥中固体颗粒的亲水特性会使水分润湿并附着在其表面,由此根据水分与污泥颗粒的结合程度及其在污泥体系中所处的相对位置两方面的差异,可以将污泥中水分划分成 4 种类型,即自由水、毛细结合水、表面吸附水和内部结合水<sup>[4-5]</sup>,其占比分别为 77%、20%、7% 以及 3%,分布形态如图 1 所示。

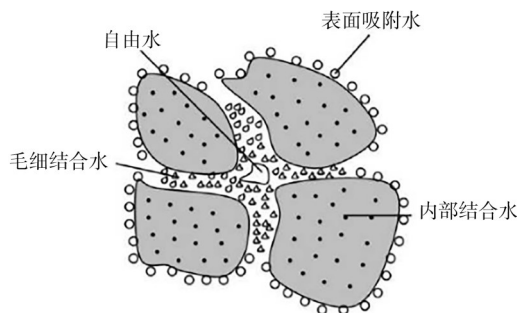


图 1 污泥中的水分形态

Figure 1 Moisture forms in sludge

自由水主要存在于污泥颗粒之间,能够自由流动,其结合能为 0<sup>[6]</sup>,最易被去除,可通过简单的重力沉降浓缩去除。毛细结合水主要存在于毛细管中,其受到液固表面附着力和液体凝聚力以及黏附力的影响,结合能较小(键能<100 kJ/kmol),污泥浓缩不能除去这部分水分,需要凭借机械作用力。表面吸附水会通过吸附和黏附等物理作用结合在絮体表面,其结合能较大(键能为 3000 kJ/kmol),一般通过机械作用难以将这部分水去除,需要施加高能量去除。内部结合水存在于微生物细胞内,或以化学键与固体颗粒紧密结合,其结合能最高(键能为 5000 kJ/kmol),需通过破坏微生物细胞以及污泥絮体结构来去除。

2 城市污泥脱水

2.1 污泥脱水技术

污泥脱水即采用一定方法进一步降低浓缩后污泥的含水率,从而降低污泥运输及处理处置的费用。在污泥处理处置过程中,污泥脱水是最困难,也是成本最高的步骤之一。目前常用的污泥脱水技术为机械脱水和污泥干化,而污泥干化又分为自然干化、热干化、生物干化技术。

机械脱水是目前我国污泥脱水的主要方式<sup>[7]</sup>。机械脱水是指机械设备利用物理方法将污泥中的水分去除,常用真空过滤、带式压滤、板式压滤和离心过滤等。通常机械脱水设备可分为低压脱水和高压脱水两种,低压脱水通过离心机和带式压滤机完成,高压脱水主要通过板框压滤机和隔膜压滤机实现。但是,机械脱水存在一定的局限性,脱水过程需要消耗大量的电能和化学药剂(絮凝剂等),处理成本较高;且污泥经过简单的机械脱水后仍达不到理想的脱水效果,含水率仍然高于 80%,这为后续污泥的最终处理处置增加了难度和成本。

自然干化是利用太阳光为能源,主要利用渗透作用和蒸发作用进行污泥脱水。该方法不但可降低运行费用,还可以减少污泥中病原菌含量。但其受场地、天气等自然因素的影响,处理效率较低,难以推广使用。热干化技术是利用热能将污泥中的水分

蒸发,从而达到深度脱水的目的。经热干化处理后,污泥会转变为颗粒状或粉末状,具有较高的热值,可以作为燃料进行焚烧发电或供热,实现污泥的资源化利用<sup>[8]</sup>。根据与热介质接触方式不同,热干化技术又可分为直接干化、间接干化和联合干化<sup>[9]</sup>。直接干化法是指利用热风或烟气和污泥直接接触,利用高温将污泥中的水分蒸发去除;间接干化法是指利用加热设备提供热量加热容器,再通过容器表面将热量传递给污泥进行干化;联合干化法是指结合对流和传热的技术对污泥进行干化。生物干化技术则以好氧微生物高温发酵为依托,在该过程中其释放出的生物能转化为热能,借助通风系统促进污泥中水分的蒸发,进而实现污泥的干化处理<sup>[10]</sup>。

污泥脱水技术的选择需综合考虑污泥特性、处理规模、成本效益、环境要求等多方面因素,选择最佳处理方案。

2.2 污泥脱水的影响因素

污泥的脱水性能与其絮体的组分、性质和结构密切相关,受多种因素的影响,可归纳为化学组成因素(如 EPS、胶体颗粒物)与物理性状因素(如絮体形态、压缩性、黏度)<sup>[11]</sup>,如表 1 所示。这些因素既独立作用,又通过复杂的物理化学机制相互关联,共同影响污泥的脱水性能。

表 1 污泥脱水的影响因素  
Table 1 Factors influencing sludge dewatering

| 类别     | 名称     | 作用机制                                                         | 交互作用                                            | 文献      |
|--------|--------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------|
| 化学组成因素 | 胞外聚合物  | 其分子结构含大量亲水性官能团(如羟基、羧基),通过氢键和静电作用吸附水分,形成高度水化的胶团               | 高 EPS 含量会增加颗粒间静电斥力,阻碍絮凝;同时,EPS 会影响污泥的黏度和稳定性     | [16-22] |
|        | 胶体颗粒物  | 双电层静电斥力阻碍絮凝,影响脱水性能;阳离子电解质压缩双电层,降低 $\zeta$ 电位,促进颗粒聚集(DLVO 理论) | EPS 含量越高,双电层越厚,颗粒稳定性越强;胶体颗粒物的聚集也会改变污泥絮体的形态和孔隙结构 | [23-26] |
| 物理性状因素 | 污泥絮体形态 | 絮体的粒径、形状、孔隙率等参数反映了絮体的密实度与空间结构,直接影响污泥的过滤性能和脱水性能               | 污泥絮体的形态结构影响污泥的压缩性和黏度;絮体的孔隙结构和粒径也会影响污泥的流变特性      | [27-29] |
|        | 污泥压缩性  | 高压下絮体变形堵塞滤饼孔隙,降低渗透性;高压压缩性会导致比阻(SRF)升高,影响脱水性能                 | 与絮体形态耦合,松散絮体压缩性更高;高压压缩性加剧黏度对过滤速率的负面影响           | [30,31] |
|        | 污泥黏度   | 黏度与滤饼含水率呈正相关;黏度越大脱水性能越差                                      | EPS 含量越高,黏度越大;黏度影响调理剂在污泥中的扩散效率,间接影响化学调理效果       | [32,33] |

2.2.1 胞外聚合物(EPS)

EPS 是指细菌分泌于体外的高分子聚合物,主要来自微生物新陈代谢、细胞溶解以及进水中所含有的物质,EPS 在活性污泥中以多种形式存在,可以是细菌细胞外高度水化的胶团,也可以是分散在溶液

中黏性聚合物,其质量(EPS 本身质量加上被包裹在 EPS 结构中的水分质量)可达到活性污泥总质量的 80% 以上<sup>[7]</sup>。根据其 与生物膜结合的密切程度可将 EPS 分为 3 类<sup>[12-14]</sup>:溶解性微生物产物(S-EPS)、松散附着型 EPS(LB-EPS)和紧密结合型 EPS(TB-

EPS)<sup>[15]</sup>,其组成结构如图2所示。

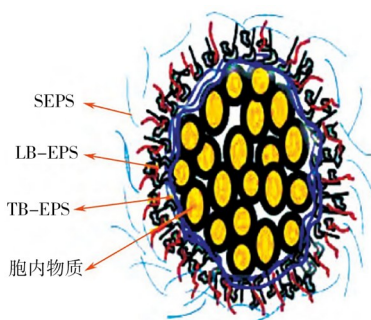


图2 EPS组成及结构示意图

Figure 2 Schematic of the composition and structure of EPS

EPS具有复杂的菌胶团结构以及一系列亲水性官能团,这些特性能够改变污泥颗粒的表面性质,提升其黏度并增强其亲水性能,并且污泥颗粒被EPS包裹,会阻断内外水的流动,阻碍了内水的释放,从而使结合水的去除更加困难,因此EPS被认为是影响污泥脱水性能的重要因素之一<sup>[16]</sup>。此外,EPS形成的聚合体带有负电荷,颗粒之间产生强静电斥力,难以接近,影响着污泥的絮凝能力、过滤能力以及脱水性能<sup>[17,18]</sup>。Jin等<sup>[19]</sup>研究发现,EPS的含量和污泥体积指数(SVI)呈线性比例关系,并指出EPS含量较高对污泥压缩性和沉降性不利。而Houghton等<sup>[20]</sup>分析8个不同污水处理厂的污泥EPS含量,并对各个污泥样品的毛细吸水时间(CST)进行检测,发现CST随着EPS含量的逐渐增加呈现先减小后增大的趋势。这可能是因为低浓度的EPS可以和高价阳离子一起使污泥细胞结合更紧密;而高浓度EPS因为保留的水分大大增加,致使污泥脱水性能下降<sup>[21]</sup>。Zhen等<sup>[22]</sup>研究发现:与TB-EPS相比,LB-EPS在污泥脱水性能中起着更决定性的作用,这可能是因为TB-EPS位于内层并稳定地附着在细胞壁上,而结构相对松散的LB-EPS位于TB-EPS的外层,更容易被去除。综上,EPS的组成和分子特征与污泥的脱水性能存在着密切的联系,直接影响污泥的持水性、絮体稳定性和脱水效率。

### 2.2.2 胶体颗粒物

污泥颗粒具有双电子层结构,双电子层是指胶核外的扩散层(即松散结合的EPS、LB-EPS)和吸附层(紧密结合的EPS、TB-EPS)<sup>[23]</sup>,即污泥中含有大量的胶体分子,胶体分子聚合而成的胶体微粒称为胶核,通常将胶核和吸附层合在一起称为胶粒,胶粒与

扩散层形成胶团。污泥颗粒一般带负电,通过双电子层作用影响污泥的稳定性和脱水特性。当加入阳离子电解质时,阳离子就会涌入扩散层甚至吸附层,增加双电子层的阳离子浓度,使扩散层变薄,随着扩散层厚度的减小,电位也相应减小,胶体颗粒之间的相互排斥力也减小,胶体的稳定性降低<sup>[24]</sup>。通过压缩双电层和电中和作用,胶体颗粒的表面电位下降,导致胶体不稳定,有利于改善污泥的沉降性能、过滤性能和脱水性能<sup>[25]</sup>。关于类阳离子脱水药剂增强胶体颗粒物沉降性能的经典理论是DLVO理论。DLVO理论被用于解释双电层的经典理论,颗粒因带相同电荷使得相邻粒子相互排斥,从而使颗粒间形成稳定的结构,阻碍粒子团聚,影响颗粒的沉降性能。任何带有相异电荷的离子加入都会产生压缩双电层作用,从而使得粒子间的排斥力减少,絮体颗粒凝聚变大,沉降性能得到增强<sup>[26]</sup>。

### 2.2.3 污泥絮体形态

通常污泥絮体的形态结构由粒径、形状、孔隙率及堆积密度等参数表征,这些参数直接关系到污泥的过滤性能和脱水效果。较大的絮体粒径有利于提高污泥的沉降性能和过滤性能,而絮体的孔隙率则影响污泥的压缩性和水分保留能力。Zhao等<sup>[27]</sup>研究发现,聚合氯化铝调理污泥可以提高污泥絮体粒径,并通过测定不同投加量时污泥絮体的分形维数,发现随着投加量的增加,污泥絮体堆积密度逐渐增大,污泥停留时间(SRT)及CST明显降低,污泥脱水性能得到改善。Turchiuli等<sup>[28]</sup>也发现污泥絮体结构与污泥脱水性能密切相关,污泥结合水的含量随着污泥分形维数的降低而降低,表明密实度低的污泥絮体结合水含量更低,更有利于水分的去除。而Jin等<sup>[29]</sup>采集了不同污水处理厂的活性污泥,通过相关性研究发现污泥絮体粒径、分形维数与污泥体积指数和沉降速率密切相关,且呈现较好的负相关,表明小且密实的污泥絮体压缩性能和沉降性能更好。在实际应用中,通过添加絮凝剂等方法,可以改善污泥絮体的形态结构,提高污泥的脱水性能。

### 2.2.4 污泥压缩性

污泥压缩性是指污泥在外界压力作用下孔隙体积减小、结构致密化的特性,影响着污泥脱水性能。污泥颗粒因其复杂的胶体结构特性,使污泥在机械脱水过程中脱水速率逐渐减小,过滤介质表面会逐渐被胶状泥饼覆盖,污泥压滤脱水的难度进一步增

大,且污泥的比阻也会随着压力的增加逐渐增大<sup>[30]</sup>。污泥的高压缩性会导致污泥颗粒在受到压力时容易变形,在滤饼增厚的同时也导致泥饼与滤布接触的过滤孔隙堵塞,最终降低了污泥的脱水性能。高压压缩性污泥的比阻随压力升高显著增大,而低压压缩性污泥比阻变化较平缓。在污泥脱水过程中,可适当添加物理调理剂,其能够使调理后的污泥形成一种渗透性强、韧性强的网格结构,保证在高压条件下污泥依然呈现着多孔的结构<sup>[31]</sup>,进而提高污泥水分去除率。但物理调理剂单独调理污泥存在投加量过高的问题,需协同其他化学药剂进一步改善污泥脱水性能。

2.2.5 污泥黏度

污泥为非牛顿流体,具有黏度和弹性两种特性,因此污泥黏度是评价污泥流变特性、化学调理效率和脱水性能的重要参数,为污泥调理与强化脱水工艺的比选和优化提供了重要信息。Chen等<sup>[32]</sup>研究表明污泥黏度和滤饼含水率呈正相关,高黏度导致过滤阻力大、脱水效率低、滤饼含水率高。而Ye等<sup>[33]</sup>研究发现污泥黏度受LB-EPS的含量影响较大,污泥黏度随LB-EPS含量的增加而增大,并且污泥的黏度越大,污泥流动性差,在脱水设备中不易输送与分布均

匀,阻碍水分与固体颗粒分离,降低脱水效率,使泥饼含水率升高。此外,黏度也会影响调理剂在污泥中的扩散效率,间接影响化学调理效果。

通过对污泥脱水性能的影响因素进行解析,可针对性地选择污泥调理方法以更好地改善污泥脱水能力,提高处理效率。

3 城市污泥调理

为了提高污泥脱水性能,合适的调理方式是污泥展现良好脱水性能的前提条件。调理技术可改善上述影响污泥脱水性能的各种因素,使其有利于脱水。目前主要的污泥调理方法分为物理、化学、生物调理3种,其作用机制及优缺点如表2所示。

3.1 物理调理

物理调理是指采用物理方法对污泥进行调理改性,通过物理调理改变和破坏污泥絮体的结构以改善污泥的沉降脱水性能。目前,常用的污泥物理调理方法主要有加热法、冻融法、超声波法以及骨架构建体等。

最初的物理调理方法主要是通过加热调理和冻融调理来实现,其中加热调理的作用机理是在一定压力和温度(40~180℃)下使污泥絮体及微生物细胞破碎,将蛋白质和多糖等物质释放,从而改善污泥脱

表 2 污泥调理方法  
Table 2 Sludge conditioning methods

| 类别   | 名称       | 作用机制                                                           | 优缺点                         | 文献      |
|------|----------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------|
| 物理调理 | 加热调理     | 在一定压力和温度下破坏细胞及污泥絮体结构,释放结合水,改善污泥脱水性能                            | 脱水效果显著,杀灭病原菌;能耗高,设备腐蚀严重     | [34,35] |
|      | 冻融调理     | 使污泥冷冻后融化,不可逆地破坏污泥絮体结构,同时降低污泥中结合水含量                             | 无化学药剂添加,能耗相对较低;处理时间长,受温度影响大 | [36]    |
|      | 超声调理     | 利用超声波在污泥中产生机械剪切力,破坏污泥结构,改变水分结合态,改善脱水性能                         | 高效快速,协同性强;对设备要求高,能耗较高       | [37]    |
|      | 微波调理     | 利用微波穿透污泥,在短时间内加热破坏污泥结构,释放结合水和有机质,提升脱水性能                        | 调理效果好,处理时间短;设备成本高,工艺参数敏感    | [38]    |
|      | 骨架构建体    | 添加惰性材料(无机材料和生物质材料),形成抗压缩网格,改善机械强度和渗透性                          | 环保性强,减少化学药剂依赖;适用范围有限,可能引入杂质 | [39-41] |
| 化学调理 | 酸处理      | 利用酸性环境破坏污泥微生物细胞结构及胞外聚合物污泥结构,改善脱水性能                             | 高效释放结合水,操作简单;设备腐蚀问题,二次污染风险  | [42]    |
|      | 有机/无机絮凝剂 | 絮凝剂是通过吸附电中和、压缩双电层以及吸附架桥和网捕卷扫作用,使分散颗粒聚集为絮体沉降                    | 反应速度快,脱水效率高;无机药剂用量大,二次污染风险  | [43,44] |
|      | 氧化剂      | 通过强氧化作用破坏污泥中胞外聚合物的化学结构,降解胶体有机物,释放结合水,改善脱水性能                    | 高效净化能力,反应速度快;成本较高,条件依赖性强    | [45]    |
|      | 表面活性剂    | 改变污泥颗粒表面性质,降低液固界面张力,破坏EPS稳定性,促进水分释放                            | 投加量低,高效性;滤液泡沫问题,选择性限制       | [46]    |
| 生物调理 | 生物酶      | 利用生物酶降解EPS中的蛋白质、多糖等,破坏絮体结构,释放结合水                               | 绿色环保,处理条件温和;酶制剂成本高,反应条件敏感   | [47]    |
|      | 生物沥浸     | 利用氧化亚铁硫杆菌或氧化硫硫杆菌等嗜酸性硫杆菌进行生物氧化,改变污泥中的菌群结构,从而降低污泥EPS含量,改善脱水性能的效果 | 绿色环保,污泥资源化潜力高;处理时间较长,依赖菌种培养 | [48,49] |

水性能。Neyens等<sup>[34]</sup>研究发现经过热水解后污泥脱水性能显著改善,且温度为175℃时对应的泥饼含水率最低。而Ruiz-Hernando等<sup>[35]</sup>研究表明,热水解预处理后的污泥经过离心处理之后,污泥含固率得到明显提升,且污泥黏度更低。利用水热处理工艺,污泥颗粒间的结构发生转变,促进有机物的水解,使得细胞膜内结合水转变为游离状态,从而增强了污泥的脱水性能。而污泥的冻融调理是采用冷冻等降温措施,使污泥凝固并冻结,能够充分、不可逆地破坏污泥絮体结构,使污泥絮体变得更为紧密,同时大大降低污泥中结合水含量。Li等<sup>[36]</sup>采用冷冻调理技术对剩余污泥进行调质,发现经冷冻处理后滤饼含水率大大降低。虽然这两种调理技术广受关注,但加热调理经济成本较高,冷冻调理技术则受气候条件限制,极大阻碍了其进一步推广和应用。

超声调理及微波调理技术因其独特的优势,近年来得到了越来越多的重视。超声波的声波频率为15 kHz~10 MHz,超声可以在污泥中产生机械剪切力,破坏污泥絮凝物和微生物细胞的细胞壁,释放出细胞内物质和结合的水,从而提高污泥脱水性能。超声处理的协同性较强,在污泥处理过程中,超声处理常与其他方法联用。Li等<sup>[37]</sup>研究了超声波和CGG+PAM联用时对污泥脱水性能的影响,经处理后活性污泥CST和离心后含水率均明显下降。微波调理本质上是加热调理污泥,但是微波并非使污泥从表面开始升温,而是穿透污泥从而使其受热均匀。Qiao等<sup>[38]</sup>考察了活性污泥在经微波水热后的调质效果,发现经过微波处理后,污泥脱水性能得到明显改善,污泥含水率大幅下降。然而,过量的微波辐射可能会破坏污泥细胞壁,由于细胞内物质的释放会增加污泥黏度,从而导致脱水性能恶化。

骨架构建体是指在污泥中添加多孔惰性材料,提高污泥滤饼在压缩过程中的机械强度和渗透性,从而提高污泥水分去除率。常用的污泥骨架构建材料有无机材料和生物质材料,主要包括黏土矿物、粉煤灰、煤矸石、生石灰、钢渣、赤泥以及树叶、秸秆、稻谷壳、锯末、木屑、竹纤维、生物炭等<sup>[39]</sup>。Wu等<sup>[40]</sup>利用FeCl<sub>3</sub>改性稻壳调理污泥的研究表明,经过稻壳粉调理后,污泥比阻降低了近60%,且净产率明显增加。Wang等<sup>[41]</sup>研究了竹粉(BP)和稻壳粉(RHP)调质对污泥脱水和滤液质量的影响,并描述了不同调理药剂的污泥脱水机理(详见图3)。研究结果表明生石

灰虽能调理污泥,但会破坏细胞结构,增加滤液污染物含量,加大污水的处理难度与成本。而在加入竹粉(BP)和稻壳粉(RHP)后,其可作为良好的骨架构建体,改善污泥饼的压缩性和渗透性,不仅能提升污泥饼的有机含量,滤液水质得到改善,是可在实际应用中替代生石灰的新型环保污泥调理剂。

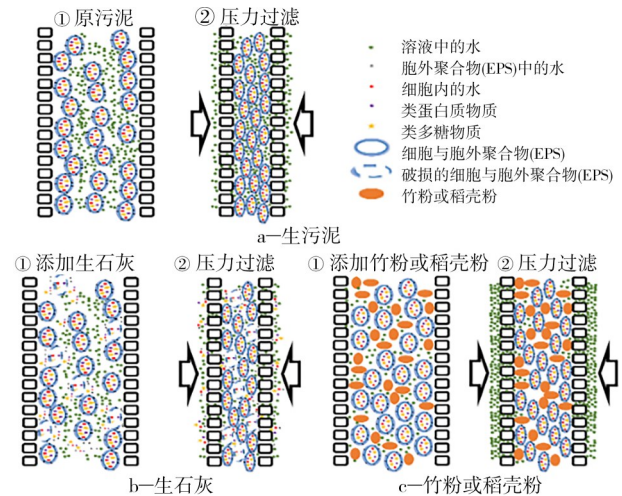


图3 不同调节剂的污泥脱水过程

Figure 3 Sludge dewatering processes with different conditioners

### 3.2 化学调理

化学调理是指通过加入适量化学调理剂并发生化学反应以改变活性污泥絮体结构、EPS含量及结构、细胞结构等,从而提高污泥脱水性能。化学药剂类型主要包括酸、絮(混)凝剂、表面活性剂、氧化剂等。

酸处理可以改变微生物细胞生存的环境,使EPS水解、微生物细胞破裂,其中部分蛋白质、多糖、碳水化合物等溶解性有机物质降解释放到溶液中,同时会释放出自由水、表面水以及部分结合水,从而使污泥絮体内部的水分分布发生变化,可以有效降低污泥胶体颗粒中内部水的含量,提高污泥水分去除率<sup>[42]</sup>,其过程如图4所示。

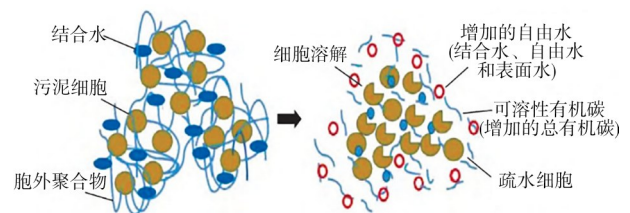


图4 污泥EPS降解

Figure 4 EPS degradation in sludge

常用的絮凝剂可分为无机絮凝剂和有机高分子絮凝剂两种<sup>[43]</sup>。无机絮凝剂以铁盐和铝盐为主,主要

通过中和胶体颗粒表面负电荷、压缩双电层等作用,降低颗粒间的静电斥力,促进颗粒聚集沉降。Guo等<sup>[44]</sup>采用 $\text{FeCl}_3$ +PAM联合调质活性污泥,处理后发现污泥的毛细吸水时间大幅下降,且经过板框压滤之后滤饼含固率明显上升,药剂成本更低。但铁盐和铝盐在实际应用过程中存在以下问题:1)投加量较大,一般其投加量为干重的5%~20%,而且有机质含量和热值将减少,最终降低后续污泥资源化利用的价值;2)铁盐对设备有一定的腐蚀性;3)脱水效果明显,但形成的絮体较为松散,须结合有机絮凝剂以强化泥水分离效果。与无机絮凝剂相比,有机高分子絮凝剂具有絮凝速度快,用量较少(投加量仅为污泥干重的

0.05%~0.7%)等优势,可通过“桥连”作用将单个颗粒聚集成大絮体。聚丙烯酰胺(PAM)是污泥处理过程最常用的有机絮凝剂,且阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)的调理效果最好,其能够通过电荷中和来降低颗粒表面电荷,同时高分子链的疏水基团可破坏颗粒表面水化膜,减少水分束缚,加速聚集。

复合絮凝剂也是近年来开始广泛使用的新型絮凝剂,包括无机+无机、无机+有机、有机+有机复合絮凝剂,目前使用较为广泛的是无机+有机絮凝剂。此类絮凝剂巧妙融合了无机絮凝剂与有机絮凝剂的优势,并有效规避了它们各自的不足。图5为部分典型絮凝剂脱水机理。

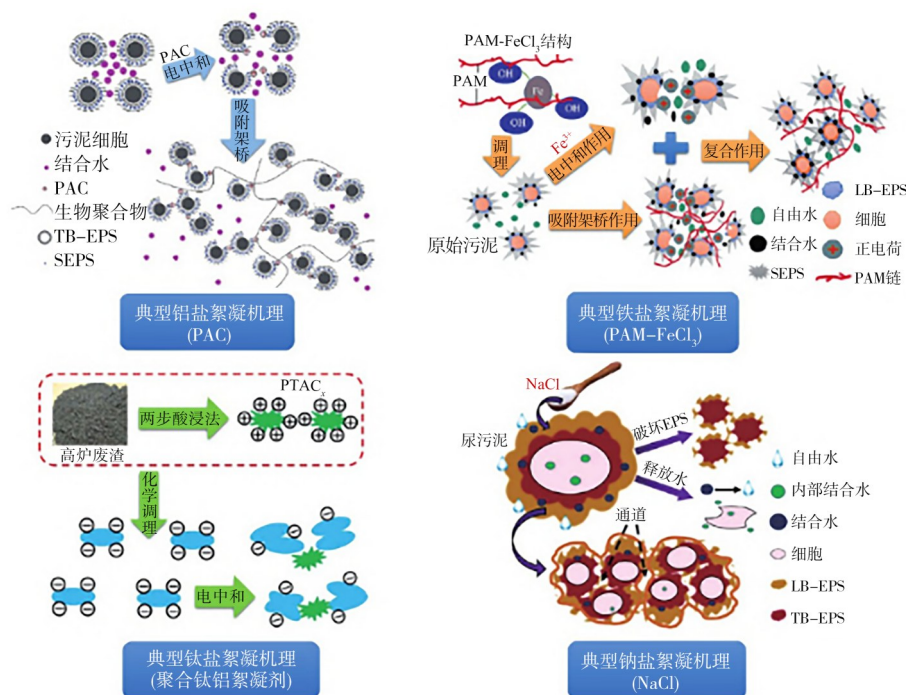


图5 典型絮凝剂脱水机理

Figure 5 Dewatering mechanisms of typical flocculants

此外,Zhao等<sup>[45]</sup>为了减小无机高分子絮凝剂用于污泥调理过程存在的潜在风险,提出了以污泥臭氧氧化和通过芬顿试剂的高级氧化技术替代化学调理剂,通过强氧化作用破坏污泥中胞外聚合物(EPS)的化学结构,降解胶体有机物,研究结果表明当芬顿试剂与类芬顿试剂用于污泥调理时,毛细吸水时间可下降1/2左右。但部分氧化剂(如过硫酸盐、臭氧)的生产和设备投资成本较高,显著影响其规模化应用。表面活性剂能够改变污泥颗粒表面性质,降低液固界面张力,破坏EPS稳定性,促进水分释放。Yuan等<sup>[46]</sup>研究了表面活性剂(CTAB和TritonX-100)

和电解法结合对活性污泥脱水性能的影响,发现在加入阳离子表面活性剂CTAB后,结合电解法可有效减少毛细吸水时间、污泥比阻和Zeta电位,显著提高脱水性能。

### 3.3 生物调理

生物调理法是指在污泥中加入一定量的微生物细胞、生物酶等物质,在适宜的条件下调理污泥并发生生物化学反应,如EPS的水解、细胞膜及胞内物质的分解等,进而改善污泥的脱水性能、沉降性能和可压缩性,达到减量化和无害化的目的。生物酶作为污泥调理剂可以将污泥中的有机物进一步分解,降

低污泥中微生物总量,且不会添加有害物质。与其他方法相比,酶处理法具有快速稳定,处理效果好,无毒无害等优点。Zou 等<sup>[47]</sup>以纤维素酶、蛋白酶和脂肪酶作为生物调理剂,研究了其对污泥脱水性能的影响,发现 3 种调理剂对污泥脱水性能的改善效果顺序为纤维素酶>蛋白酶>脂肪酶,且 3 种调理剂联合使用可进一步提高污泥水分去除率。此外,生物沥浸是较为新颖的污泥预处理方法,利用氧化亚铁硫杆菌或氧化硫硫杆菌等嗜酸性硫杆菌进行生物氧化,改变污泥中的菌群结构,从而降低污泥 EPS 含量,改善脱水性能的效果。赵炜等<sup>[48]</sup>研究发现,生物沥浸过程中会产生许多疏水性物质,疏水性物质的增加使污泥脱水性能得到增强。Liu 等<sup>[49]</sup>对比了生物沥浸与传统物理化学调理污泥对污泥脱水性能的影响,发现生物沥浸法可大幅降低污泥比阻和毛细吸水时间,调理效果基本与传统物理化学调理相同,且污泥脱水滤液中有有机物、总氮及总磷含量相对较低,优于热水解、超声法等调理方法。

#### 4 总结与展望

城市污泥成分极其复杂,包括有机物质、无机颗粒、病原菌、寄生虫等,且其含水率较高(一般高达 99%),化学性质不稳定,容易腐烂,散发恶臭,对污泥进行妥善处理处置刻不容缓。污泥脱水是污泥减量化的主要手段,不仅影响污泥的运输储存,而且在污泥的后续处理处置中发挥了至关重要的作用。

污泥中的水分为自由水、毛细结合水、表面吸附水和内部结合水。目前,污泥脱水技术包括主要包括机械脱水和污泥干化,能耗较高,且效果不佳。污泥脱水性能受多种因素的影响包括化学组成因素(如 EPS、胶体颗粒物)与物理性状因素(如絮体形态、压缩性、黏度),这些因素均影响污泥脱水效果。为改善污泥脱水性能,常采用物理、化学和生物调理方法。这些方法各有优点和局限,如物理调理成本高或受条件限制,化学调理可能带来二次污染,生物调理效果好但应用范围有待扩大。

现阶段我国污泥深度脱水普遍采用化学调理耦合板框压滤,使污泥达到减量和减容效果。由于大量化学药剂的使用,此种污泥调理和脱水的方式会增加造成二次污染的风险,且处理成本和能耗均较高。相反,我国对于物理调理(如热水解、冻融)等处理方式研究较少。应针对污泥物理调理方式进行深入研究。此外,应深入研究污泥中各类物质的特性

和相互作用机制,在保证高效脱水性能的同时,实现污泥中有益资源的分离和回收。同时,需要对现有污泥处理设备进行优化改造,降低处理过程中的能源消耗和“碳排放”。加强多种调理技术的协同应用,提高脱水效率,减少化学药剂使用,降低对环境的影响,推动污泥处理行业可持续发展,实现环境保护与资源回收的双赢。

#### 参考文献

- [1] 罗勇. 市政污泥深度脱水调质机理及其可脱水性评价体系的建立[D]. 广州:华南理工大学,2018:2-6.  
LUO Y. Mechanism of deep dewatering and conditioning of municipal sludge and establishment of its dewaterability evaluation system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 2-6.
- [2] 孔祥娟,戴晓虎,张辰. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2016:1-10.  
KONG X J, DAI X H, ZHANG C. Sludge treatment and disposal technologies for urban wastewater treatment plants [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 1-10.
- [3] 陈晓光. 城市污水污泥深度脱水技术优化研究[D]. 无锡:江南大学,2016:1-12.  
CHEN X G. Research on optimization of deep dewatering technology for municipal sewage sludge [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016: 1-12.
- [4] VESILIND P A. The role of water in sludge dewatering[J]. Water Environment Research, 1994, 66(1): 4-11.
- [5] TSANG K R, VESILIND P A. Moisture distribution in sludges [J]. Water Science & Technology, 1990, 22(12):135-142.
- [6] 基伊. 干燥原理及其应用[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1986:410-420.  
KEY K. Principles of drying and their applications [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1986: 410-420.
- [7] 汤连生,罗珍贵,张龙舰,等. 污泥脱水研究现状与新认识[J]. 水处理技术, 2016, 42(6):6.  
TANG L S, LUO Z G, ZHANG L J, et al. Research status and new understanding of sludge dewatering [J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(6): 6.
- [8] 罗键鑫. 污泥深度脱水技术在市政污泥处理中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(12):200-202.  
LUO J X. Application of deep sludge dewatering technology in municipal sludge treatment [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024, 42(12): 200-202.
- [9] ELISABETH N, JAN B, RAF D. Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 106B:83-92.
- [10] 彭贤辉,何小瑜,宣琦,等. 国内城镇污水处理污泥脱水技术研究进展[J]. 化工生产与技术, 2024, 30(2):12-16.

- PENG X H, HE X Y, XUAN Q, et al. Research progress of sludge dewatering technologies for domestic urban sewage treatment [J]. Chemical Production and Technology, 2024, 30 (2): 12-16.
- [11] MOWLA D, TRAN H N, ALLEN D G. A review of the properties of biosludge and its relevance to enhanced dewatering processes [J]. Biomass & Bioenergy, 2013, 58(21): 365-378.
- [12] COMTE S, GUIBAUD G, BAUDU M. Relations between extraction protocols for activated sludge extracellular polymeric substances (EPS) and complexation properties of Pb and Cd with EPS: part II. Consequences of EPS extraction methods on Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> complexation [J]. Enzyme & Microbial Technology, 2006, 38(1): 237-245.
- [13] TIAN Y, TIAN Y. Behaviour of bacterial extracellular polymeric substances from activated sludge: a review [J]. International Journal of Environment & Pollution, 2008, 32(1): 78-89.
- [14] Laspidou C S, Rittmann B E. A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass [J]. Water Research, 2002, 36(11): 2711-2720.
- [15] 魏亮亮,王胜,薛茂,等. 城镇污泥胞外聚合物对重金属吸附特征及机制 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(8): 188-198.
- WEI L L, WANG S, XUE M, et al. Adsorption characteristics and mechanisms of heavy metals by extracellular polymeric substances in municipal sludge [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(8): 188-198.
- [16] NEYENS E B. Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 106(2/3): 83-92.
- [17] ZHANG Y, CAO B, REN, et al. Correlation and mechanism of extracellular polymeric substances (EPS) on the effect of sewage sludge electro-dewatering [J]. Science of the Total Environment, 2021, 801: 149753.
- [18] TUAN P A, MIKA S, PIRJO I. Sewage sludge electro-dewatering treatment: a review [J]. Drying Technology, 2012, 30 (7): 691-706.
- [19] BO J, BM WILÉN, LANT P. A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 95(1/2/3): 221-234.
- [20] HOUGHTON J I, QUARMBY J, STEPHENSON T. Municipal wastewater sludge dewaterability and the presence of microbial extracellular polymer [J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2001, 44(2/3): 373.
- [21] MOWLA D, TRAN H N, ALLEN D G. A review of the properties of biosludge and its relevance to enhanced dewatering processes [J]. Biomass and Bioenergy, 2013, 58: 365-378.
- [22] Zhen G Y, Long J S, Bai L, et al. Factors affecting the dewaterability of waste activated sludge [J]. Nonferrous Met Eng, 2015, 36 (4): 56-62.
- [23] RASHAD A M. Potential use of phosphogypsum in alkali-activated fly ash under the effects of elevated temperatures and thermal shock cycles [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 717-725.
- [24] 江晖, 廖传华. 污泥化学调理技术的现状与研究进展 [J]. 中国化工装备, 2019, 21(1): 10-13, 31.
- JIANG H, LIAO C H. Current status and research progress of sludge chemical conditioning technology [J]. China Chemical Industry Equipment, 2019, 21(1): 10-13, 31.
- [25] DAI Q, REN N, NING P, et al. Inorganic flocculant for sludge treatment: Characterization, sludge properties, interaction mechanisms and heavy metals variations [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 275: 111255.
- [26] PEVERE A, GUIBAUD G. Effect of Na<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> on the aggregation properties of sieved anaerobic granular sludge [J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2007, 306(S1): 142-149.
- [27] ZHAO Y Q. Correlations between floc physical properties and optimum polymer dosage in alum sludge conditioning and dewatering [J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 92 (1/2/3): 227-235.
- [28] TURCHIULI C, FARGUES C. Influence of structural properties of alum and ferric flocs on sludge dewaterability [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 103(1/2/3): 123-131.
- [29] JIN B, WILÉN B M, LANT P. A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 95(1/2/3): 221-234.
- [30] 高健磊, 闫怡新, 吴建平, 等. 城市污水处理厂污泥脱水性能研究 [J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 108-111.
- GAO J L, YAN Y X, WU J P, et al. Research on the dewatering performance of sludge from urban sewage treatment plants [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 108-111.
- [31] LUO H, NING X A, LIANG X, et al. Effects of sawdust-CPAM on textile dyeing sludge dewaterability and filter cake properties [J]. Bioresource Technology, 2013, 139: 330-336.
- [32] CHEN D, YANG J. Effects of explosive explosion shockwave pretreatment on sludge dewaterability [J]. Bioresource Technology, 2012, 22(11): 35-40.
- [33] YE F, LIU X, LI Y. Effects of potassium ferrate on extracellular polymeric substances (EPS) and physicochemical properties of excess activated sludge [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 199/200(2): 158-163.
- [34] NEYENS E, BAHEYENS J. A review of thermal sludge pretreatment processes to improve dewaterability [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 98(1/2/3): 51-53.
- [35] RUIZ-HERNANDO M, MARTINEZ-ELORZA G, LABANDA J, et al. Dewaterability of sewage sludge by ultrasonic, thermal and chemical treatments [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 230 (16): 102-110.
- [36] 李玉瑛, 李冰. 冷融技术对剩余污泥的调理研究 [J]. 工业水处理, 2012, 32(8): 56-58.

- LI Y Y, LI B. Research on the conditioning of excess sludge by freezing-thawing technology [J]. *Industrial Water Treatment*, 2012, 32(8): 56-58.
- [37] 李玉瑛,何文龙,邓斌,等. 超声波联合高分子絮凝剂对污泥的调理研究[J]. *工业水处理*, 2015, 35(2): 57-60.
- LI Y Y, HE W L, DENG B, et al. Research on the conditioning of sludge by ultrasound combined with polymer flocculants [J]. *Industrial Water Treatment*, 2015, 35(2): 57-60.
- [38] 乔玮,王伟,黎攀,等. 城市污水污泥微波热水解特性研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(1): 152-157.
- QIAO W, WANG W, LI P, et al. Study on the microwave hydrothermal hydrolysis characteristics of municipal sewage sludge [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(1): 152-157.
- [39] 齐建,赵雁滨,杨期勇,等. 基于骨架构建的污泥脱水调理技术研究进展[J]. *能源研究与管理*, 2023, 15(3): 42-51.
- QI J, ZHAO Y B, YANG Q Y, et al. Research progress on sludge dewatering conditioning technology based on skeleton construction [J]. *Energy Research and Management*, 2023, 15(3): 42-51.
- [40] WU Y, ZHANG P, ZENG G, et al. Enhancing sewage sludge dewaterability by a skeleton builder: biochar produced from sludge cake conditioned with rice husk flour and  $\text{FeCl}_3$  [J]. *Acs Sustainable Chemistry and Engineering*, 2016, 4(10): 5711-5717.
- [41] WANG S, YANG Y K, CHEN X G, et al. Effects of bamboo powder and rice husk powder conditioners on sludge dewatering and filtrate quality [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 124: 288-296.
- [42] HE D Q, WANG L F, JIANG H, et al. A Fenton-like process for the enhanced activated sludge dewatering [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 272: 128-134.
- [43] 张洁,赖月,杨朝辉,等. 污泥脱水絮凝剂的研究进展及应用探索[J]. *工业水处理*, 2024, 44(2): 48-62.
- ZHANG J, LAI Y, YANG Z H, et al. Research progress and application exploration of sludge dewatering flocculants [J]. *Industrial Water Treatment*, 2024, 44(2): 48-62.
- [44] 郭敏辉. 化学调理改善活性污泥脱水性能的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Guo Minhui. Research on improving the dewatering performance of activated sludge by chemical conditioning [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [45] ZHAO Y Q, KEOGH C, TONY M A. On the necessity of sludge conditioning with non-organic polymer: AOP approach [J]. *Journal of Residuals Science & Technology*, 2009, 6(3): 151-155.
- [46] YUAN H, ZHU N, SONG F. Dewaterability characteristics of sludge conditioned with surfactants pretreatment by electrolysis [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 2308-2315.
- [47] 邹永杰,刘梦茹,朱小林,等. 生物酶调理对造纸污泥脱水性能的影响[J]. *造纸科学与技术*, 2017(2): 59-63.
- ZOU Y J, LIU M R, ZHU X L, et al. Effect of biological enzyme conditioning on the dewatering performance of papermaking sludge [J]. *Paper Science & Technology*, 2017(2): 59-63.
- [48] 赵炜,田永静,夏晶,等. 以  $\text{FAS} + \text{S}^0$  为底物的生物沥浸对污泥 EPS 组分和脱水性能的影响[J]. *环境工程*, 2021, 39(5): 118.
- ZHAO W, TIAN Y J, XIA J, et al. Effect of bioleaching with  $\text{FAS} + \text{S}^0$  as substrate on the EPS components and dewatering performance of sludge [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(5): 118.
- [49] LIU F, ZHOU J, WANG D, et al. Enhancing sewage sludge dewaterability by bioleaching approach with comparison to other physical and chemical conditioning methods [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(8): 1403-1410.