

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.051



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



剩余污泥深度脱水及资源化利用研究进展

矫洪铭, 周盈盈, 毛佳乐, 付亮, 崔寒

(东北师范大学 东北水污染低碳治理与绿色发展教育部工程研究中心; 环境学院; 吉林省水污染控制与资源化工程实验室, 长春 130117)

摘要: 剩余污泥是污水处理过程中产生的半固态副产物, 其含水率高达 80% 以上。现有的污泥处置及资源化方式通常要求其含水率在 50%~70% 之间, 因此污泥脱水是其处置与资源化的重要前提。分析污泥中水分的结构与组成及剩余污泥脱水困难的原因, 指出其瓶颈在于结合水和胞内水的有效脱除; 阐述了物理法、化学法和生物法等常用预处理方法在强化污泥脱水中的作用效果及核心机制, 重点阐述了絮凝剂及助滤剂等化学调理剂强化剩余污泥脱水的作用机制、脱水效果及组合工艺; 论述了剩余污泥机械脱水设备的选型原则及适用范围; 分析了剩余污泥脱水后用于制备肥料、建筑材料、生物炭、高价值产品等的资源化利用途径; 提出了该方向未来需要解决的关键问题, 为剩余污泥深度脱水及资源化的理论研究与技术应用提供参考。

关键词: 剩余污泥; 化学调理; 机械脱水; 污泥资源化

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2025)06-0233-12

Research progress on deep dewatering and resource utilization of sewage sludge

JIAO Hongming, ZHOU Yingying, MAO Jiale, FU Liang, CUI Han

(Engineering Research Center of Low-Carbon Treatment and Green Development of Polluted Water in Northeast China, Ministry of Education; School of Environment; Jilin Engineering Lab for Water Pollution Control and Resources Recovery, Northeast Normal University, Changchun 130117, P. R. China)

Abstract: Sewage sludge is a semi-solid byproduct of wastewater treatment, with a water content of over 80%. The available methods for disposal and recycling usually require the water content to be within 50%-70%, and sludge dewatering is an important prerequisite for its disposal and resource utilization. In this paper, the structure and composition of water in sludge and the reasons for the difficulty in dewatering residual sludge are analyzed, and the key bottleneck is the effective removal of bound water and intracellular water. The roles and core mechanisms of physical, chemical, and biological pretreatment methods are described; especially, the mechanism, dewatering effects, and combination processes of enhanced residual sludge dewatering by chemical

收稿日期: 2024-03-16

基金项目: 吉林省自然科学基金(YDZJ202201ZYTS482); 国家自然科学基金(52300152); 中央高校基本科研业务费(2412022ZD055)

作者简介: 矫洪铭(1997-), 男, 主要从事固体废物处理与资源化研究, E-mail: jhm_nenu@163.com。

付亮(通信作者), 女, 副教授, 博士生导师, E-mail: ful988@nenu.edu.cn。

Received: 2024-03-16

Foundation items: Natural Science Foundation of Jilin Province (No. YDZJ202201ZYTS482); National Natural Science Foundation of China (No. 52300152); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2412022ZD055)

Author brief: JIAO Hongming (1997-), main research interest: solid waste treatment and disposal, E-mail: jhm_nenu@163.com.

FU Liang (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: ful988@nenu.edu.cn.

conditioners such as flocculants and filter aids are focused on. The selection principles and application scope of mechanical dewatering equipment for residual sludge are discussed. This paper analyzes the resource utilization approaches of dewatered residual sludge, including the preparation of fertilizer, building materials, biochar, and high-value products. Finally, the key problems that need to be solved in the future are proposed, so as to provide references for the theoretical research and technological application of residual sludge deep dewatering and resource utilization.

Keywords: residual sludge; chemical conditioning; mechanical dewatering; sludge resources utilization

目前,中国共有污水处理厂 2 894 座,污水处理规模达 2.160 6 亿 t/d,每处理 1 万 t 污水就会产生 0.5~1.0 t 干污泥,折算为含水率 80% 的湿污泥,剩余污泥年产量已超 6 000 万 t^[1]。剩余污泥是污水处理厂在废水处理过程中产生的副产物,含有大量有机物、重金属、病原微生物、寄生虫卵、氮、磷等物质,兼具污染性和资源性双重属性。国家“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要提出,需进一步提升剩余污泥无害化处置率,城市剩余污泥无害化处置率要达到 90% 以上^[2]。“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划指出,要破解污泥处置难题,在实现无害化的同时推进资源化,鼓励采用热水解、厌氧消化、好氧发酵、干化等方式进行无害化处理^[3]。

污泥脱水是污泥处置及资源化的前提。剩余污泥通常含水率达 80%,而填埋和土地利用要求污泥含水率低于 60%;自持焚烧要求含水率低于 50%;好氧堆肥要求含水率为 50%~70%^[4]。由于剩余污泥中 75% 的水分为胞内水和结合水,无法通过机械脱水直接脱除,因此通常采用物理法、化学法和生物法等预处理手段改变污泥絮体结构、表面电位及细胞膜通透性,再经机械脱水处理,剩余污泥含水率可降低至 45% 左右,脱水后的泥饼可用于制备土壤改良剂、污泥基生物炭等环境功能材料。

笔者分析了剩余污泥的水分组成及深度脱水面临的瓶颈,阐述了物理法、化学法和生物法预处理剩余污泥的作用机制,总结了剩余污泥机械脱水设备的选型原则及化学调理剂对剩余污泥机械脱水效果的强化作用,分析了剩余污泥深度脱水后的资源化途径及经济效益,并提出了剩余污泥深度脱水及资源化方向未来需研究解决的关键问题。

1 剩余污泥的水分组成及脱水瓶颈

污泥中水分含量高达 80% 以上,如图 1 所示,可分为间隙水、结合水(表面水)和胞内水(内部水)^[5]。其中,间隙水约占总水分的 25%,结合水和胞内水约分别占 65% 和 10%^[6]。间隙水存在于污泥絮体的颗粒间隙,通过机械脱水方式即可去除;结合水是通过物理作用和生物化学作用吸附在污

泥颗粒表面的水分,需通过加热方式脱除;胞内水是微生物细胞内部的水分,需通过预处理手段破坏细胞结构,以释放该部分水分^[7]。结合水和胞内水的去除是污泥深度脱水的重点和难点。

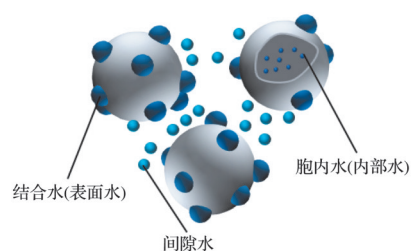


图 1 剩余污泥中水分的组成与分布情况

Fig. 1 Composition and distribution of moisture in residual sludge

剩余污泥脱水效果受其自身性质影响显著,包括亲疏水性、表面电荷、可压缩性、胞外聚合物(extracellular polymeric substance, EPS)等。具体而言,污泥表面呈亲水性,易吸附大量水分,且污泥絮体表面带负电位,粒子间的静电排斥力使污泥形成稳定胶体,不利于水分脱除;污泥具有较高的可压缩性,易导致缺少水分排出的孔道,从而影响脱水效果。此外,污泥中的 EPS 会将水分固定在污泥中,同时保护细胞免受外界重金属、pH 值和盐度变化的不利影响。当紧密结合态 EPS(TB-EPS)和松散态 EPS(LB-EPS)占比较高时,不利于污泥水分脱除^[8]。常规的“重力浓缩-机械脱水”工艺仅能将污泥含水率降低至 80% 左右,无法满足深度脱水对含水率 55%~65% 的要求^[9]。因此,需通过预处理手段改变污泥亲疏水性、中和污泥表面电荷、降低污泥可压缩性、破坏 EPS 等,以提高污泥脱水性能^[10]。

2 预处理强化剩余污泥深度脱水的作用机制

2.1 物理法

物理法通过高频机械振动和环境变化破坏细胞结构,释放胞内水和结合水,主要包括超声、冻融、热水解等方法。超声波处理借助声化学特性和海绵效应等产生机械剪切力,破坏污泥絮体结构,

改变水分结合态。经超声处理 2 min 并抽滤脱水后,污泥含水率可降低至 75.12%^[11]。若超声时间过长,会导致污泥破解后 EPS 的保水能力增加,脱水性能恶化^[12]。然而,超声产生的空化泡难以在污泥中大面积扩散,因此该方法对反应设备要求高,实际应用条件限制较多。

冻融法通过调节温度,使水分子被挤向冷冻界面,絮体结构被破坏,水分得以释放^[13]。有研究表明,经 -11℃ 冻融处理,污泥含水率可降至 54%^[14]。冻融法可依靠自然条件强化污泥脱水,但适用范围有限;在寒区冬季以外的季节、非寒区等,需使用机械设备制冷实现强化污泥脱水,成本较高,导致实际应用可行性较低。

热水解是指在 60~240℃ 条件下对污泥加热,加速脂质溶解,破坏细胞膜,以释放胞内水分和有机物^[15]。污泥经过 170、190℃ 热水解处理,脱水后含水率可降至 60% 以下^[16]。热水解预处理方法的主要不足是设备能源消耗大,不符合实际生产需求。

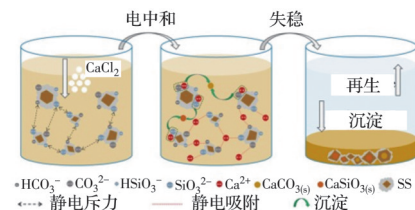
2.2 化学法

化学法具有成本低廉、药剂易获取、适用性强、不受环境因素干扰等优势,在污泥脱水的实际生产中被广泛应用,但仍存在药剂投加量大、滤液污染物浓度高且难处理等问题。化学调理剂主要分为絮凝剂、助滤剂等,不同类型化学调理剂的作用机理存在差异;目前普遍使用的是无机盐类絮凝剂和有机絮凝剂,具体包括铁盐、铝盐、石灰及各类聚丙烯酰胺等。其核心作用原理涵盖电中和作用、酸碱作用、吸附架桥作用与网捕卷扫作用,相关作用机制可通过 XDLVO 理论进行综合解析,如图 2 所示。

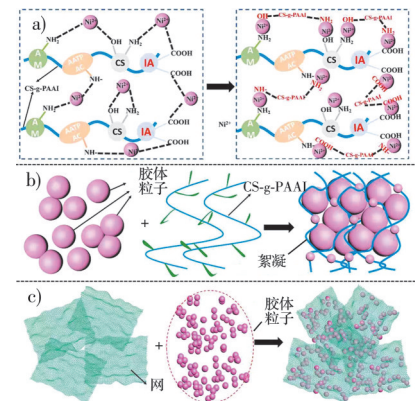
电中和作用:由于污泥呈电负性,污泥颗粒在斥力作用下处于稳定状态,导致污泥中水分难以脱离。金属阳离子絮凝剂可中和颗粒表面的负电荷,与污泥间形成静电吸引力,使污泥颗粒间斥力减小、双电层压缩,絮体 Zeta 电位降低,胶体发生絮凝团聚,打破污泥原有的稳定状态,水分流出,从而提升污泥脱水性^[17]。

酸碱作用:酸性或碱性化学调理剂可促进污泥 EPS 水解,改变其各组分含量;碱处理通过提高污泥 pH 值破坏细胞膜结构,促使 TB-EPS 转变为 S-EPS 和 LB-EPS,降低 EPS 的持水能力,释放结合水和胞内水,进而改变污泥中不同类型水分的比例。

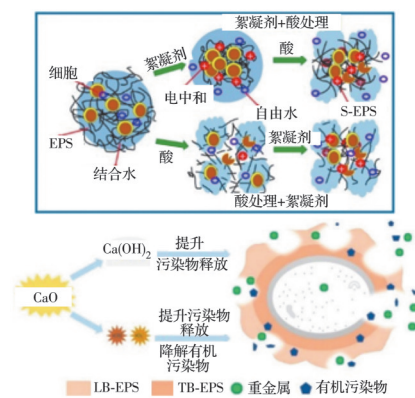
吸附架桥和网捕卷扫:聚丙烯酰胺等有机絮凝剂通过静电引力、范德华力及氢键等作用力在污泥颗粒或胶体的活性部位间形成架桥^[18]。其线性长链结构两端均能与污泥絮体颗粒发生吸附作用,也能



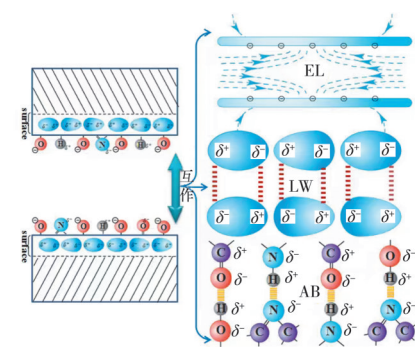
(a) 中和作用



(b) 吸附架桥和网捕卷扫作用



(c) 酸碱作用



(d) XDLVO 理论

图 2 化学调理剂强化污泥脱水的作用机制^[21-25]

Fig. 2 Mechanism of chemical conditioners for enhancing sludge dewatering

在距离较远、斥力较大的两个颗粒间实现搭桥,最终形成两端为胶体、中间为高分子聚合物的凝聚体,使絮体团聚为更粗大的絮凝体^[19]。在中性条件下发挥作用的调理剂,对污泥脱水效果的改善作用通常优于其他 pH 值条件下产生的络合物。

拓展的 DLVO (extended Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek, XDLVO)理论,可用于描述污泥颗粒间范德华力、静电排斥力与水合作用力三者的关系。其中,静电排斥力与污泥所带电荷相关,水合作用力与污泥表面亲疏水性有关;投加化学药剂后,污泥的亲疏水性、表面电位发生改变,致使范德华力、静电排斥力及水合作用力随之变化,进而提升污泥脱水性能^[20]。该理论可用于解析不同化学调理剂强化污泥脱水的综合作用机制。

2.3 生物法

生物法通过电中和、吸附架桥、破坏细胞膜结构及微生物自身代谢等作用强化污泥脱水性能^[26],包括微生物絮凝法、生物酶法和生物沥浸法。该方法因其具有无污染、无毒性、无危害和易降解等优势,受到广泛关注。其中,微生物絮凝剂是由真菌、细菌等微生物产生的具有絮凝活性的天然高分子物质,通过电中和、吸附架桥等作用强化污泥脱水。克雷伯氏菌微生物絮凝剂在 pH 值为 7、温度为 25 ℃ 的条件下作用效果最佳,可使污泥比组 (specific

resistance of filtration, SRF) 值降低至 4.7×10^{12} m/kg^[27]。生物酶法是通过酶的专一性破解 EPS 中的多糖和蛋白质,释放絮体内部水分。蛋白酶和脂肪酶可有效改善污泥脱水性能,使污泥含水率降低至 52%^[28]。生物沥浸液中的嗜酸菌能够降解 EPS、降低 pH 值并强化 Fe³⁺ 的作用效果,进而提升污泥脱水性能。采用 *A. ferrooxidans* 菌液处理剩余污泥时,经 72 h 处理后,污泥 SRF 值降低至 3.89×10^{12} m/kg^[29]。然而,生物法对反应条件要求较高:温度过低絮凝剂无法充分发挥作用,温度过高则会导致生物絮凝剂失效,且该方法处理时间较长,目前暂未得到广泛使用。

对比分析 3 种预处理方法强化剩余污泥脱水的作用机制和优缺点(如表 1 所示)后发现,化学法是最符合目前实际生产需求的方法,但化学法处理后污泥的资源化与滤液处理问题,在预处理阶段如何综合考虑仍需进一步探究;物理法和生物法处理污泥的效果能否通过优化技术手段提升、多种方法联合使用的工艺如何优化等问题,仍有待深入研究。

表 1 不同预处理方法的优缺点比较

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of different pretreatment methods				
预处理类型	调理手段	优势	缺点	参考文献
生物法	微生物絮凝法	无药剂残留,处理成本低	反应时间 20 min,适用范围有限,操作难度大	[27]
	生物酶法	无药剂残留,处理成本低	反应时间 5.78 h,适用范围有限,操作难度大	[30]
	生物沥浸法	无药剂残留,处理成本低	反应时间 72 h,适用范围有限,操作难度大	[29]
物理法	冻融法	适用于寒冷地区,无药剂残留	反应时间 72 h,适用范围有限	[31]
	超声法	操作简单,适用范围广,无药剂残留	反应时间 90 min,处理成本高	[12]
	热水解法	适用范围广,无药剂残留	反应时间 90 min,处理成本高	[32]
化学法	有机调理剂	处理成本低,操作简单,适用范围广,反应时间短	有药剂残留	[33]
	无机调理剂	处理成本低,操作简单,适用范围广,反应时间短	有药剂残留	[34]
	助滤剂	操作简单,适用范围广,反应时间短	需要与调理剂联合使用	[35]

3 化学调理后剩余污泥深度脱水

3.1 化学调理剂强化剩余污泥机械脱水效果

化学调理剂在实际生产中应用广泛,分为絮凝剂、助滤剂两类,两者可单独使用或联合使用。常用絮凝剂包括 FeCl₃、聚合氯化铝 (polyaluminum chloride, PAC)、CaO 和聚丙烯酰胺,如表 2 所示。当 FeCl₃ 溶液浓度为 1 g/L、投加量为 40 mg/L 时,脱水后污泥含水率可由 98.98% 降至 80%;使用 PAC 溶液作为调理剂,投加量为 19.4 g/kg 时,污泥脱水后含水率可降至 80.1%。贝壳粉、粉煤灰和生物炭可作为助滤剂,通过为污泥提供骨架支撑和疏水通道,强化污泥脱水效果。其中,以贝壳粉单独调理污泥时,投加量为 300 mg/kg 可使脱水后污泥含水率从 81.3% 降至 70%。生物炭应用于污泥脱水,能起到助滤与污染物去除的双重作用^[36];改性性

的稻秆生物炭投加量为 0.3 g/g(干污泥)时,脱水后毛细吸水时间 (capillary suction time, CST) 可从 126 s 降低至 38 s。此外,污泥经臭氧处理、真空脱水后,含水率由 98.87% 降至 81.16%。新型气态调理剂丙烷水合物强化污泥深度脱水,可使污泥含水率由 99.81% 降至 44.30%。气态调理剂具有能耗小、可回收、脱水效果好等优势,可实现循环使用,并有效避免残留问题。鉴于目前使用的化学调理剂强化污泥脱水后易残留于污泥中,导致药剂浪费且增加后续滤液处理负荷的现状,亟须研发低残留、高效、低成本、可循环利用的新型化学调理剂。

当单一调理剂强化污泥深度脱水效果较差时,可考虑使用多种不同作用机理的药剂复配调理污泥;对于脱水效果较差的污泥,也可通过多种调理

表 2 化学调理剂种类及使用效果
Table 2 Types and effects of chemical conditioning reagents

调理剂类型	调理剂	最佳投加量	强化效果	实验室/ 工程应用	参考 文献
絮凝剂	FeCl ₃	40 mg/L	含水率降至约 80%	工程应用	[40]
	PAC	19.4 g/kg	含水率降至 80.1%	工程应用	[41]
助滤剂	贝壳粉	300 g/kg	含水率降至 70%	实验室	[42]
	半焦	4 g/100 mL	含水率降至 32.19%	实验室	[43]
	稻秆生物炭	0.3 g/g	CST 从 126 s 降至 38 s	实验室	[44]
气态调理剂	O ₃	13.42 mg/g	含水率由 98.87% 降至 81.16%	实验室	[45]
	丙烷	丙烷循环利用	含水率降至 44.3%	实验室	[46]
高炉脱硫灰-PAC-阳离子聚丙烯酰胺		高炉脱硫灰 1 060 g/t; PAC: 260 g/t; 阳离子聚丙烯酰胺: 16 g/t	含水率降低至 60%	工程应用	[47]
复配调理剂	FeCl ₃ +粉煤	55.56%	含水率降低至 52%	实验室	[48]
	FeCl ₃ +CaO+稻壳炭	FeCl ₃ 溶液: 9%; CaO: 2%; 稻壳炭: 2%	含水率降至 44.08%	实验室	[49]
	NaClO-PFS	NaClO: 40 mg/g; PFS: 100 mg/g	含水率降至 85.86%	实验室	[50]

剂复配强化其深度脱水。有研究表明,采用 O₃和铁基生物炭协同调理可改善污泥脱水性能,使 CST 降低 80%^[37]。对于难脱水污泥,在 FeCl₃投加量为 5% 的基础上引入氧化钙(2%)和生物炭(2%),可进一步强化深度脱水效果;与仅投加 FeCl₃的最优条件相比,污泥含水率降低 15.87%。当铁盐与钙盐联合使用时,应先投加铁盐再投加钙盐,通过改变絮体结构促进污泥与水分的有效分离。木屑可为污泥提供疏水通道,降低其在高压状态下的可压缩性,有助于水分的脱除。在硫酸铝铵和阳离子聚丙烯酰胺调理污泥的基础上引入木屑作为助滤剂,CST 可从 15.6 s 降低至 12.3 s^[38]。当絮凝剂与助滤剂联合调理污泥时,应先投加絮凝剂再投加助滤剂^[39];当有机絮凝剂与无机絮凝剂复配时,应先投加无机絮凝剂再投加有机絮凝剂。NaClO 与聚合硫酸铁(polyferric sulfate, PFS)联合强化污泥深度脱水后,污泥含水率和 SRF 分别降至 85.86% 和 4.74×10¹¹ m/kg。多种调理剂复配强化污泥脱水的效果普遍优于单一调理剂,且引入成本较低的调理剂代替一部分成本较高的调理剂,更具经济效益。化学调理剂强化污泥脱水时,大部分调理剂进入滤液或残留在泥饼中,不仅增加了滤液处理负担,还存在调理剂用量较大的问题。

化学调理剂的选择应考虑污泥后续焚烧、卫生填埋、堆肥和建材化利用等不同处置方式对含水率的要求和其他限制性因素。污泥脱水后,采用焚烧处理时应避免使用含氯调理剂,以控制二噁英等有毒污染物产生^[51]。对于后续处置方式为填埋的污泥,通常使用镁盐或铝盐调理,以提高污泥混合物的强度和力学稳定性^[52]。对于计划利用的污泥,使用 Fe/Ca 组合调理剂和生物沥浸等方式,能削减 2.38 个数量级的抗生素抗性基因,降低堆肥过程中

抗性基因传播风险^[53];采用臭氧和铁基生物炭协同调理改善污泥脱水性能时,可高效去除病原菌,达到美国环境卫生协会规定的土地利用 A 类标准^[37]。在污泥建材化利用中,原料的无机物含量至关重要,当氯化铁投加量为 2 g/L 时,相当于增加 10% 的干污泥,采用无机调理剂有利于提升建材抗压强度^[54]。未来污泥的后续处置以资源化为方向,通过优化调理剂配置,在强化污泥脱水的同时,减少衍生污染物产生,提高污泥资源化产品的性能。

3.2 剩余污泥机械脱水方式与设备比选

污水处理厂常用的机械脱水方式分为离心脱水和压滤脱水两种,主要脱除污泥中的间隙水^[55]。离心脱水是在转头高速旋转的带动下,通过离心力和沉降系数的差异,将密度较大的污泥沉积在壁上并与滤液分离^[56]。压滤脱水是将污泥放置于过滤介质上,液压设备施加 1 MPa 以上压力,通过挤压有效分离污泥与滤液。通过调整作用力方向与水分脱除方向、调整布泥面积和厚度、优化作用力参数^[57-59]、调控机械脱水时间等方式,可优化脱水效果,降低处理成本^[60]。

目前较为常用的机械脱水设备有带式压滤机、离心脱水机、板框压滤机,其使用占比分别为 60%、32% 和 8%^[61]。带式压滤机的脱水部分由上下两条滤带和多组大小不一的压榨辊组成,污泥经过重力脱水区后流动性降低,履带运载污泥在 S 型压力脱水区前进,压力作用于污泥以实现脱水。离心脱水机分为卧式和立式两种构造形式^[62]。一般卧式离心机以振动卸料为主,处理能力可高达 350 t/h;立式离心机配备刮刀卸料装置,处理效果好,初期投资仅为卧式离心机的 1/3 左右^[63]。板框压滤机的主要脱水装置由滤布、隔板和滤板组成,污泥进入设备后被过滤成泥饼状态,在高压条件下与隔膜紧密贴合,

实现深度脱水^[64]。叠螺脱水机是一种以螺杆挤压为原理、集浓缩与脱水为一体的脱水设备,以螺旋状叶片为主要器件,电机驱动螺旋叶片产生推动力作用于污泥表面,污泥随螺旋叶片的推动完成脱水并排出设备。

如表 3 所示,在电力消耗方面,叠螺脱水机能耗最低,离心脱水机电力消耗较高,是叠螺脱水机的 10 倍左右。不同类型脱水机的适用对象存在一定

差异:对于造纸污泥等纤维含量较高的污泥,叠螺脱水机脱水效果较好;对于混凝污泥等生物物质含量较低且呈流体状的污泥,若需防止脱水过程中出现跑泥漏泥现象,或对设备占地面积有要求,适合选择离心脱水机;对于剩余污泥等偏固态、含水率较低且对脱水效果要求较高的污泥,适合选择板框压滤机或带式压滤机。

表 3 污泥脱水设备的性能及优缺点比较

Table 3 Comparison of the performance, advantages and disadvantages of sludge dewatering equipment

脱水设备	作用原理	适用对象	含水率	电力消耗	特征	参考文献
立式刮刀离心机	离心机内部产生的离心力和污泥与滤液的密度差,通过刮刀卸料实现固液分离	混凝污泥等黏度较小的污泥	75%~80%	约为叠螺脱水机的 10 倍	占地面积小,投资较少,零部件较多,易损坏,维护成本较高	[65]
卧式振动离心机	离心机内部产生的离心力和污泥与滤液的密度差,通过机械振动卸料实现固液分离	混凝污泥等黏度较小的污泥	75%~80%	约为叠螺脱水机的 10 倍	占地面积小,投资较少,振动卸料充分,污泥易黏附于内壁,振动大	[66]
带式压滤机	污泥置于过滤介质上,通过不同尺寸滚轮上下挤压对污泥产生剪切力实现固液分离	剩余污泥等非含油污泥	75%~80%	约为叠螺脱水机的 3~5 倍	占地面积大,操作简便,耗能低,滤布易跑偏,密闭性差,有异味,环境差	[67]
板框压滤机	进料后先使污泥固液分离,再鼓胀隔膜片挤压完成脱水	剩余污泥和混凝污泥等	65%~80%	为叠螺脱水机的 3~5 倍	占地面积大,效果稳定,运行不连续,高压状态下滤布易堵塞,有异味,环境差、振动大	[68]
叠螺脱水机	通过螺旋叶片转动挤压的压力实现固液分离	造纸污泥、含油污泥等有机物含量大的污泥	75%~80%	较小	占地面积为离心机的 1/2,结构简单,操作简便,封闭式,环境好	[69]

各种脱水设备在优化工艺后均可达到相似的脱水效果,实际应用中选择设备时主要考虑经济成本、脱水效果和场地使用效率;若主要考虑调理剂成本,可选用带式压滤机;若以场地利用率和运行成本为主要考量,可选用离心脱水机或叠螺脱水机;若污泥含固率较高,且以调理剂综合成本及运行维护为主要考量,建议选择板框压滤机。此外,还需根据实际污泥性质和机械脱水影响因素,优化调理剂类型与脱水设备参数,实现脱水设备的高效利用。由于污泥性质复杂且差异较大,直接使用机械脱水无法脱除结合水和胞内水,难以满足污泥处置对含水率的要求,因此通常在机械脱水前通过预处理改善污泥性质,提升其机械脱水性能。

4 剩余污泥深度脱水后的资源化利用途径

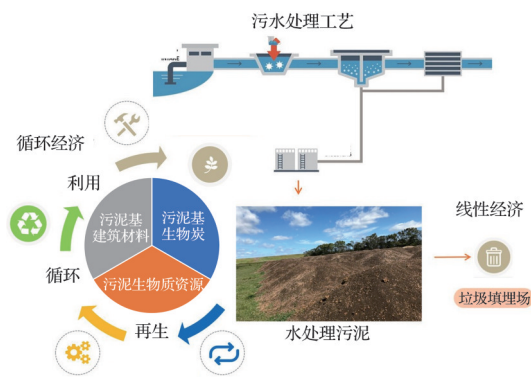
4.1 污泥的肥料化利用

污泥脱水后,可通过制备肥料、建筑材料、生物炭、高价值产品等途径实现资源化利用(图 3)。污泥经直接干化、发酵堆肥等方式处理,可转换为富含营养物质且环境风险低的污泥肥料。《农用污泥

污染物控制标准》(GB 4284—2018)规定,污泥作为农用材料,要求有机质含量 $\geq 20\%$,镉、汞含量 $< 3\text{ mg/kg}$,砷含量 $< 30\text{ mg/kg}$,铅含量 $< 300\text{ mg/kg}$,铬含量 $< 500\text{ mg/kg}$ 。污泥中含有不同比例的 Fe、K、Zn 等元素,在符合污染物控制标准的情况下,脱水风干后可直接用于土壤改良,能有效改善土壤有机质含量^[70]。将玉米芯、生物炭和污泥堆肥后的混合物混配用于种植,高羊茅草发芽率高达 88.3%^[71]。使用热水解+板框脱水工艺处理后的污泥制备营养土,当施用量为 9 kg/m²时,0~20 cm 深度土壤中的微生物物种丰富度有显著提升^[72]。剩余污泥经好氧-厌氧法发酵 25 d 后,有效磷、钾等指标含量大幅提升,具有作为园林营养土的潜力^[73]。以珠海市城市污水处理厂剩余污泥制备项目为例,该厂每年产生的 45 万 t 污泥用于制备土壤改良剂,可产生直接效益 4 293 万元,环境间接效益 124.02 万元,经济效益费用比为 1.67,具有良好的经济收益^[74]。

4.2 建筑材料制备

剩余污泥含有的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 等金属化合物,与混凝土原材料——黏土具有相似的物质组成,可代替一部分黏土制备污泥掺杂混凝土。当污泥处于 700~1 000 ℃、0.6~2.6 MPa 的高温高压条件

图3 剩余污泥资源化^[75]Fig. 3 Resource utilization of residual sludge^[75]

下,以 O_2 为氧化剂,可转化为以 H_2 为主的可燃合成气,剩余残渣可作为混凝土的合成材料^[76-77]。当污泥与黏土掺杂比为1:10时,制备的污泥基轻骨料与目前商业轻骨料无明显差异;且因污泥基轻骨料孔隙较多,材料抗压强度有所提升,烧结过程中的轻团聚体有助于固定污泥中的重金属^[78],降低重金属污染风险。在混凝土中掺杂25%的污泥陶粒,可使混凝土的导热系数降低46%,并提升其抗变形能力和保温隔热性能^[79]。剩余污泥与水泥复合制备的混凝土,能减轻建筑物重量,且其比热与普通混凝土相似,导热系数降低23%^[80]。由污泥掺杂制备的污泥陶粒再生混凝土具有较高的耐高温性,在600℃条件下处理后,强度保持率大于60%;其中空心砌块污泥陶粒再生混凝土具有良好的保温特性,是性能优良的墙体保温材料^[81]。

以水泥与硫酸铝作为脱水剂(二者掺杂量分别为45%、55%),处理后的污泥可作为原料混合制砖,能有效减少水泥用量^[82]。将干化后的污泥与黏土混合,在高温下制备瓷砖,当污泥掺杂量为0%~15%时,瓷砖具有良好的抗弯强度^[83]。使用干污泥替代部分黏土制备黏土-污泥砖,砖的抗压强度在10~20 MPa之间,该工艺可有效减少黏土资源开采,在实现污泥资源化利用的同时节约自然资源^[84]。湿污泥直接制砖能有效节约脱水和干燥成本,其最大掺杂量高达60%;在1210℃下制备的砖体,抗压强度高达25.5 MPa^[85]。

4.3 污泥生物炭制备

剩余污泥制备的污泥基生物炭,具有较好的孔隙结构和较大的比表面积,在强化污泥脱水、吸附水体污染物、用作燃料、改良土壤等方面效果良好。在400℃条件下制备的含铁污泥生物炭,相较稻壳生物炭具有更大的比表面积和更丰富的含氧官能团,用于强化污泥脱水时,SRF可降低63.9%^[86]。在700℃下制备的铁/钙污泥基生物炭,于 Cr^{6+} 初始浓度20 mg/L、吸附时间6 h的条件下, Cr^{6+} 的去除

率为97.7%^[49]。在500℃下制备的 $ZnCl_2$ 活化污泥生物炭,对四环素的吸附量可达112 mg/g,并且通过加热可实现污泥基生物炭的再生与循环利用^[87]。通过水热炭化制备的高热值污泥生物炭,热值为15.21 MJ/kg,与褐煤相近,可作为再生燃料实现污泥资源化和能量回收^[88]。在300~350℃下低温热解的污泥基生物炭,是较为清洁的固体燃料,具有良好的燃烧特性,同时可去除污泥中70%的氮和硫^[89]。该生物炭中Zn、Pb等重金属浸出量低,可用作酸性土壤改良剂;向酸性土壤中投加污泥基生物炭,可使土壤pH值提升1.82,为植物生长提供有利条件^[90]。

4.4 高附加值产品生产

剩余污泥主要由微生物构成,富含有机质,提取并生产其中的高附加值产品,可大幅提升经济效益,具有较好的应用前景。从啤酒废水剩余污泥中提取的溶菌酶,可作为天然抗感染药剂^[91]。有研究发现,通过碱提取法从剩余污泥中获得的类藻酸盐物质,具有一定防火隔热性能,可作为建筑材料的防火涂料^[92]。剩余污泥EPS中的类硫酸盐多糖具有巨大的回收潜力,从污水处理厂含盐污泥中提取的类硫酸盐多糖浓度高达418 mg/g,可广泛应用于食品、印染、橡胶等行业^[93]。对剩余污泥进行亚硝酸盐与碱性耦合厌氧发酵,可大幅提升挥发性脂肪酸积累量,其产量高达527.9 mg/g;挥发性脂肪酸可作为补充碳源强化污水脱氮,还可作为生物燃料实现资源化利用^[94]。厕纸与厨余垃圾中含有的大量纤维素,在污水处理中难降解且最终富集到剩余污泥中;采用高速破碎机提取污泥中的纳米纤维素,该物质具有高密度、高透明度和高抗拉强度等特性^[95]。采用离子液体法可提取剩余污泥中99%以上的纤维素,漂洗后使用Bronsted酸性液体可将纤维素以0.31的转化率转化为乙酰丙酸;乙酰乙酸作为增稠剂和稳定剂,可用于制备洗护用品^[96]。尽管高附加值产品具有良好的应用前景,但其生产成本仍有待评估。

5 结论与展望

污泥中的结合水和胞内水无法直接通过机械脱水去除,污泥性质、机械方式、预处理方式等均会影响剩余污泥的脱水性能,通常采用化学调理方法强化污泥脱水效果。脱水后污泥的资源化途径较多,可用于制备建筑材料、生物炭等,或用于污泥生物质资源的回收利用。目前,污泥脱水和资源化领域仍然面临以下待解决问题:

1)关于污泥固持水分及化学调理的作用机制

仍然不够完善,需进一步解析污泥性质对化学调理作用效果的影响机制,研发新型调理剂,并根据污泥性质合理选择调理剂,以提高脱水效率、降低成本。

2)常规化学调理剂无法循环利用,在实际应用中消耗量较大且残留在泥饼和滤液中,导致药剂浪费,并使滤液中污染物含量和盐度增加,需研发新型可循环利用的调理剂及其应用技术。

3)目前针对污泥脱水处理中重金属、持久性污染物的同步去除及控制研究不足,需在污泥预处理阶段同步考虑滤液处理及资源化产物回用中的风险控制问题。

参考文献

- [1] 城市建设统计年鉴[R]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2023.
China urban construction statistical yearbook [R]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2023. (in Chinese)
- [2] 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 M H. Study on improving dewatering performance of activated sludge by chemical conditioning [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [3] 黑龙江省课题组. 黑龙江省污水处理厂污泥处理处置工艺研究[J]. 中国工程咨询, 2019(4): 43-48.
Heilongjiang Province Research Group. Study on sludge treatment and disposal technology of Heilongjiang sewage treatment plant [J]. Chinese Engineering Consultants, 2019(4): 43-48. (in Chinese)
- [4] CRONJÉ A L, TURNER C, WILLIAMS A G, et al. The respiration rate of composting pig manure [J]. Compost Science & Utilization, 2004, 12(2): 119-129.
- [5] 于晓, 李衍博, 张文哲, 等. 化学调理法改善污泥脱水的研究进展[J]. 工业水处理, 2018, 38(11): 1-6.
YU X, LI Y B, ZHANG W Z, et al. Research progress in the improvement of sludge dewatering by chemical conditioning method [J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(11): 1-6. (in Chinese)
- [6] DENG W Y, LI X D, YAN J H, et al. Moisture distribution in sludges based on different testing methods [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(5): 875-880.
- [7] 彭国栋. 污泥发酵对泥焦浆的成浆特性影响和机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
PENG G D. Study on the influence and mechanism of sludge fermentation on the pulping characteristics of sludge coke slurry [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)
- [8] GUO J Y, GAO Q F, CHEN Y H, et al. Insight into sludge dewatering by advanced oxidation using persulfate as oxidant and Fe^{2+} as activator: Performance, mechanism and extracellular polymers and heavy metals behaviors [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112476.
- [9] 林子增, 黄瑛, 乔红杰, 等. 城市污水厂污泥化学调理深度脱水技术述评[J]. 应用化工, 2016, 45(6): 1159-1162.
LIN Z Z, HUANG Y, QIAO H J, et al. A review of chemical conditioning for advanced sewage sludge dewatering technology [J]. Applied Chemical Industry, 2016, 45(6): 1159-1162. (in Chinese)
- [10] LUO H C, GUO W Q, ZHAO Q, et al. Compared effects of "solid-based" hydrogen peroxide pretreatment on disintegration and properties of waste activated sludge [J]. Chinese Chemical Letters, 2022, 33(3): 1293-1297.
- [11] 王彦莹, 周翠红, 吴玉鹏, 等. 超声波声强及其对污泥脱水特性影响的研究[J]. 环境科技, 2020, 33(1): 17-22.
WANG Y Y, ZHOU C H, WU Y P, et al. Ultrasonic sound intensity and its effect on sludge dewatering characteristics [J]. Environmental Science and Technology, 2020, 33(1): 17-22. (in Chinese)
- [12] WANG F, JI M, LU S. Influence of ultrasonic disintegration on the dewaterability of waste activated sludge [J]. Environmental Progress, 2006, 25(3): 257-260.
- [13] 陈悦佳, 赵庆良, 柳成才. 冷冻温度对冻融污泥有机物变化的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(4): 1-8.
CHEN Y J, ZHAO Q L, LIU C C. Effect of freezing temperature on freeze/thaw sludge organic matter transformation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(4): 1-8. (in Chinese)
- [14] 武亚军, 何心妍, 张旭东, 等. 冻融预处理填埋污泥的室内真空脱水试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(11): 154-161.
WU Y J, HE X Y, ZHANG X D, et al. Experimental study on vacuum dehydration of sludge in landfill by freeze-thaw pretreatment [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(11): 154-161. (in Chinese)
- [15] WANG L P, LI A M. Hydrothermal treatment coupled with mechanical expression at increased temperature for excess sludge dewatering: The dewatering performance and the characteristics of products [J]. Water Research, 2015, 68: 291-303.
- [16] 王寿儒, 吴亚萍, 王亚东, 等. 热水解对剩余污泥预处理效果的影响[J]. 天津城建大学学报, 2022, 28(5): 367-370, 381.
WANG S R, WU Y P, WANG Y D, et al. Effect of thermal hydrolysis on excess sludge pretreatment [J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2022, 28(5): 367-370, 381. (in Chinese)
- [17] 李恺, 叶志平, 王凤英, 等. 冷融技术联合化学调理对

- 污泥脱水性能的影响及其机理[J]. 环境科学学报, 2010, 30(3): 536-543.
- LI K, YE Z P, WANG F Y, et al. The effect and mechanism of freeze/thawing combined with chemical treatment on sludge dewaterability [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(3): 536-543. (in Chinese)
- [18] 施跃锦. 城市污水处理厂污泥的脱水、厌氧消化及厌氧堆肥[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2002.
- SHI Y J. Dehydration, anaerobic digestion and anaerobic composting of sludge from municipal sewage treatment plant [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [19] RUIZ T, KAOSOL T, WISNIEWSKI C. Dewatering of urban residual sludges: Filterability and hydro-textural characteristics of conditioned sludge [J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, 72(3): 275-281.
- [20] 张海丰, 樊雪. 基于XDLVO理论解析MBR膜污染研究进展[J]. 化学通报, 2016, 79(7): 604-609.
- ZHANG H F, FAN X. Research progress in membrane fouling in membrane bioreactor based on XDLVO approach [J]. *Chemistry*, 2016, 79(7): 604-609. (in Chinese)
- [21] ZHAI Q L, LU H Y, LIU R Q, et al. Removal of suspended solids from weathered tungsten-ore beneficiation wastewater by electroneutralization and chemical precipitation [J]. *Minerals Engineering*, 2021, 173: 107167.
- [22] FENG L, ZHONG K Y, ZHOU W, et al. Synthesis of a chitosan-based flocculant CS-g-P(AM-IA-AATPAC) and evaluation of its performance on Ni^{2+} removal: Role of chelating-coordination and flocculation [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(1): 109138.
- [23] HE D Q, SUN M K, BAO B, et al. Rethinking the timing of flocculant addition during activated sludge dewatering [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 47: 102744.
- [24] XU Q X, HUANG Q S, WEI W, et al. Improving the treatment of waste activated sludge using calcium peroxide [J]. *Water Research*, 2020, 187: 116440.
- [25] LI R J, LOU Y, XU Y C, et al. Effects of surface morphology on alginate adhesion: Molecular insights into membrane fouling based on XDLVO and DFT analysis [J]. *Chemosphere*, 2019, 233: 373-380.
- [26] 魏淑巧. 微生物絮凝剂在环境污染治理中的应用研究[J]. 价值工程, 2024, 43(7): 101-103.
- WEI S Q. Research on the application of microbial flocculants in environmental pollution control [J]. *Value Engineering*, 2024, 43(7): 101-103. (in Chinese)
- [27] LIU J W, MA J W, LIU Y Z, et al. Optimized production of a novel bioflocculant M-C11 by *Klebsiella* sp. and its application in sludge dewatering [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(10): 2076-2083.
- [28] AYOL A. Enzymatic treatment effects on dewaterability of anaerobically digested biosolids-I: Performance evaluations [J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40(7): 2427-2434.
- [29] 宋永伟, 马莹莹, 王蕊, 等. 石英砂提高城市污泥生物沥浸效率主导因素分析[J]. 中国环境科学, 2021, 41(5): 2283-2289.
- SONG Y W, MA Y Y, WANG R, et al. The analysis of dominant factors in enhancing municipal sludge bioleaching efficiency by quartz sand [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(5): 2283-2289. (in Chinese)
- [30] LIN F, LI J G, ZHU X L, et al. A comprehensive insight into the combined effects of enzymatic and freeze thawing on the dewatering performance of activated sludge [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 344(1): 012089.
- [31] YUAN H P, ZHU N W. Progress of improving waste activated sludge dewaterability: Influence factors, conditioning technologies and implications and perspectives [J]. *The Science of the Total Environment*, 2024, 912: 168605.
- [32] WANG L P, ZHANG L, LI A M. Hydrothermal treatment coupled with mechanical expression at increased temperature for excess sludge dewatering: Influence of operating conditions and the process energetics [J]. *Water Research*, 2014, 65: 85-97.
- [33] HE D Q, ZHU T T, SUN M K, et al. Unraveling synergistic mechanisms of polyacrylamide coagulation and $\text{Fe}^{2+}/\text{CaO}_2$ Fenton-like oxidation to enhance sludge dewatering [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 479: 147576.
- [34] LIU T S, ZHANG X Y, DING G C, et al. Improvement of waste sludge dewaterability by a novel co-conditioning approach with polyaluminum chloride-sludge based carbon-polyacrylamide [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 330: 125449.
- [35] LI S S, LIU Y L, DOU C C, et al. Mechanism of thermally activated sodium persulfate-biochar skeleton treatment to improve the dewaterability of waste activated sludge [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(1): 109062.
- [36] LU J J, LU Q W, DI L, et al. Iron-based biochar as efficient persulfate activation catalyst for emerging pollutants removal: A review [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2023, 34(11): 108357.
- [37] 喻江维. 臭氧与零价铁/铁基生物炭协同调理市政污泥促进污泥深度脱水的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- YU J W. Study on synergistic conditioning of municipal sludge by ozone and zero-valent iron/iron-based biochar to promote deep dehydration of sludge [D]. Wuhan:

- Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [38] TIAN G P, LI L, LIU B, et al. Enhancing the dewaterability of the municipal sludge by flocculant combined with skeleton builder [J]. *Environmental Technology and Innovation*, 2022, 25: 102166.
- [39] 孙婧欣. CA/Fe²⁺/PDS体系改善污泥脱水性能及机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- SUN J X. Study on improvement of sludge dewatering performance and mechanism by CA/Fe²⁺/PDS system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [40] LI L X, PENG C, DENG L H, et al. Understanding the synergistic mechanism of PAM-FeCl₃ for improved sludge dewaterability [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113926.
- [41] GUO J Y, CHEN C. Sludge conditioning using the composite of a bioflocculant and PAC for enhancement in dewaterability [J]. *Chemosphere*, 2017, 185: 277-283.
- [42] 刘一止, 周先桃, 杨彤. 生物壳粉与CPAM联用改善污泥脱水性能的研究[J]. *工业水处理*, 2022, 42(12): 154-159.
- LIU Y Z, ZHOU X T, YANG T. Study on improving sludge dewatering performance by combining biological shell powder with CPAM [J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 42(12): 154-159. (in Chinese)
- [43] 戴财胜, 彭颖, 黄陈宇, 等. 基于半焦的城市污泥调质与机械压滤脱水[J]. *环境工程*, 2021, 39(2): 131-135.
- DAI C S, PENG Y, HUANG C Y, et al. Conditioning and mechanical filter press dewatering of municipal sludge with the use of semi-coke [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(2): 131-135. (in Chinese)
- [44] GUO J Y, JIANG S L, PANG Y J. Rice straw biochar modified by aluminum chloride enhances the dewatering of the sludge from municipal sewage treatment plant [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 338-344.
- [45] XIA T, ZHANG X, CHEN D J, et al. Effects of ceramsite derived from sewage sludge combined with the O₃-FeCl₃/PAM process on the dewatering of waste-activated sludge and investigation of dewatering mechanisms [J]. *Water Science & Technology*, 2023, 88(2): 367-380.
- [46] WU B R, HORVAT K, MAHAJAN D, et al. Free-conditioning dewatering of sewage sludge through in situ propane hydrate formation [J]. *Water Research*, 2018, 145: 464-472.
- [47] 鲁长炜. 一种污泥脱水药剂的应用及研究[J]. *中国金属通报*, 2019(5): 190-191.
- LU C Y. Application and research of a sludge dewatering agent [J]. *China Metal Bulletin*, 2019(5): 190-191. (in Chinese)
- [48] QI Y, THAPA K B, HOADLEY A F A. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties-A review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 171(2): 373-384.
- [49] 矫洪铭, 付亮, 周盈盈, 等. 铁-钙-炭强化污泥深度脱水及污泥基生物炭制备[J]. *能源环境保护*, 2024, 38(1): 101-108.
- JIAO H M, FU L, ZHOU Y Y, et al. Iron-calcium-biochar enhanced sludge deep dewatering and sludge-based biochar preparation [J]. *Energy Environmental Protection*, 2024, 38(1): 101-108. (in Chinese)
- [50] 夏加华, 饶汀, 季娟, 等. 氧化-絮凝调理对剩余污泥脱水性能的影响[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(3): 173-182.
- XIA J H, RAO T, JI J, et al. Effects of oxidation-flocculation conditioning on dewatering performance of activated sludge [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(3): 173-182.
- [51] LIANG Y, XU D H, FENG P, et al. Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 295: 126456.
- [52] 曹楠楠. 改性污泥稳定化过程及其卫生填埋技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- CAO N N. Study on stabilization process of modified sludge and its sanitary landfill technology [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [53] LU Y, ZHENG G Y, ZHOU W B, et al. Bioleaching conditioning increased the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons to promote their removal during co-composting of industrial and municipal sewage sludges [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 665: 1073-1082.
- [54] 郇光梅, 金宜英, 李欢, 等. 无机调理剂对污泥建材化的影响研究[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(13): 82-84.
- LI G M, JIN Y Y, LI H, et al. Study on effects of inorganic conditioner on sludge reuse as building materials [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(13): 82-84. (in Chinese)
- [55] 郑泰山, 蔡川, 黄宋义, 等. 污泥深度机械脱水技术及设备的比较分析[J]. *机电工程技术*, 2018, 47(3): 109-112.
- ZHENG T S, CAI C, HUANG S Y, et al. Comparison and analysis of sludge deep mechanical dewatering technology and equipment [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2018, 47(3): 109-112. (in Chinese)
- [56] 陈仕均, 唐海蓉, 张兆沛, 等. 离心机的原理、操作及维护[J]. *现代科学仪器*, 2010(3): 151-154.
- CHEN S J, TANG H R, ZHANG Z P, et al. Principle manipulation maintenance of centrifuge [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2010(3): 151-154. (in Chinese)
- [57] WAKEMAN R J. Separation technologies for sludge dewatering [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 144(3): 614-619.

- [58] 王绪科, 朱英, 邹艺娜, 等. 影响污泥深度机械压力脱水因素的探讨[J]. 中国给水排水, 2012, 28(10): 23-25.
WANG X K, ZHU Y, ZOU Y N, et al. Discussion on factors affecting advanced mechanical sludge dewatering [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(10): 23-25. (in Chinese)
- [59] 苏小雨. 市政污泥机械压滤高干脱水的机理研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2021.
SU X Y. Study on mechanism of municipal sludge by high-dry mechanical dewatering [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2021. (in Chinese)
- [60] MAHWACHI M, MIHOUBI D. Pressure and porosity profiles during filtration-expression process [J]. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2020, 54(2): 370-379.
- [61] 谭学军, 王磊. 我国重点流域典型污水厂污泥处理处置方式调研与分析[J]. 中国给水排水, 2022, 38(14): 1-8.
TAN X J, WANG L. Investigation and analysis on the treatment and disposal methods of typical sewage treatment plant sludge in China's key river basins [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(14): 1-8. (in Chinese)
- [62] 白冰, 李现瑾, 徐长思, 等. 剩余污泥机械脱水技术研究进展[J]. 节能, 2014, 33(4): 4-8.
BAI B, LI X J, XU C S, et al. Research progress of mechanical dewatering technology for excess sludge [J]. Energy Conservation, 2014, 33(4): 4-8. (in Chinese)
- [63] 董晓磊, 白思思, 徐建修, 等. 卧式振动卸料离心脱水机与立式刮刀卸料离心脱水机对比分析[J]. 选煤技术, 2018(4): 62-64, 69.
DONG X L, BAI S S, XU J X, et al. Comparative analysis of horizontal vibrational-discharge centrifuge and vertical scraper-discharge centrifuge [J]. Coal Preparation Technology, 2018(4): 62-64, 69. (in Chinese)
- [64] DING A, QU F S, LIANG H, et al. Effect of adding wood chips on sewage sludge dewatering in a pilot-scale plate-and-frame filter press process [J]. RSC Advances, 2014, 4(47): 24762-24768.
- [65] 张双江. 立式刮刀卸料离心机技术改进与探讨[J]. 煤矿机械, 2021, 42(8): 144-146.
ZHANG S J. Technical improvement and discussion of vertical scraper discharge centrifuge [J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42(8): 144-146. (in Chinese)
- [66] 邹朝霞, 邸光宇, 庞国辉. 卧式离心机应用于瓦斯泥脱水处理的尝试[J]. 冶金动力, 2010, 29(1): 67-70, 72.
ZOU Z X, DI G Y, PANG G H. Trial of application of horizontal centrifuge in dewatering of gas sludge [J]. Metallurgical Power, 2010, 29(1): 67-70, 72. (in Chinese)
- [67] 周德荣. 带式压滤机与卧螺离心机在污泥脱水中的应用比较[J]. 石油化工技术与经济, 2017, 33(4): 47-51.
ZHOU D R. Comparison of application of belt filter press and decanter centrifuge in sludge dewatering [J]. Technology & Economics in Petrochemicals, 2017, 33(4): 47-51. (in Chinese)
- [68] 何华. 给水厂板框压滤机与离心脱水机建设运营成本分析[J]. 给水排水, 2023, 49(8): 8-12.
HE H. Study on the construction operation cost analysis of plate-frame filter press and centrifuge in waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(8): 8-12. (in Chinese)
- [69] 韩国勇. 含油污泥减量化工艺试验及对比[J]. 油气田环境保护, 2017, 27(2): 24-26.
HAN G Y. Experiment and comparison of oily sludge reduction process [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2017, 27(2): 24-26. (in Chinese)
- [70] GÖRGÜNER M, AKSOY A, SANIN F D. A transport cost-based optimization for recycling of municipal sludge through application on arable lands [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 94: 146-156.
- [71] 刘天赐. 小型市政污水处理厂污泥稳定与绿地应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
LIU T C. Study on sludge stabilization and green space application of small municipal sewage treatment plant [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [72] 孙文彦, 彭祚登, 王海东, 等. 施用污泥制有机营养土对沙地苗圃土壤微生物的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(5): 91-97.
SUN W Y, PENG Z D, WANG H D, et al. Effect of applying organic nutrient soil made from sludge on soil microorganisms in sandy nurseries [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(5): 91-97. (in Chinese)
- [73] 郭蔚华, 刘云霄, 包兵, 等. 污泥醇制园林营养土好氧-厌氧交替法可行性分析[J]. 环境工程学报, 2012, 6(10): 3725-3729.
GUO W H, LIU Y X, BAO B, et al. Feasibility analysis of aerobic-anaerobic alternating method for fermenting sludge into garden nutrient soil [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(10): 3725-3729. (in Chinese)
- [74] 秦伟, 刘子秋. 市政污泥资源化利用经济效益分析: 以珠海市市政污泥堆肥为例[J]. 环境保护与循环经济, 2023, 43(1): 12-15.
QIN W, LIU Z Q. Economic benefit analysis of municipal sludge resource utilization: Taking Zhuhai municipal sludge compost as an example [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2023, 43(1): 12-15. (in Chinese)
- [75] NGUYEN M D, THOMAS M, SURAPANENI A, et al. Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy [J]. Environmental Technology & Innovation, 2022, 28: 102651.
- [76] SPINOSA L. From sludge to resources through biosolids [J]. Water Science and Technology, 2004, 50(9): 1-8.
- [77] NIPATTUMMAKUL N, AHMED I I, KERDSU-

- WAN S, et al. Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(21): 11738-11745.
- [78] SUCHORAB Z, BARNAT-HUNEK D, FRANUS M, et al. Mechanical and physical properties of hydrophobized lightweight aggregate concrete with sewage sludge [J]. *Materials*, 2016, 9(5): 317.
- [79] 钱伟, 樊传刚, 冉松林, 等. 污泥陶粒次轻混凝土的制备与性能研究[J]. *混凝土*, 2012(4): 122-125.
- QIAN W, FAN C G, RAN S L, et al. Preparation and performance of specified density concrete using keramzite made from municipal sewage sludge [J]. *Concrete*, 2012(4): 122-125. (in Chinese)
- [80] SALES A, DE SOUZA F R, DOS SANTOS W N, et al. Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(12): 2446-2453.
- [81] XIE J H, ZHAO J B, WANG J J, et al. Investigation of the high-temperature resistance of sludge ceramsite concrete with recycled fine aggregates and GGBS and its application in hollow blocks [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 34: 101954.
- [82] JIANU N R, MOGA I C, PRICOP F, et al. Wastewater sludge used as material for bricks fabrication [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 374: 012061.
- [83] AMIN S K, ABDEL HAMID E M, EL-SHERBINY S A, et al. The use of sewage sludge in the production of ceramic floor tiles [J]. *HBRC Journal*, 2018, 14(3): 309-315.
- [84] WANG Y, WANG F, JI M. Research on drying sludge in brick making [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 777: 19-25.
- [85] ZHOU J, LI T T, ZHANG Q Y, et al. Direct-utilization of sewage sludge to prepare split tiles [J]. *Ceramics International*, 2013, 39(8): 9179-9186.
- [86] WU Y, ZHANG P Y, ZENG G M, et al. Enhancing sewage sludge dewaterability by a skeleton builder: Biochar produced from sludge cake conditioned with rice husk flour and FeCl_3 [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2016, 4(10): 5711-5717.
- [87] SINGH V, CHAKRAVARTHI M H, SRIVASTAVA V C. Chemically modified biochar derived from effluent treatment plant sludge of a distillery for the removal of an emerging pollutant, tetracycline, from aqueous solution [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021, 11(6): 2735-2746.
- [88] CHEN C, LIU G M, AN Q, et al. From wasted sludge to valuable biochar by low temperature hydrothermal carbonization treatment: Insight into the surface characteristics [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121600.
- [89] CHEN R J, SHENG Q, DAI X H, et al. Upgrading of sewage sludge by low temperature pyrolysis: Biochar fuel properties and combustion behavior [J]. *Fuel*, 2021, 300: 121007.
- [90] MALIK Z, ZONG Y T, LU S G, et al. Effect of biochar and quicklime on growth of wheat and physicochemical properties of Ultisols [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(17): 496.
- [91] 赵维韦, 宋建华, 许建刚, 等. 啤酒废水处理剩余污泥中高附加值成分及其应用前景[J]. *中外酒业*, 2015(9): 40-41.
- ZHAO W W, SONG J H, XU J G, et al. High value-added components in beer wastewater treatment residual sludge and their application prospects [J]. *Global Alcinfo*, 2015(9): 40-41.
- [92] KIM N K, MAO N T, LIN R, et al. Flame retardant property of flax fabrics coated by extracellular polymeric substances recovered from both activated sludge and aerobic granular sludge [J]. *Water Research*, 2020, 170: 115344.
- [93] XUE W Q, ZENG Q, LIN S, et al. Recovery of high-value and scarce resources from biological wastewater treatment: Sulfated polysaccharides [J]. *Water Research*, 2019, 163: 114889.
- [94] HUANG C, LIU C C, SUN X Y, et al. Hydrolysis and volatile fatty acids accumulation of waste activated sludge enhanced by the combined use of nitrite and alkaline pH [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(23): 18793-18800.
- [95] JONOBI M, MATHEW A P, OKSMAN K. Producing low-cost cellulose nanofiber from sludge as new source of raw materials [J]. *Industrial Crops and Products*, 2012, 40: 232-238.
- [96] KATARZYNA G, CLARA L, JAUME G, et al. Valorization of cellulose recovered from WWTP sludge to added value levulinic acid with a Brønsted acidic ionic liquid [J]. *Catalysts*, 2020, 10(9): 1004.

(编辑 朱备)