



生物质材料用于污泥深度脱水的研究进展

张彦平,裴佳华,高珊珊,李 静

(河北工业大学土木与交通学院,天津 300401)

[摘要] 污泥深度脱水是实现污泥资源化及能源利用的关键,更是国家实现低碳发展目标的迫切需要。生物质材料来源广,具有多孔结构和高热值等特性,有利于污泥后续干化、焚烧及资源化利用,近年来在污泥深度脱水中的应用日益广泛。基于此,分析了基于骨架构建的污泥脱水机制,介绍了近年来用于污泥调理的生物质材料,包括农林废弃物、生物质炭材料和改性生物质材料,提出了影响污泥脱水效果的因素有生物质材料的投加量、粒径以及生物质材料与其他药剂的投加顺序,总结了生物质材料对污泥中重金属浸出毒性的降低作用、对污泥滤液水质的改善作用和对后续处理的影响。在此基础上,对生物质材料在污泥调理中的应用前景进行了展望,提出可以寻找更多的生物质材料的改性方法和联用方法,以及可以考虑将生物质材料调理与后续污泥资源化利用相结合,以进一步增强污泥调理效果,并推动其在实际工程中的应用。

[关键词] 生物质;污泥;脱水;资源化

[中图分类号] X705 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)07-0024-09

Research progress of biomass materials for sludge deep dewatering

ZHANG Yanping, PEI Jiahua, GAO Shanshan, LI Jing

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The deep dewatering of sludge is the key to realize the resource and energy utilization of sludge, and it is also the urgent need to realize the low carbon development goal of our country. Biomass materials have the characteristics of wide source, porous structure and high calorific value, which is favorable for sludge drying, incineration and resource utilization. In recent years, biomass materials have been widely used in sludge deep dewatering. Based on this, the sludge dewatering mechanism based on skeleton construction was analyzed. The types of biomass materials used for sludge conditioning in recent years were introduced, including agricultural and forestry waste, biomass carbon materials and modified biomass materials. The factors affecting the sludge dewatering effect were put forward, including the dosage and particle size of biomass materials, and dosing sequence of biomass materials and other agents. The effects of biomass materials on reducing the leaching toxicity of heavy metals in sludge, improving the water quality of sludge filtrate and subsequent treatment were summarized. On this basis, the application prospect of biomass materials in sludge conditioning was prospected, and it was proposed that more modification methods and combined methods of biomass materials could be found, and the combination of biomass material conditioning and subsequent sludge resource utilization could be considered. It was hoped to enhance the effect of sludge conditioning and promote its application in practical engineering.

Key words: biomass; sludge; dewatering; resource recycling

2019年,我国污泥产量已突破6 000万t(以含水率80%计),预计2025年污泥产量将高达9 000万t^[1]。作为污水处理的副产物,剩余污泥成分复杂,通常含有大量病原菌、难降解有机物、微塑料以及重金属

等^[2],给生态环境的可持续发展带来巨大的压力。剩余污泥具有高亲水性及生物凝胶结构,水和颗粒间的结合力很强,导致污泥经常规脱水后,含水率仍保持在80%左右。较高的含水率增加了污泥后续

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51608166)

处置和资源化利用成本,无法满足卫生填埋、焚烧、农用以及建材利用等对污泥含水率的要求^[3-4]。因此,污泥深度脱水成为目前污泥处理处置的瓶颈^[5],更是国家实现“低碳发展”目标的迫切需要^[6]。

污泥调理技术是污泥深度脱水的关键所在。化学调理是当前广泛采用的污泥高效调理方法,包括氧化调理、絮凝调理及骨架材料调理等。关于氧化调理和絮凝调理技术,水处理研究者已经做了大量的研究和总结^[3,7-10],而针对骨架材料调理在污泥脱水方面的研究和综述仍然较少。骨架材料通常与氧化剂或絮凝剂联合使用,以增强污泥的刚性结构和透水性能,从而改善污泥的脱水性能和效果^[11]。早期,通常采用粉煤灰^[12]、生石灰^[13]、磷石膏^[14]、褐煤^[15]、硅藻土^[16]等惰性材料作为骨架颗粒,其在污泥中形成坚硬致密的骨架结构,降低污泥的压缩性能,保证脱水效果^[17-18]。但这类矿物质内部含有一定量重金属等有害物质,投加到污泥体系会对后续处理与处置造成一定影响,且有可能会产生二次污染。因此,考虑到污泥后续资源化利用和可能产生的环境影响,研究者开发了高纤维颗粒或富碳颗粒等生物质材料,如稻壳^[18]、核桃壳^[19]、竹粉^[20]、麦秸粉^[21]、稻壳炭^[22]、秸秆炭^[23]、污泥炭^[24]等,用于污泥调理。经生物质材料调理后,污泥的热值和有机质含量增高,有利于污泥后续焚烧、堆肥及污泥生物炭制备等资源化应用。笔者对生物质材料调理污泥脱水的机制、种类、影响因素,对滤液性质及后续资源化的影响等进行了综述,并对其在污泥处理方面的发展前景进行了展望。

1 基于骨架构建的污泥脱水机制

最新研究表明,包裹在污泥絮体表面的胞外聚合物(EPS)是阻碍污泥脱水的关键,EPS具有高亲水性和高压缩性的特征^[8],采用氧化调理后,污泥体系会发生pH的改变^[25-26],同时导致表面EPS的大量剥离和有机物的溶出,产生大量细小的污泥絮体,这些细小的污泥碎片和有机物在压滤过程中会迁移至滤饼孔隙中,使污泥具有高可压缩性和可变形性,导致污泥中过水通道被堵塞,水分不易透过,从而在一定程度上阻碍了污泥脱水^[27]。

调理过程中,通过添加具有刚性结构或高孔隙率的惰性材料或生物质材料,可在污泥体系中构建骨架支撑,增加污泥固体的机械强度和可渗透性,从

而使其在高压下仍能保持多孔结构,使得水分在压滤过程中可以通过微小的孔隙输出,提高脱水效果^[28],其原理如图1^[29]所示。

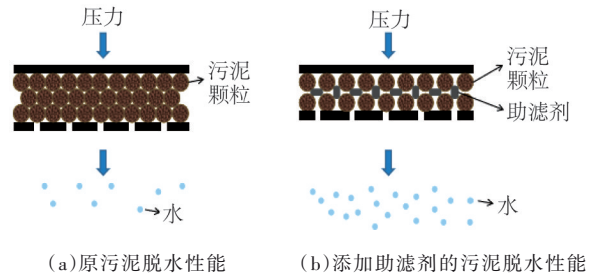


图1 助滤剂在污泥脱水中的骨架构建作用

Fig. 1 Skeleton construction of filter aid in sludge dewatering

除了作为骨架支撑,骨架构建材料也可以通过吸附作用增加污泥絮体密度,从而提升污泥过滤性能。如Qiandi WANG等^[30]采用磷酸铵镁作为骨架颗粒联合高分子絮凝剂调理污泥,磷酸铵镁通过吸附作用增加了污泥絮体密度,提升了污泥的过滤性能(图2)。

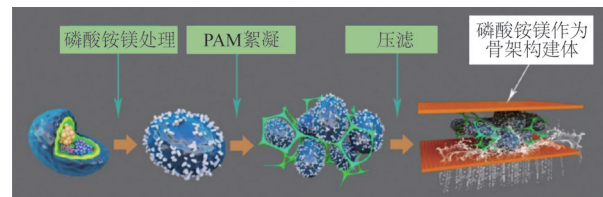


图2 骨架助凝剂与有机高分子絮凝剂联合调理强化脱水的机理

Fig. 2 Mechanism of enhanced dewatering by the combined conditioning of skeleton coagulant aid and organic polymer flocculant

除此之外,当采用多孔状生物质材料,如污泥炭作为骨架颗粒时,污泥炭不仅仅可作为骨架构建体降低污泥的可压缩系数,还能够通过表面疏水作用吸附具有黏性的蛋白质和腐殖酸类物质,且污泥炭之间还具有桥联作用,能增强污泥结构强度和污泥絮体剪切回复性能,大大提高污泥脱水效果^[8]。Xiaochun ZHANG等^[31]的研究还进一步发现生物质炭材料具有丰富的孔隙结构,可在污泥体内构建排水通道,利用管网效应和层间通道效应提高污泥脱水效率。

2 用于骨架体的生物质材料

2.1 农林废弃物

近年来,越来越多的农林废弃物因具有吸附、助滤、助燃等作用被广泛地应用于污泥脱水研究,如木屑^[32-36]、树叶^[37]、核桃壳^[19,29,38]、稻壳^[18,39-45]、竹

粉^[20,46]、麦秸粉^[21]、秸秆^[21,47-48]等。姚尚安等^[49]、陈斌等^[32]分别采用木屑联合化学调理剂调理污泥,发现泥饼含水率(W_c)均显著降低。谢志勇等^[37]探究了树叶粉作为“物理调理剂”调理污泥脱水的效果,研究表明树叶粉能够在一定程度上改善污泥的脱水性能,当其与化学絮凝剂联合使用时,能够充分发挥协同作用,进一步提高脱水效果。杨艳坤等^[20]采用竹粉作为骨架构建体替代石灰,和阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)及 $FeCl_3$ 协同调理污泥,竹粉的最佳投加量为污泥干固体质量(DS)的30%,CPAM和 $FeCl_3$ 的最佳投加量分别为DS的0.05%和7%,此条件下污泥比阻(SRF)可降低18.6%。Qian WANG等^[48]采用铁粉活化过一硫酸盐(PMS)与秸秆联合调理污泥脱水,在单位总固体悬浮物(TSS)秸秆投加量0.5 g/g、PMS投加量0.15 g/g、 Fe^0 投加量1.5 g/g时,SRF降低76.97%。除上述生物质材料外,因含有硅元素而结构坚硬的稻壳基材料^[50]近年来在污泥脱水方面的研究应用也较多。王茂清等^[40]、吴彦等^[39]、杨艳坤等^[51]、Lei CHEN等^[45]采用稻壳粉为骨架颗粒联合化学调理剂调理污泥均取得了较好的脱水效果。Cheng ZHU等^[18]研究表明,稻壳粉的加入使污泥滤饼具有多孔可渗透性和坚硬的骨架结构,与原污泥相比,泥饼的孔隙率提高了83.53%,可压缩系数降低了28.92%,从而促进了水分的释放。此外,核桃壳主要由纤维素组成,质地坚硬,将其粉碎后可作为骨架颗粒降低泥饼的可压缩性能,从而增强污泥的脱水效果。M. WÓJCIK等^[29]采用核桃壳调理污泥,当核桃壳投加量为DS的200%时,污泥含水率可降低至66%,同样董凌霄等^[38]也采用核桃壳调理污泥,当核桃壳投加量为DS的66.6%时,污泥含水率为63.57%。Jialin LIANG等^[19]采用 $Ca(ClO)_2/FeCl_3$ /核桃壳粉联合调理污泥,泥饼的含水率可低于50%。

2.2 生物质炭

生物质炭是生物质在缺氧条件下经高温热解形成的多孔材料,与生物质原料相比,生物质炭比表面积更大,孔隙结构更发达,吸附能力更强,而且含有丰富的官能团^[11]。目前,用于污泥调理的生物质炭有稻壳炭^[52-54]、稻草炭^[54]、木炭^[33]、麦秸炭^[55]、污泥炭^[24,31,56-59]等。吴彦^[53]采用稻壳生物炭和 $FeCl_3$ 联合调理污泥,结果表明在稻壳生物炭投加量为DS的60%、单位DS的 $FeCl_3$ 投加量为138.09 g/kg的条件下,SRF降低98.11%,污泥

净产率(Y_N)增大23.05倍, W_c 降低21.90%。李菲^[52]采用稻壳生物炭和Fenton试剂联合调理污泥, W_c 较原污泥降低了13.23%,并证实了生物质炭与Fenton试剂存在协同作用。Junyuan GUO等^[54]采用 Fe^{2+} 活化的PMS和稻草生物炭联合调理污泥,在单位DS的PMS投加量为0.6 mmol/g、稻草生物炭投加量为120 mg/g、 Fe^{2+} 和PMS物质的量比为0.6的最佳条件下,标准毛细吸水时间(SCST)和离心减重率(CWR)分别增加到8.74和89.2%, W_c 减少到38.5%。Ning WANG等^[59]、Jiahuan WU等^[24]采用污水厂污泥为原料制备污泥生物质炭调理污泥脱水,也取得了较好的效果。其中Ning WANG等^[59]研究表明单位TSS污泥炭投加量为0.25 g/g时,污泥毛细吸水时间(CST)可由39.5 s·L/g降低至19.7 s·L/g,SRF也由 2.33×10^{13} m/kg降低至 1.64×10^{13} m/kg。S. SEMIYAGA等^[33]用木炭粉调理粪便污泥后,脱水率提高了15.8%,为撒哈拉以南非洲低收入国家城市贫民窟的粪便污泥处理提供了新思路。

2.3 改性生物质材料

污泥表面的羧基及磷酸基团的水解和电离作用使得污泥絮体表面带有负电荷,其表面Zeta电位通常在-30 mV至-10 mV之间,且表面电负性越强,污泥颗粒之间静电斥力就越强,污泥也就越稳定。为了提高生物质材料调理污泥脱水的效果,研究者采用 $FeCl_3$ 或 $AlCl_3$ 对材料表面进行改性,经改性后,炭表面均带有正电荷,它们能与带负电荷的污泥颗粒通过电荷中和和作用聚集,破坏污泥絮体的稳定性,促进污泥脱水^[22-23,50,53,60]。如Yan WU等^[22]采用 $FeCl_3$ 改性稻壳炭(投加量为DS的60%)调理污泥,SRF和 W_c 分别降低了97.9%和19.36%,较投加未改性稻壳炭处理效果分别提高56.8%和17.3%。郭俊元等^[60]采用经 $AlCl_3$ 改性的玉米秸秆生物炭调理污泥,SRF较原污泥降低了90.58%。此外,研究表明比表面积大、孔隙率高的骨架材料可以吸收和容纳更多的水分,并更易吸附EPS碎片、蛋白质、腐殖酸类等物质,同时,其多孔性还利于构建过水通道提高污泥过水效率^[8,31]。同帆等^[61-62]采用酸、碱对炭材料进行改性。其中,同帆等^[61]分别采用酸和酸碱交替改性活性炭,经2种方式改性的活性炭调理后污泥CST均不同程度减小,且酸碱交替改性活性炭比表面积从原炭的783.83 m²/g增加到1403.18 m²/g,总孔容和微孔容也都有所提升,同时部分微孔和中孔分别扩展至中孔

和大孔,较大的比表面积和孔容可以增强其吸附性能,增加其滤水通道,提高污泥脱水效果。此外,Zhiying GUO等^[63]探究了碱和阳离子表面活性剂共同对玉米芯粉改性调理污泥的效果,发现经氢氧化钠和溴化十六烷基三甲胺改性的玉米芯粉能破坏胞外聚合物和细胞膜的结构,从而提高污泥的脱水性能,添加改性玉米芯粉为DS的20%可使污泥含水率降低40%,SRF降低55%。

3 影响污泥脱水的因素

生物质材料作为骨架颗粒调理污泥脱水的效果主要受其投加量、粒径以及投加顺序等因素影响。

3.1 生物质材料的投加量

投加量是影响生物质材料调理污泥脱水的一个关键因素,在污泥调理过程中一般存在一个最佳值,且不同的生物质材料在不同的联用方式下最佳投加量也有所区别。在一定范围内,随着生物质投加量的增加,污泥的脱水性能逐渐增强。这主要是因为投加的生物质越多,其在污泥中的分布越均匀,越能够形成有利于水分脱除的多孔隙结构^[34]。但生物质材料的投加量超过一定范围后,不仅不能达到更好的调理效果,反而会使泥饼质量增大过多。高雯等^[36]用臭氧-超声与松木屑联合调理污泥,当污泥与松木屑的质量比为1:3.5时,污泥含水率达到最低77.1%,SRF也达到最小($5.19 \times 10^9 \text{ s}^2/\text{g}$),在此基础上增加松木屑投加量,含水率与SRF反而增大。陈斌等^[32]提出因为木屑本身吸水,且吸收的水分难以脱除,投加过多的木屑会使能脱除的水分减少,因此含水率下降不明显,而且随着木屑投加量增加,泥饼质量增长幅度越来越大。熊巧^[42]也提出加入过多的稻壳粉反而影响污泥絮体的团聚沉降,稻壳粉与过硫酸钠协同调理污泥,单位DS的稻壳粉投加量少于333 mg/g时,CST与 W_c 的降低率随稻壳粉投加量增加而增加,当投加量多于333 mg/g时,CST和 W_c 反而升高。Junyuan GUO等^[54]采用稻草生物炭联合二价铁活化的PMS调理污泥脱水,单位挥发性固体(VS)的稻草生物炭最佳用量为120 mg/g;李菲^[52]用稻壳生物炭协同Fenton调理污泥,单位DS投加稻壳炭500 mg/g时效果最好;Yan WU等^[22]和Junyuan GUO等^[23]分别用 FeCl_3 和 AlCl_3 改性的稻壳炭和秸秆炭调理污泥,最佳投加量分别为DS的60%和30%,调理过程中,生物质材料投加量过多或过少都会对调理

效果产生负面影响。综合以上结果发现,不同生物质材料调理污泥时的最佳用量并不统一,需根据实际处理要求进行优化^[64]。

3.2 生物质材料的粒径

粒径的大小和均匀程度是影响生物质材料调理污泥脱水效果的又一重要因素。粒径较大的生物质由于体积大、质量轻,容易漂浮在污泥表面,不能与污泥均匀混合,降低了其在污泥中的支撑作用;而粒径过小的生物质不仅不能起到骨架支撑的作用,反而会堵塞污泥中的孔隙,使水分难以脱除^[53]。此外粒径越均匀越好,因为当粒径大小差异较大时,较小的颗粒将移动到较大的颗粒之间的空隙中,滤饼孔隙率会随之降低^[65]。但不同的生物质材料在调理污泥时最佳粒径范围并不完全一致。例如,吴彦等^[53]采用稻壳粉调理污泥时,研究表明最佳粒径范围为109~150 μm ,而侯海攀^[66]的实验结果表明300~500 μm 粒径的生物质粉末调理污泥后SRF降低最多;林霞亮^[67]采用粒径分别为<0.15、<0.3、<0.9、<2.0 mm的木屑粉末调理污泥,结果表明经粒径<0.15 mm的木屑粉末调理后,SRF降幅最大,污泥净产率增幅最大;Cheng ZHU等^[18]采用超声-CPAM-稻壳调理污泥时,稻壳的粒径分别取60目(250 μm)、80目(180 μm)、110目(130 μm),结果表明110目的稻壳对污泥的调理效果最好。

3.3 投加顺序

生物质材料与化学调理剂联用时,药剂的投加顺序对污泥的调理效果有一定的影响。采用联合调理时,大多数文献采用先投加絮凝剂,后投加骨架构建体的方式进行调理^[42]。但最新研究表明,当骨架颗粒和絮凝剂联合应用时,先投加骨架颗粒后投加絮凝剂的污泥脱水效果更好。如王茂清等^[40]将投加顺序分为3类,即先投加稻壳粉再投加CPAM、先投加CPAM再投加稻壳粉、同时投加,结果表明第一种情况污泥的脱水效果最佳。吴彦^[53]研究了生物质炭、高锰酸钾和 FeCl_3 联合调理污泥时投加顺序的影响,结果表明在先投加高锰酸钾破解污泥EPS,再投加生物质炭,使其混合均匀后投加 FeCl_3 进行絮凝的操作方式下污泥脱水效果最好。以上结果均表明,生物质骨架材料先于絮凝剂投加时效果较好,这是因为骨架颗粒先与污泥混合均匀能更好地在污泥内部形成骨架支撑,然后加入絮凝剂促进污泥团聚

脱稳,从而有效提高污泥的脱水性能。而当先投加絮凝剂后投加骨架颗粒或两者同时投加时,污泥先进行絮凝团聚,使得骨架颗粒不能在污泥内部充分均匀混合,从而起不到改善污泥微观结构的作用。

4 生物质材料在污泥调理中的其他作用

4.1 对污泥中重金属浸出的影响

污泥中的重金属对环境的影响较大,生物质材料的加入可以降低重金属的含量,这一方面是因为其对重金属具有固定作用,另一方面归因于“稀释效应”,即生物质材料本身不含重金属或重金属含量很低,添加到污泥中后会产生稀释的效果,降低重金属在污泥中的比例^[52]。Changgeng LIU^[43]通过钒钛磁铁矿活化的过硫酸盐和稻壳调理污泥,污泥中铜、锌、铬、铅的浸出毒性分别下降78%、83%、60%、100%,而且污泥中重金属的化学形态分布发生了改变,转化为了更稳定的形态,减少了重金属对环境的危害。熊巧^[42]采用活化过硫酸盐联合稻壳粉调理污泥,发现经过活化过硫酸盐调理后,铜、钡、镉、锌、铬的浸出率显著降低,加入稻壳粉复合调理后,浸出率进一步降低,最终铜、钡、镉、锌、铬的浸出率分别降低了4.35%、3.14%、39.43%、11.54%、1.72%。这是因为,稻壳粉本身对重金属具有稳定化作用,其内部存在的离子能与重金属离子形成稳定的化合物以阻止重金属离子浸出。Junyuan GUO等^[54]采用 Fe^{2+} 活化的过硫酸盐与稻草生物炭共同处理污泥,铜、锌、镉和铬的浸出毒性降低率分别可以达到88.0%、80.7%、70.5%和72.8%,几乎没有检出铅。吴彦^[53]采用三氯化铁和稻壳生物炭调理污泥时,滤液中锌和镉质量浓度可分别由1.597、0.004 mg/L降至0.04、0.001 mg/L。李菲^[52]研究发现生物炭调理污泥的重金属去除效果与其浓度正相关,认为除了生物炭本身对重金属的稀释作用外,生物炭表面丰富的官能团如羟基、羧基、芳香基等也可以与污泥中的重金属发生反应,生物炭协同Fenton调理污泥时,镉、铬、镍、铅、锌、铜等重金属含量均满足污泥农用标准。

4.2 对污泥滤液的影响

因为污水处理厂的污泥脱水后产生的滤液需要重新返回污水处理系统进行处理,因此滤液浊度、溶解性化学需氧量(SCOD)和氨氮等对后续的处理有一定的影响。部分研究表明加入生物质材料后滤液浊度会上升^[67],主要是因为个别生物质材料(如木

屑粉末)不均匀系数大,较大的颗粒在污泥中支撑起较大的孔隙,而细小颗粒透过孔隙进入滤液,使浊度上升。但一般来说生物质材料调理污泥对改善污泥滤液的水质有积极的作用。Shuo WANG等^[46]研究表明,添加竹粉后,滤液的总氮、总磷分别由36.8、1 mg/L降至30.4、0.2 mg/L,添加稻壳粉后,滤液的总氮、总磷分别降至29.5、0.1 mg/L。吴彦^[53]指出投加适量的稻壳粉能有效降低污泥滤液的浊度和SCOD,这可能是由于稻壳粉具有吸附作用。当与三氯化铁联用,稻壳粉为最佳投加量(DS的70%)时,污泥滤液浊度和SCOD分别由297.87 NTU和528 mg/L降至23.87 NTU和396 mg/L;而用三氯化铁和稻壳生物炭(DS的60%)调理污泥时,滤液浊度和SCOD分别降至17.86 NTU和347 mg/L,说明稻壳生物炭对滤液水质的改善作用优于稻壳粉,可能是因为生物质原料制成生物炭后,比表面积和孔容都增大,吸附性能也更好^[68]。Yan WU等^[50]研究发现,污泥脱水性能最佳时生物质材料的投加量与对滤液水质改善作用最好时的投加量并不一致,污泥滤液浊度和SCOD随着污泥生物炭用量的增加而迅速降低,水质改善的最佳投加量为DS的50%,此时滤液浊度和SCOD分别达到最低值11.2 NTU和197.8 mg/L,而污泥脱水性能最佳时的投加量为DS的70%,此时滤液浊度和SCOD分别升至15.8 NTU和214.2 mg/L。

4.3 对后续处理的影响

在碳中和背景下,相较于传统的矿物调理剂,生物质材料在污泥后续处置方面更具优势。生物质材料多为多孔结构,且热值较高、灰分较低,经其处理后有利于污泥的后续干化、焚烧、堆肥及资源化应用等。研究表明,经生物质材料调理后的污泥干化效果较好,这一方面是因为添加生物质材料后,泥饼结构较为疏松、多孔^[67],另一方面生物质的加入可以增强调质污泥的热导率,提高热传递能力,且促进强结合水(表面结合水和内部结合水)向弱结合水(间隙水)的转化^[69],这均有利于污泥的干化。Hongbo LIU等^[34]提出采用木屑调理污泥可以促进污泥的自然干化,经过36 h的风干处理,污泥饼的含水率可由脱水后的66.4%进一步降低到31.6%,调理后污泥热值达9 372.12 J/g。同时,李菲^[52]的研究表明经生物炭和Fenton联合调理后的污泥干化效果优于其他方法处理后的效果,单位DS添加500 mg/g生物炭的

污泥堆体生物干化第6天含水率降至58.51%,可以满足后续污泥处理处置的需求。

生物质材料的高热值特性使得经其调理后的泥饼热值也变高,从而有利于后续焚烧处置^[51]。Zhiying GUO等^[63]指出玉米芯平均热值高达14 000 J/g,而且有良好的生物降解性,在污泥脱水中使用玉米芯不会对污泥的处理产生不利影响。Qian WANG等^[48]研究表明,采用秸秆联合活化过一硫酸盐调理污泥脱水时,污泥热值可达8.08 kJ/g。杨艳坤^[20]的研究表明用竹粉调理污泥时,当竹粉投加量为DS的30%时,脱水后的污泥饼有机物质量分数达到65.6%,远远高于生石灰调理后泥饼中有机物质量分数(44.9%),每千克竹粉深度脱水产生的污泥热值(13 793 kJ)比传统深度脱水产生的污泥热值(9 804 kJ)平均高出3 989 kJ,可降低污泥焚烧处置的运行成本,还可实现热能循环,做到资源利用的最大化。除此之外,生物质材料含有丰富的营养元素、发达的孔隙结构和较大的比表面积,可提高城市污泥堆肥效率,降低堆肥产品中重金属的生物有效性^[70-71],且其高有机质含量和热值也可用于污泥生物质炭及其他生物质燃料的制备与利用,以实现污泥资源及能源的回收。

5 展望

在碳中和背景下,未来污泥处理处置应以节能降耗及资源能源回收为目标,而实现这一目标的关键是实现污泥水分的深度去除。生物质材料尤其是生物质废弃物在我国来源广,将其用于污泥调理不仅可以有效降低污泥含水率、促进污泥干化、提高泥饼热值,还可以实现生物质废弃物的资源化利用,减少碳排放量,且其在调理污泥脱水的同时还可吸附重金属,改善滤液水质,表现出巨大的应用潜力。今后关于生物质材料在污泥调理中的应用可以从以下方面进行研究:

(1) 鉴于生物质材料本身调理污泥脱水效果的有限性,可以考虑更多的生物质材料的改性方法,更大程度增强其调理效果。

(2) 寻找更多的联用方法,探究不同的生物质材料采用何种联用方式能达到最好的污泥调理效果。

(3) 将生物质调理与污泥干化、污泥焚烧、污泥堆肥相结合,研究生物质材料调理对后续污泥资源化利用的影响,以推动其在实际工程中的应用。

参考文献

- [1] 戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势[J]. 科学, 2020, 72(6): 30-34.
DAI Xiaohu. Applications and perspectives of sludge treatment and disposal in China[J]. Science, 2020, 72(6): 30-34.
- [2] 辛广智. 剩余污泥减量化与资源化研究进展[J]. 四川化工, 2019, 22(1): 17-19.
XIN Guangzhi. The research progress on reduction and recycling of excess activated sludge[J]. Sichuan Chemical Industry, 2019, 22(1): 17-19.
- [3] 甄广印, 吴太朴, 陆雪琴, 等. 高级氧化污泥深度脱水技术研究进展[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(9): 1108-1113.
ZHEN Guangyin, WU Taipu, LU Xueqin, et al. A review on advanced oxidation processes for enhancing sewage sludge dewatering[J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(9): 1108-1113.
- [4] 徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 等. 活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4202-4207.
XU Xin, PU Wenhong, SHI Yafei, et al. Influence of the application of activated persulfate on municipal sludge conditioning[J]. Environmental Science, 2015, 36(11): 4202-4207.
- [5] MENON U, SURESH N, GEORGE G, et al. A study on combined effect of Fenton and Free Nitrous Acid treatment on sludge dewaterability with ultrasonic assistance: Preliminary investigation on improved calorific value[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 382: 123035.
- [6] 戴晓虎, 张辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J]. 给水排水, 2021, 57(3): 1-5.
DAI Xiaohu, ZHANG Chen, ZHANG Linwei, et al. Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(3): 1-5.
- [7] WEI Hua, GAO Boqiang, REN Jie, et al. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review[J]. Water Research, 2018, 143: 608-631.
- [8] CAO Bingdi, ZHANG Tao, ZHANG Weijun, et al. Enhanced technology based for sewage sludge deep dewatering: A critical review[J]. Water Research, 2021, 189: 116650.
- [9] 巩小丽, 陈煜, 杜瑛娜, 等. Fenton试剂调理污泥的研究进展[J]. 环境工程, 2018, 36(8): 107-112.
GONG Xiaoli, CHEN Yu, DU Yingna, et al. Advances in conditioning of sludge by Fenton reagent[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(8): 107-112.
- [10] 陈丹丹, 窦昱昊, 卢平, 等. 污泥深度脱水技术研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(10): 4722-4746.
CHEN Dandan, DOU Yuhao, LU Ping, et al. A review on sludge deep dewatering technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(10): 4722-4746.
- [11] LIU Huan, YANG Jiakuan, ZHU Nairuo, et al. A comprehensive insight into the combined effects of Fenton's reagent and skeleton

- builders on sludge deep dewatering performance [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 258/259: 144-150.
- [12] 刘蕾, 李亚林, 刘旭, 等. 过硫酸盐-骨架构建体对污泥脱水性能的影响[J]. *广州化工*, 2017, 45(8): 73-76.
- LIU Lei, LI Yalin, LIU Xu, et al. Effect of persulfate and skeleton builder on sludge dewaterability [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2017, 45(8): 73-76.
- [13] 刘强, 陈晓欢, 傅金祥, 等. 粉煤灰与生石灰复合调理剂对市政污泥深度脱水性能的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(7): 3468-3472.
- LIU Qiang, CHEN Xiaohuan, FU Jinxiang, et al. Effect of fly ash combined quicklime composite conditioners on dewatering of sewage sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(7): 3468-3472.
- [14] DAI Quxiu, MA Liping, REN Nanqi, et al. Investigation on extracellular polymeric substances, sludge flocs morphology, bound water release and dewatering performance of sewage sludge under pretreatment with modified phosphogypsum [J]. *Water Research*, 2018, 142: 337-346.
- [15] 徐欢. 污泥调质与机械脱水实验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017.
- XU Huan. Research on sludge conditioning and mechanical dewatering [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2017.
- [16] 李澜. 壳聚糖、硅藻土及过硫酸盐联合调理市政污泥研究[D]. 成都: 西华大学, 2017.
- LI Lan. Study on combined conditioning municipal sludge with chitosan, diatomite and persulfate [D]. Chengdu: Xihua University, 2017.
- [17] 李亚林, 刘蕾, 李钢, 等. 基于 Fenton 高级氧化-骨架构建体的污泥深度脱水研究[J]. *水处理技术*, 2016, 42(5): 69-71.
- LI Yalin, LIU Lei, LI Gang, et al. Research on sewage sludge deep-dewatering by conditioning with combining Fenton advanced oxidation and skeleton builders [J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(5): 69-71.
- [18] ZHU Cheng, ZHANG Panyue, WANG Hongjie, et al. Conditioning of sewage sludge via combined ultrasonication-flocculation-skeleton building to improve sludge dewaterability [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 40: 353-360.
- [19] LIANG Jialin, HUANG Jinjia, ZHANG Siwei, et al. A highly efficient conditioning process to improve sludge dewaterability by combining calcium hypochlorite oxidation, ferric coagulant re-flocculation, and walnut shell skeleton construction [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 361: 1462-1478.
- [20] 杨艳坤, 李激, 陈晓光, 等. 竹粉骨架构建体对污泥脱水性能的影响[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(19): 63-67.
- YANG Yankun, LI Ji, CHEN Xiaoguang, et al. Effects of using bamboo powder as skeleton builder on sludge dewatering process [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(19): 63-67.
- [21] GUO Shaocong, LIANG Heng, BAI Langming, et al. Synergistic effects of wheat straw powder and persulfate/Fe(II) on enhancing sludge dewaterability [J]. *Chemosphere*, 2019, 215: 333-341.
- [22] WU Yan, ZHANG Panyue, ZHANG Haibo, et al. Possibility of sludge conditioning and dewatering with rice husk biochar modified by ferric chloride [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 205: 258-263.
- [23] GUO Junyuan, JIANG Shilin, PANG Yujie. 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.
- [24] WU Jiahuan, LU Tao, BI Jingwang, et al. A novel sewage sludge biochar and ferrate synergetic conditioning for enhancing sludge dewaterability [J]. *Chemosphere*, 2019, 237: 124339.
- [25] DING Dahu, LIU Chao, JI Yuefei, et al. Mechanism insight of degradation of norfloxacin by magnetite nanoparticles activated persulfate: Identification of radicals and degradation pathway [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 308: 330-339.
- [26] 梁花梅. 硫酸自由基高级氧化技术在污泥处理中的应用研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2012.
- LIANG Huamei. Research on sludge treatment with advanced oxidation technology based on sulfate radicals [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2012.
- [27] COLLARD M, TEYCHENÉ B, LEMÉE L. Comparison of three different wastewater sludge and their respective drying processes: Solar, thermal and reed beds—Impact on organic matter characteristics [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 203: 760-767.
- [28] QI Ying, 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.
- [29] WÓJCIK M. Investigation of filtration properties and microbiological characteristics of sewage sludge after physical conditioning with the use of ground walnut shells [J]. *Powder Technology*, 2020, 361: 491-498.
- [30] WANG Qiandi, ZHANG Weijun, YANG Zhaoyi, et al. Enhancement of anaerobic digestion sludge dewatering performance using in situ crystallization in combination with cationic organic polymers flocculation [J]. *Water Research*, 2018, 146: 19-29.
- [31] ZHANG Xiaochun, KANG Huashan, ZHANG Qingrui, et al. The porous structure effects of skeleton builders in sustainable sludge dewatering process [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 230: 14-20.
- [32] 陈斌, 高华生, 季文杰, 等. 木屑对印染污泥过滤脱水的调理作用及其机理研究[J]. *宁波大学学报: 理工版*, 2018, 31(5): 109-114.
- CHEN Bin, GAO Huasheng, JI Wenjie, et al. Effect of sawdust and its conditioning mechanism on filtration dewatering of textile wastewater sludge [J]. *Journal of Ningbo University: Natural Science & Engineering Edition*, 2018, 31(5): 109-114.

- [33] SEMIYAGA S, OKURE M A E, NIWAGABA C B, et al. Enhancing faecal sludge dewaterability and end-use by conditioning with sawdust and charcoal dust[J]. *Environmental Technology*, 2018, 39(3):327-335.
- [34] LIU Hongbo, XIAO Hang, FU Bo, et al. Feasibility of sludge deep-dewatering with sawdust conditioning for incineration disposal without energy input[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 313:655-662.
- [35] 罗海健. 助滤剂(污泥焚烧底渣、木屑)对工业污泥脱水性能的影响研究[D]. 广州:广东工业大学, 2013.
- LUO Haijian. Effects of filtration aids (sludge incineration slag, sawdust) on industrial sludge dewaterability [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.
- [36] 高雯, 张凤娥, 董良飞, 等. 臭氧、超声与生物质组合调理污泥脱水性能研究[J]. *常州大学学报:自然科学版*, 2016, 28(1):78-82.
- GAO Wen, ZHANG Fenge, DONG Liangfei, et al. Study on the sludge dewatering with ozone, ultrasound, biomass and their combination process[J]. *Journal of Changzhou University: Natural Science Edition*, 2016, 28(1):78-82.
- [37] 谢志勇, 高惠穗, 王鸿辉. 树叶粉对污泥脱水性能的影响研究[J]. *化学工程师*, 2019, 33(8):33-36.
- XIE Zhiyong, GAO Huisui, WANG Honghui. Study on the influence of leaf powder on sludge dewatering performances[J]. *Chemical Engineer*, 2019, 33(8):33-36.
- [38] 董凌霄, 丁绍兰, 谢林花, 等. 核桃壳骨架构建剂对污泥脱水性能的影响[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(1):365-369.
- DONG Lingxiao, DING Shaolan, XIE Linhua, et al. Walnut shell used as skeleton builder for improving sludge dewatering properties[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(1):365-369.
- [39] 吴彦, 平巍, 王翔, 等. 稻壳粉添加剂提高污泥的脱水效果研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2):229-234.
- WU Yan, PING Wei, WANG Xiang, et al. Study on dewatering effect of sewage sludge by adding rice husk flour[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(2):229-234.
- [40] 王茂清, 钟银海, 蓝巧娟, 等. 阳离子聚丙烯酰胺联合稻壳粉调理城市污泥脱水研究[J]. *三峡生态环境监测*, 2018, 3(1):27-31.
- WANG Maoqing, ZHONG Yinhai, LAN Qiaojuan, et al. Effect of cationic polyacrylamide combined with rice husk flour on sludge conditioning and dewatering[J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2018, 3(1):27-31.
- [41] XIONG Qiao, ZHOU Min, LIU Mengjia, et al. The transformation behaviors of heavy metals and dewaterability of sewage sludge during the dual conditioning with Fe^{2+} -sodium persulfate oxidation and rice husk[J]. *Chemosphere*, 2018, 208:93-100.
- [42] 熊巧. 活化过硫酸盐-生物质复合调理污泥脱水性能与机理研究[D]. 武汉:武汉大学, 2018.
- XIONG Qiao. Study on the dewatering performance and mechanism of sewage sludge conditioned by activated persulfate and biomass[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [43] LIU Changgeng. Enhancement of dewaterability and heavy metals solubilization of waste activated sludge conditioned by natural vanadium-titanium magnetite-activated peroxymonosulfate oxidation with rice husk[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 359:217-224.
- [44] HUANG Zaichun, LIU Changgeng, ZHU Xuejun, et al. Behaviors of dewaterability and heavy metals of wasteactivated sludge conditioned by heat-activated peroxymonosulfate oxidation[J]. *Chemical Papers*, 2020, 74(2):641-650.
- [45] CHEN Lei, XIONG Qiao, LI He, et al. Enhancement of the sewage sludge dewaterability by using ethanol and $\text{Fe}(\text{III})$ -rice husk[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(8):8696-8706.
- [46] 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.
- [47] 郭绍东. 农业生物质对改善污泥脱水性能的影响及其机制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- GUO Shaodong. Efficiency and mechanism of agricultural biomass on improving sludge dewaterability [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [48] WANG Qian, SONG Lei, HUI Kai, et al. Iron powder activated peroxymonosulfate combined with waste straw to improve sludge dewaterability [J]. *Environmental Technology*, 2021, 42(8):1302-1311.
- [49] 姚尚安, 孙同华, 瞿赞, 等. 污泥深度机械脱水的优化研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(3):126-131.
- YAO Shang'an, SUN Tonghua, QU Zan, et al. Optimization research of mechanical dewatering of sludge with high pressure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(3):126-131.
- [50] WU Yan, ZHANG Panyue, ZENG Guangming, 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.
- [51] 杨艳坤, 李激, 陈晓光, 等. 稻壳粉调理对污泥脱水性能及脱水液水质的影响[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(13):113-118.
- YANG Yankun, LI Ji, CHEN Xiaoguang, et al. Effect of rice hull powder conditioning on sludge dewatering process and filtrate quality[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(13):113-118.
- [52] 李菲. 生物炭协同Fenton氧化技术对污泥脱水及资源化性能影响研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
- LI Fei. Study on sludge dewaterability and utilization by combination of biochar and Fenton oxidation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [53] 吴彦. 稻壳基骨架颗粒制备及调理城市污泥脱水作用和机理分析[D]. 长沙:湖南大学, 2016.

- WU Yan. Preparation of rice husk-based skeleton builders and their effects and mechanisms on sewage sludge conditioning and dewatering[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [54] GUO Junyuan, ZHOU Yuling. Transformation of heavy metals and dewaterability of waste activated sludge during the conditioning by Fe^{2+} -activated peroxymonosulfate oxidation combined with rice straw biochar as skeleton builder[J]. Chemosphere, 2020, 238: 124628.
- [55] GUO Junyuan, GAO Qifan, JIANG Shilin. Insight into dewatering behavior and heavy metals transformation during waste activated sludge treatment by thermally-activated sodium persulfate oxidation combined with a skeleton builder—Wheat straw biochar[J]. Chemosphere, 2020, 252: 126542.
- [56] 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 Jiangwei. Study on enhancing dewaterability of sewage sludge by synergistic conditioning of ozone and zero-valent iron/iron-based biochar[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [57] WU Yan, ZHANG Panyue, ZENG Guangming, et al. Combined sludge conditioning of micro-disintegration, floc reconstruction and skeleton building ($\text{KMnO}_4/\text{FeCl}_3/\text{Biochar}$) for enhancement of waste activated sludge dewaterability[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017, 74: 121–128.
- [58] 李海明, 苑辉, 陈剑, 等. 污泥炭调理剂用于污泥脱水实验的探究[J]. 再生资源与循环经济, 2019, 12(5): 38–40.
- LI Haiming, YUAN Hui, CHEN Jian, et al. Exploration of biochar-coal conditioner used in sludge dewatering experiment[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2019, 12(5): 38–40.
- [59] WANG Ning, ZHANG Weijun, CAO Bingdi, et al. Advanced anaerobic digested sludge dewaterability enhancement using sludge based activated carbon (SBAC) in combination with organic polymers[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 350: 660–672.
- [60] 郭俊元, 文小英, 羊润锦, 等. 玉米秸秆生物炭改善污泥脱水性能[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3316–3322.
- GUO Junyuan, WEN Xiaoying, YANG Runjin, et al. Preparation of corn stalks biochar and improvement of dewatering performance of sludge[J]. China Environmental Science, 2019, 39(8): 3316–3322.
- [61] 同帆, 王瑞露, 曹秉帝, 等. 炭材料调理改善活性污泥脱水性能的影响机制[J]. 环境工程学报, 2018, 12(7): 2094–2105.
- TONG Zhi, WANG Ruilu, CAO Bingdi, et al. Mechanism of carbon conditioning for improving dewatering performance of activated sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(7): 2094–2105.
- [62] 王瑞露. 炭类材料对污泥电渗脱水及其性能的影响研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2019.
- WANG Ruilu. Effect of carbon materials on sludge electro-osmotic dewatering and its performance[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2019.
- [63] GUO Zhiying, MA Liping, DAI Quxiu, et al. Dewatering performance of sewage sludge under pretreatment with modified corn-core powder[J]. Science of the Total Environment, 2019, 684: 402–412.
- [64] 董凌霄, 丁绍兰, 谢林花, 等. 核桃壳添加改善污泥压缩性能研究[J]. 陕西科技大学学报: 自然科学版, 2016, 34(4): 26–30.
- DONG Lingxiao, DING Shaolan, XIE Linhua, et al. Walnut shell aided to improve sludge compressibility[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2016, 34(4): 26–30.
- [65] ZHAO Song, ZHOU Xiehong, WANG Chuanyi, et al. Dewatering and low-temperature pyrolysis of oily sludge in the presence of various agricultural biomasses[J]. Environmental Technology, 2018, 39(21): 2715–2723.
- [66] 侯海攀. 有机复合调理剂对生活污泥脱水性能的影响研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- HOU Haipan. Study on effect of complex organic conditioners on sewage sludge dewatering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [67] 林霞亮. 壳聚糖复合调理剂改善污泥脱水性能的试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- LIN Xiaoliang. Experimental study on effect of complex chitosan conditioners on sewage sludge dewatering[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [68] 谭小飞, 刘云国, 曾光明, 等. 生物炭材料及其在水体中污染物去除领域的应用[J]. 科学观察, 2019, 14(6): 44–46.
- TAN Xiaofei, LIU Yunguo, ZENG Guangming, et al. Biochar materials and their applications in pollutants removal from water[J]. Science Focus, 2019, 14(6): 44–46.
- [69] WANG Teng, XUE Yongjie, HAO Rong, et al. Mechanism investigations into the effect of rice husk and wood sawdust conditioning on sewage sludge thermal drying[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 239: 316–323.
- [70] 张龙龙, 王大伟. 添加生物炭的城镇污泥堆肥快速启动及保氮效果研究[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2020, 41(5): 91–96.
- ZHANG Longlong, WANG Dawei. Study on the rapid start-up and nitrogen conservation effect of municipal sludge composting with biochar[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2020, 41(5): 91–96.
- [71] 郭炜, 于洪久, 李玉梅, 等. 生物质炭在城市污泥好氧堆肥中的研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2016(3): 147–150.
- GUO Wei, YU Hongjiu, LI Yumei, et al. Research progress of biomass charcoal in aerobic composting of sewage sludge[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(3): 147–150.
- 【作者简介】 张彦平(1978—), 博士研究生, 副教授. E-mail: zyphit@163.com.
- 【收稿日期】 2022-02-22(修改稿)