

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.09.014

沸石/超声强化污泥脱水 and 好氧堆肥效能研究

杨亚红^{1,2}, 马鹏锦^{1,2}, 杨兴峰¹, 王亚军¹, 蔚阳³, 杨期勇⁴

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 温州泵阀工程研究院, 浙江 温州 325105; 3. 清华大学 深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055; 4. 九江学院 化学化工学院, 江西 九江 332005)

摘要: 将超声波破解与沸石骨架构建两种方式联合起来调理污泥,探究其脱水效果及机理,再将超声、沸石及联合调理后的脱水污泥进行好氧堆肥,分析不同调理方式对堆肥效能的影响。脱水实验结果表明,超声与沸石联合调理具有协同效应,可显著提高污泥脱水性能,且先沸石后超声效果更优。堆肥实验结果表明,3种脱水污泥均可正常堆肥,通过分析含水率、有机质、TOC、氮、磷、钾、重金属和种子发芽指数(GI)等因素发现,联合调理可加快污泥好氧堆肥腐熟进度,并得到重金属含量最低、GI最高的无毒害产品。可见,该联合工艺具有一定的推广应用价值。

关键词: 沸石; 超声波; 污泥; 脱水性能; 好氧堆肥; 调理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)09-0084-07

Zeolite and Ultrasonic Wave for Enhancing Sludge Dewaterability and Aerobic Composting Efficiency

YANG Ya-hong^{1,2}, MA Peng-jin^{1,2}, YANG Xing-feng¹, WANG Ya-jun¹, YU Yang³,
YANG Qi-yong⁴

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Wenzhou Engineering Institute of Pump & Valve, Lanzhou University of Technology, Wenzhou
325105, China; 3. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen
518055, China; 4. School of Chemistry and Chemical Engineering, Jiujiang University, Jiujiang
332005, China)

Abstract: This paper combined ultrasonic wave cracked sludge and zeolite as the skeleton constructor to condition sludge, explored the dewatering performance and related mechanism, composted the dewatered sludge aerobically conditioned by three methods (ultrasonic wave, zeolite and ultrasonic wave combined with zeolite), and investigated the effect of different conditioning methods on the aerobic composting efficiency. The dewatering test results showed that the combined condition of ultrasonic wave and zeolite had a synergistic effect, which could significantly improve the sludge dewatering performance, and the first zeolite condition followed by ultrasonic wave showed a better performance. The composting

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(22JR5RA254); 温州社会发展基础科技项目(S20220010); 甘肃省教育厅研究生“创新之星”项目(2023CXZX-461); 甘肃省建设科技攻关项目(JK2022-19); 国家自然科学基金资助项目(22066012)

通信作者: 杨亚红 E-mail: yangyahong@lut.edu.cn

test results showed that the three types of dewatered sludge could be composted normally. The analysis of the moisture content, organic matter, TOC, nitrogen, phosphorus, potassium, heavy metal content and seed germination index (GI) and other factors showed that the combined conditioning method accelerated the maturity of aerobic sludge composting, and thus the non-toxic products with the lowest heavy metal content and the highest GI were obtained. Therefore, the combined process demonstrated certain application prospect.

Key words: zeolite; ultrasonic wave; sludge; dewatering performance; aerobic composting; condition

“十四五”提出要破解污泥处置难点,实现污泥无害化,推进其资源化,鼓励采用好氧发酵的方式进行无害化处理。污泥好氧堆肥时,其与辅料组成的混合物料含水率要达到50%~60%^[1],故降低污泥含水率是关键。由胞外聚合物(EPS)包裹的污泥菌胶团结构具有亲水性强、可压缩性高等特点,阻碍了污泥脱水。目前污泥脱水主要是通过投加聚丙烯酰胺(PAM)调理,再进行机械脱水,但污泥含水率只能降至80%左右^[2],且有研究表明PAM具有微毒性^[3-5],对于后续堆肥过程中的微生物活动具有抑制作用。超声波是一种绿色、清洁的高级氧化技术,研究发现低强度超声波可以改善污泥脱水性能,这是由于超声波产生的空化效应能破解污泥絮体结构,释放部分结合水^[6]。郑西朋等^[7]发现,经超声预处理的污泥在堆肥过程中有机物的分解效率更高,能够更快进入高温期。

为解决污泥高压缩性问题,有研究发现向污泥中添加物理调理剂(石灰、粉煤灰、生物炭等)可以形成骨架结构^[8-11],能够有效降低污泥的可压缩性,形成透水通道,提高污泥的滤水效率。沸石具有架状晶体结构,可作为骨架提高污泥的脱水性能。黄显浪等^[12]探索了改性斜发沸石调理污泥的效果,结果发现该改性沸石是通过吸附架桥和电性中和作用在污泥中构建骨架,使污泥在高压下保持多孔排水通道。

综上所述,超声波与沸石调理均可提高污泥的脱水性能。然而关于超声波与沸石联合调理污泥的研究鲜有报道,故笔者探究了二者联合进一步提高污泥脱水性能的可行性,着重研究单独超声波或沸石以及联合调理3种调理方式对于后续污泥好氧堆肥效能的影响,旨在为污泥的绿色、高效处理提供参考。

1 材料和方法

1.1 实验材料

实验污泥采自兰州市某污水处理厂回流污泥,该厂处理规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用A²O工艺。所取污泥样品需在4℃环境下保存,且只能保存3d。供试污泥含水率为97.19%,黏度为85 mPa·s, pH为6.69,总固体(TS)为21.85 g/L。

实验分为沸石调理、超声波调理和联合调理。沸石调理剂采用天然沸石,粒度为100~200目。堆肥时添加米糠作为辅料,其主要目的是调节污泥含水率、碳氮比(C/N)和孔隙度等。堆肥原泥与辅料的含水率分别为75.58%、7.51%,有机质含量分别为72.38%、71.27%,TN含量分别为38.70、33.62 g/kg,TP含量分别为3.58、3.51 g/kg,TK含量分别为6.53、4.94 g/kg, C/N分别为21.09、75.04。

1.2 实验装置

堆肥采用自主搭建的堆肥反应器,该反应器如图1所示。

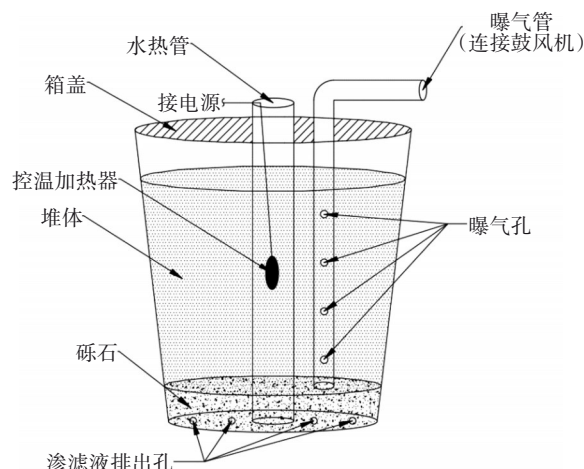


图1 污泥好氧堆肥反应装置示意

Fig.1 Schematic diagram of sludge aerobic composting reactor

装置主要由继电器、鼓风机、曝气管、水热管、堆肥桶组成。堆肥桶容量为120 L,实验堆体的体积为80 L,堆体表面距离桶顶10 cm,桶底部与地面相距10 cm。堆体中心的水热管可控加温。桶体底部铺有砾石层支撑,底板开孔,防止渗滤液淤积。桶四周包裹保温隔热层,防止堆体散热过快。曝气管通过时间继电器控制开关,曝气管上开有若干等距离的小孔,保证供氧均匀。

1.3 实验方法

脱水性能调理实验:根据前期实验筛选出沸石的最佳投加量为0.3 g/L。超声波最佳工况的频率为20 kHz、功率为20 W、处理时间为5 s。联合调理实验中,在投加沸石后,需在200 r/min转速下快速搅拌30 s,再在80 r/min转速下搅拌15 min。

好氧堆肥实验:将调理阶段得到的脱水污泥进行好氧堆肥。设置4组污泥堆体,分别为原泥对照组、沸石调理组、超声波调理组、联合调理组,具体设置为80%无预处理脱水污泥+20%米糠、80%沸石调理脱水污泥+20%米糠、80%超声波调理脱水污泥+20%米糠、80%沸石与超声联合调理脱水污泥+20%米糠。设置曝气量为0.1 m³/min,每小时曝气20 min。堆肥过程中每3 d翻堆一次,保证堆体发酵和曝气均匀。

1.4 检测项目及方法

污泥脱水调理阶段:以污泥比阻(SRF)与毛细吸水时间(CST)作为污泥脱水评价指标,CST采用毛细吸水时间测定仪进行测试,SRF采用污泥比阻实验装置进行测试。污泥胞外聚合物(EPS)在空间结构上分为溶解性EPS(S-EPS)和固着性EPS(B-EPS),而B-EPS又分为松散型EPS(LB-EPS)和紧密型EPS(TB-EPS)。采用改进的热提取法^[13]提取各层EPS。提取EPS之后,进行多糖和蛋白质的测定,分别采用蒽酮-硫酸比色法和Lowry法测定。

好氧堆肥阶段:在该阶段相关参数的检测方法参照《城市污水处理厂污泥检验方法》(CJ/T 221—2005)。堆体含水率与有机质采用重量法测定,TOC采用总有机碳分析仪测定,TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,TP采用钼酸铵分光光度法测定,TK采用常压消解火焰原子吸收分光光度法测定,重金属含量采用电感耦合等离子体光谱法测定,种子发芽指数(GI)采用培养法测定。

2 结果与讨论

2.1 调理污泥效果分析

2.1.1 对污泥脱水性能的影响

沸石或超声波单独调理以及联合调理污泥的效果如图2所示。可知,联合调理污泥的脱水效果最好。而且先投加沸石调理再采用超声波处理效果更优,此时污泥CST与SRF分别降低至31.30 s、 2.52×10^{-13} m/kg。超声波通过水力空化与机械力学的作用破解污泥絮体,释放了部分结合水,改变了污泥的絮体结构,将大絮体击碎成小颗粒污泥,通过沸石的吸附架桥作用吸附小颗粒污泥,进一步释放表面吸附水。由于沸石的铝氧四面体带有负电荷,且其骨架空腔含有阳离子,可在阳离子周围构成强电场,所以沸石具有较大的静电力吸附效能,使得沸石易于吸附极性分子。故推测沸石吸附了带有极性分子的亲水性基团,提高了污泥的疏水性。此外,沸石具有丰富的孔隙结构,可形成稳定的脱水通道;同时沸石还产生了骨架构建作用,避免污泥在机械脱水过程中被过度压缩,影响脱水效率。

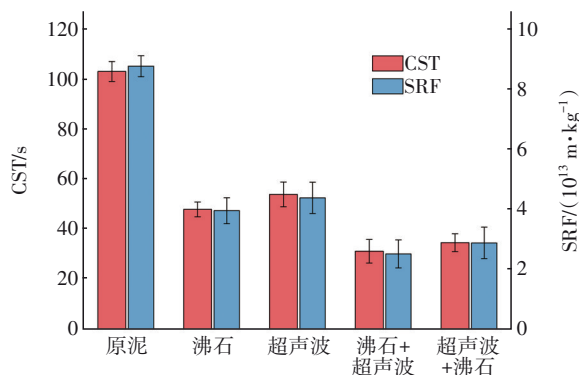


图2 污泥脱水性能对比

Fig.2 Comparison of sludge dewatering performance

2.1.2 对污泥EPS的影响

调理后污泥的EPS成分均有一定程度的变化(见图3)。其中TB-EPS变化幅度较小,转化过程主要发生在LB-EPS和S-EPS二者之间,无论是经过单一调理还是联合调理的污泥,其LB-EPS含量均降低,而S-EPS含量均升高,表明部分LB-EPS转化为了S-EPS,而且这种转化过程有助于污泥脱水性能的提高。有研究发现,S-EPS中蛋白质和多糖含量的增加有助于提高S-EPS中的亲水基团数量,从而使水分在S-EPS中更加集中,便于去除^[14]。

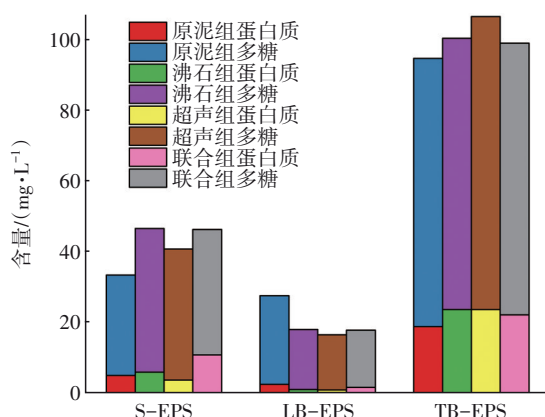


图3 调理后污泥EPS的变化

Fig.3 Change of EPS of sludge after conditioning

2.2 污泥好氧堆肥基本性质的变化

堆肥过程中温度和含水率的变化如图4所示。

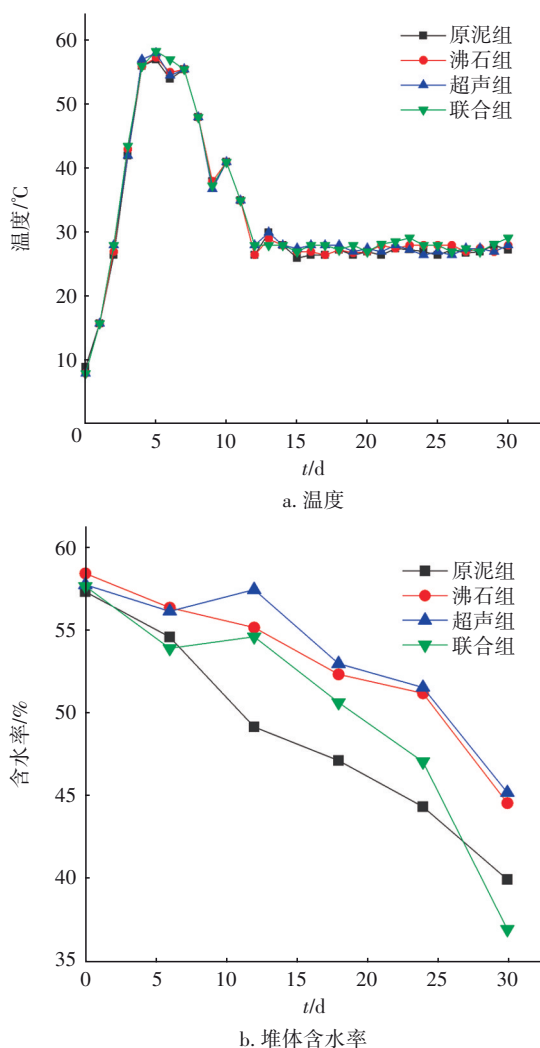


图4 堆肥过程中温度和含水率的变化

Fig.4 Change of temperature and moisture content during composting

根据《粪便无害化卫生标准》(GB 7959—1987)可知,堆体温度若能保持55℃以上3 d,堆体中病原体、微生物、虫卵均认为被杀灭。4组堆体的温度在第4~8天一直保持在55℃以上,认为堆肥的高温阶段达到标准。其中,沸石组与联合组高温阶段的温度更高,这可能是因为沸石在脱水污泥中形成了丰富的多孔结构,为堆体内的氧传质提供了有利条件,有利于微生物分解有机质,从而释放更多的热量,提高堆体温度^[15]。

从图4(b)可知,第6~12天,超声组和联合组出现了堆体含水率不降反增的现象。其原因是两组污泥均经过超声波处理,超声波有效破解了污泥絮体,释放出更多的有机物,这些有机物在升温阶段和高温阶段被分解,产生了大量水分,导致堆体含水率上升。联合组的含水率由最初的57.64%下降至36.97%,平均每天下降0.69%,在4组堆体中下降最为明显,表明联合调理对污泥堆肥含水率的下降具有促进作用,可加快堆肥腐熟进程。

2.3 污泥好氧堆肥营养成分的变化

2.3.1 有机质和TOC的变化

有机质和TOC的变化在一定情况下可以反映堆肥进程。图5为堆肥过程中有机质的变化。可知,堆肥过程中有机质含量持续下降,且前18 d的下降速率高于后12 d。另外,沸石组、超声组和联合组污泥有机质的下降速率均高于原泥组,且联合组最为明显,其含量从75.90%下降至49.62%,平均每天下降0.88%。这说明联合调理比单独调理更能加快有机物的降解,促进腐熟进程。

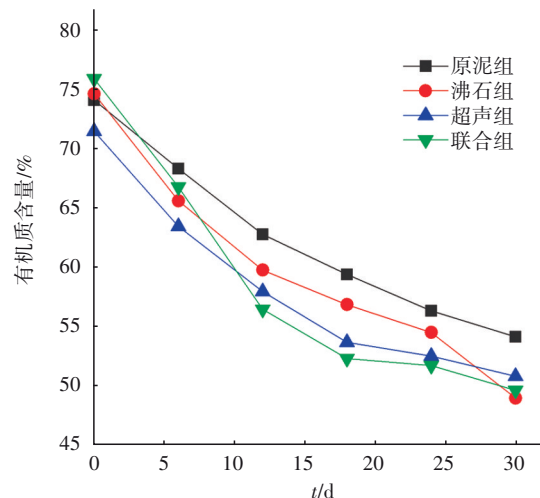


图5 堆肥过程中有机质的变化

Fig.5 Change of organic matter during composting

TOC的变化趋势与有机质一致,原泥组、沸石组、超声组和联合组的TOC分解率分别为58.68%、64.74%、59.91%、64.80%,联合组最优,沸石组次之。这是因为添加了沸石使堆体拥有更多的自由空间,提升了氧传质和持水能力,从而提高了堆体内的微生物活性,加快了堆体中含碳有机物的分解,使得肥效果更佳^[16]。

2.3.2 氮、磷、钾及C/N的变化

氮、磷、钾是植物细胞生命活动中的重要元素。堆肥过程中TN和C/N的变化如图6所示。3组调理堆肥组的TN、TP、TK变化趋势与原泥组基本一致。原泥组、沸石组、超声组和联合组的氮损失率分别为44.96%、41.67%、44.71%、40.41%。可见,超声组与原泥组的氮素损失率相似,但添加沸石的堆体都减少了氮素流失,这是因为沸石可以充当保氮剂^[17],对 NH_4^+ 具有较强的亲和性和选择性,提高了氮素利用率。

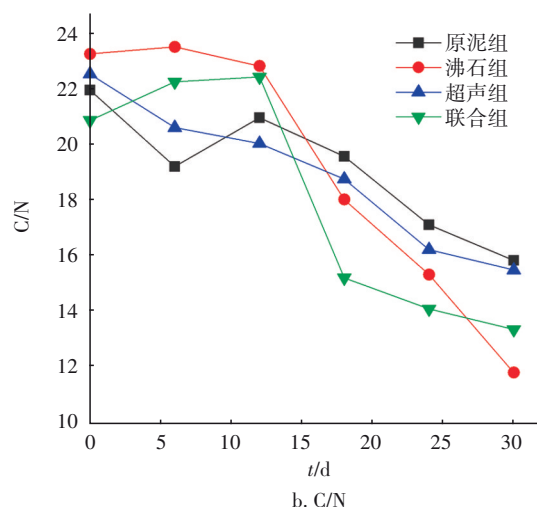
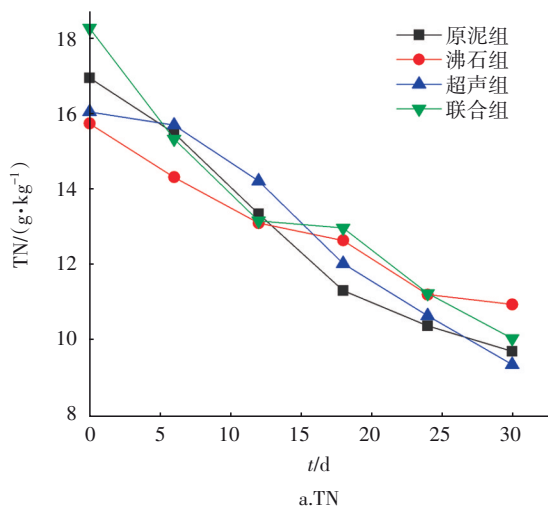


图6 堆肥过程中TN和C/N的变化

Fig.6 Change of TN and C/N during composting

后12 d氮元素耗散更慢,这是因为含氮有机物的主要代谢途径从氨化向硝化转变,氨挥发量减少,而且微生物生命活动减缓,进一步导致TN损耗速率减缓。TP和TK含量逐渐升高,表明堆肥过程中磷、钾元素的占比增加,其原因除了堆体水分耗散及有机质等被消耗使得堆体质量减少,从而导致磷、钾元素占比上升外,还因为污泥里矿物质中的磷、钾元素得到了释放。由图6(b)可知,C/N总体呈下降趋势。据报道,堆肥最适宜的起始C/N为(20~30):1,而堆肥产品的C/N应小于15^[18]。所以该堆体起始C/N适宜,同时堆肥最终产品也满足植物生长时对氮元素的需求。

2.4 污泥堆肥产品中的重金属含量与种子发芽率

2.4.1 污泥重金属含量

4组堆体的重金属含量见表1。

表1 堆肥前后重金属含量的变化

Tab.1 Change of heavy metal content before and after composting

项目	原泥组			沸石组			超声组			联合组		
	堆肥前/(mg·kg ⁻¹)	腐熟后/(mg·kg ⁻¹)	去除率/%	堆肥前/(mg·kg ⁻¹)	腐熟后/(mg·kg ⁻¹)	去除率/%	堆肥前/(mg·kg ⁻¹)	腐熟后/(mg·kg ⁻¹)	去除率/%	堆肥前/(mg·kg ⁻¹)	腐熟后/(mg·kg ⁻¹)	去除率/%
As	7.14	5.76	19.31	4.07	2.49	38.79	4.58	3.76	17.92	4.62	2.91	36.96
Pb	14.56	9.88	32.13	6.10	4.78	21.54	8.65	6.11	29.42	11.54	6.55	43.27
Cd	0.68	0.54	21.17	0.24	0.23	5.46	0.43	0.31	29.14	0.46	0.24	47.84
Cr	30.77	23.19	24.63	16.03	9.51	40.65	18.11	13.51	25.37	21.06	11.02	47.68
Hg	1.10	0.89	19.16	0.93	0.78	16.09	0.75	0.65	14.20	0.61	0.47	23.73
Cu	45.20	38.01	15.90	22.70	18.22	19.72	25.23	21.64	14.25	21.61	16.72	22.60
Zn	195.03	107.44	44.91	103.41	50.92	50.76	115.95	65.94	43.13	128.60	51.65	59.84
Ni	10.16	7.10	30.14	4.05	3.73	7.90	6.87	4.71	31.53	7.61	3.75	50.72

由于有机物降解和水分散失,堆体体积会大幅度下降,导致重金属发生浓缩反应,单位质量堆体中的重金属含量提升。而本研究中4组堆体的重金属含量均有所下降,其中原泥组的重金属含量也发生了下降,表明堆肥技术可以钝化重金属,降低其生物有效性。同时由于堆肥过程中产生了渗滤液,因此推测部分重金属会随着渗滤液从堆肥反应器底部流出,导致堆体重金属含量下降。联合调理可以更加有效地去除重金属,堆体中的沸石通过物理吸附、离子交换和沉淀络合等交互作用机制,钝化部分重金属,这与生物炭在堆肥过程中的作用机制相似^[19]。结合之前的分析发现,联合调理可以更加有效地降解有机质,有机质的降解使得大量与其结合的重金属被释放出来,更易随着渗滤液排出。此外,由表1可知,4组堆肥产品中各种重金属含量均远低于我国制定的各种泥质标准,能够满足土地利用条件。

2.4.2 种子发芽指数

种子发芽指数(GI)是衡量堆肥腐熟程度的重要指标,其借助植物来反映堆肥产品的毒性,发芽率越高代表毒性越弱。堆肥物料中有机物、蛋白质等物质的分解程度和这些物质的分解产物,如有机酸、氨等,其含量均可影响GI值。普遍认为,当GI高于50%时,物料对植物基本不存在毒性,认为基本腐熟;而当GI高于80%时,认为物料已无生物毒性,完全腐熟。原泥组、沸石组、超声组、联合组堆肥产品的GI值分别为68.31%、80.35%、75.55%、94.19%。可以看出,GI值均高于50%,表明通过3种调理方法皆可降低堆体的生物毒性。沸石组和联合组更是超过80%,符合完全腐熟的标准,可认为达到了无毒性的程度。

3 结论

超声波和沸石联合调理污泥能极大改善污泥的脱水性能,且先沸石后超声效果更优。沸石调理、超声调理以及联合调理都能使污泥中部分LB-EPS转化为S-EPS,且联合调理对该转换的促进作用最为明显。沸石组、超声组和联合组污泥堆肥时的有机质下降量和下降速率均优于原泥组,且联合调理组表现最优,说明联合调理比单独调理更能促进有机质的降解,加快堆肥反应进程。4组堆肥产品中的重金属含量均远低于我国制定的标准,且联

合调理降低重金属的效果最佳。同时4组堆肥产品的GI值均高于50%,且联合组最高,说明通过联合调理的堆肥产品腐熟无害化程度最高。

参考文献:

- [1] 桂厚瑛. 污泥堆肥工程技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2015.
GUI Houying. Sludge Composting Engineering Technology [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2015(in Chinese).
- [2] 黄锦佳, 梁嘉林, 杨贤, 等. 超声-生物沥浸-氧化钙联合超高压压滤系统实现市政污泥深度脱水及其泥饼的毒性评估[J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1745-1759.
HUANG Jinjia, LIANG Jialin, YANG Xian, et al. Deep dewatering of sewage sludge by ultrasonic-bioleaching-lime conditioning combined with ultrahigh pressure filtration system and its toxicity evaluation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(5): 1745-1759(in Chinese).
- [3] 刘常青, 陈细妹, 赵由才, 等. 市政污水厂脱水污泥对赤子爱胜蚓生长与繁殖的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(10): 4026-4032.
LIU Changqing, CHEN Ximei, ZHAO Youcai, et al. Effect of dewatered municipal sewage sludge on the growth and reproduction of *Eisenia fetida* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(10): 4026-4032 (in Chinese).
- [4] 孟繁健, 朱宇恩, 孟凡旭, 等. PAM在土壤重金属污染植物修复中的作用及机理研究进展[J]. 中国农学通报, 2018, 34(16): 92-99.
MENG Fanjian, ZHU Yu'en, MENG Fanxu, et al. The role and mechanism of PAM in phytoremediation of heavy metal polluted soil: a review [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(16): 92-99 (in Chinese).
- [5] 申亮, 施周, 罗璐, 等. 壳聚糖和溶菌酶联用对污泥脱水性能的影响[J]. 中国给水排水, 2016, 32(5): 107-111.
SHEN Liang, SHI Zhou, LUO Lu, et al. Effect of chitosan and lysozyme treatment on dewaterability of sludge [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(5): 107-111(in Chinese).
- [6] XU X Z, CAO D, WANG Z H, et al. Study on ultrasonic treatment for municipal sludge [J].

- Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 57:29–37.
- [7] 郑西朋, 曹洲榕, 陈钰, 等. 超声波对污泥蚯蚓堆肥有机质和重金属的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(4): 1654–1663.
- ZHENG Xipeng, CAO Zhouong, CHEN Yu, *et al.* Study on the influence of ultrasonic technology on sludge earthworm composting [J]. China Environmental Science, 2019, 39(4): 1654–1663(in Chinese).
- [8] WANG J X, LIU H, DENG H P, *et al.* Deep dewatering of sewage sludge and simultaneous preparation of derived fuel via carbonaceous skeleton-aided thermal hydrolysis [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 402:126255.
- [9] ZHU C, LI F, ZHANG P Y, *et al.* Combined sludge conditioning with NaCl-cationic polyacrylamide-rice husk powders to improve sludge dewaterability [J]. Powder Technology, 2018, 336:191–198.
- [10] ZHANG X C, KANG H S, ZHANG Q R, *et al.* The porous structure effects of skeleton builders in sustainable sludge dewatering process [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 230:14–20.
- [11] GUO J Y, JIA X J, GAO Q F. Insight into the improvement of dewatering performance of waste activated sludge and the corresponding mechanism by biochar-activated persulfate oxidation[J]. Science of the Total Environment, 2020, 744:140912.
- [12] 黄显浪, 李小明, 杨麒. CTAB改性斜发沸石对剩余污泥的调理作用[J]. 环境工程学报, 2016, 10(6): 3193–3199.
- HUANG Xianlang, LI Xiaoming, YANG Qi. Conditioning effect of CTAB modified clinoptilolite on waste activated sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(6): 3193–3199 (in Chinese).
- [13] 张心钰, 陈瑶, 董黎明, 等. 柠檬酸废水污泥脱水中蛋白质和多糖变化特征[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(S2): 76–80.
- ZHANG Xinyu, CHEN Yao, DONG Liming, *et al.* Changes of protein and polysaccharide during dehydration of citric acid wastewater sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(S2): 76–80(in Chinese).
- [14] LIANG J L, ZHANG S W, HUANG J J, *et al.* Mechanism of zero valent iron and anaerobic mesophilic digestion combined with hydrogen peroxide pretreatment to enhance sludge dewaterability: relationship between soluble EPS and rheological behavior [J]. Chemosphere, 2020, 247:125859.
- [15] SPOKAS K A, CANTRELL K B, NOVAK J M, *et al.* Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration [J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4):973–989.
- [16] 卢妙. 调理剂对污泥堆肥的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- LU Miao. Research on the Effect of Additives on the Performance of Municipal Sludge Composting [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [17] 胡伟桐. 生物沥浸污泥工程化好氧堆肥效果及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- HU Weitong. Study on Aerobic Composting of Bioleached Sludge at Commercial Scale and Its Mechanism [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015(in Chinese).
- [18] 黄柳祯. 城市污水污泥好氧堆肥的研究概述[J]. 广东化工, 2017, 44(9):222–224.
- HUANG Liuzhen. Study on thermophilic aerobic composting of sewage sludge [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(9): 222–224(in Chinese).
- [19] 周楫, 余亚伟, 蒋越, 等. 生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响 [J]. 环境科学, 2019, 40(2): 987–993.
- ZHOU Ji, YU Yawei, JIANG Yue, *et al.* Effect of biochar on available heavy metals during sewage sludge composting and land application of compost [J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 987–993 (in Chinese).
-
- 作者简介:**杨亚红(1976–),女,陕西宝鸡人,博士,副教授,主要研究方向为水质净化与污泥处置。
- E-mail:** yangyahong@lut.edu.cn
- 收稿日期:**2023–12–13
- 修回日期:**2024–02–12

(编辑:任莹莹)