

污泥生物处理技术在长江大保护中的应用前景

王先恺¹, 董滨^{1,2*}, 高勇¹, 孙凯丽¹, 次瀚林³

1. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038
2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092
3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434

摘要: 污泥是污水处理的副产物,是污水处理过程的延续和必然要求。截至2017年,长江经济带11省市污泥产量接近 $2\ 000\times 10^4$ t/a,大量污泥没有得到妥善处置,严重制约着“长江水质根本好转”目标的实现。厌氧消化与好氧发酵是两种主流的污泥生物处理技术,都已有广泛的应用案例,但是也存在运营不畅的现象。为识别长江大保护中污泥生物处理项目的问题并提出解决方案,分析了长江经济带的污泥产率及性质,梳理了污泥生物处理技术的发展及适用性。结果表明:长江经济带各省市污泥产量约占全国污泥产量的40%,污泥产率普遍低于全国平均水平,长江经济带各省市污泥有机质含量低于55%,pH为中性、总养分含量超过5.0%、重金属含量存在超过GB 4284—2018《农用污泥污染物控制标准》标准限值的风险;高级厌氧消化、协同厌氧消化和高含固厌氧消化等技术的发展破解了由于长江经济带污泥有机质含量普遍较低而导致的污泥厌氧消化稳定性低的问题,降低了污泥厌氧消化工程的成本;污泥好氧发酵过程重金属钝化技术的发展在一定程度上破解了由于长江经济带污泥重金属含量过高而导致的污泥发酵产物出路不畅的问题。研究显示,污泥生物处理技术仍具有一定的局限性,但通过合适的规划,污泥生物处理技术可与其他污泥处理处置技术高效耦合,具有广泛应用于长江大保护污泥处理处置项目的潜力。

关键词: 污泥; 长江大保护; 产业协同; 厌氧消化; 好氧发酵

中图分类号: X705

文章编号: 1001-6929(2020)05-1241-06

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.03.44

Application Prospect of Biological Treatment Technology of Sewage Sludge in Yangtze River Protection

WANG Xiankai¹, DONG Bin^{1,2*}, GAO Yong¹, SUN Kaili¹, CI Hanlin³

1. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China
2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China
3. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China

Abstract: Sewage sludge is a by-product of sewage treatment and the continuation of sewage treatment process. The Yangtze River Economic Belt (YREB) sewage sludge production is close to 2000×10^4 t/a by 2017, and large amounts of sewage sludge are not properly disposed, which seriously restricts the realization of ‘fundamental improvement of Yangtze River water quality’. Anaerobic digestion and composting are two mainstreams sewage sludge biological treatment technologies, but some biological treatment projects were in poor operation. To identify and solve the problems in the sewage sludge biological treatment projects of the Yangtze River Protection (YRP), the yield and properties of YREB sewage sludge were analyzed and the development and applicability of sewage sludge biological treatment technologies were reviewed. The results showed YREB sewage sludge accounted for 40% of the national sewage sludge production, and YREB sewage sludge yield was generally lower than the national average level. For YREB sewage sludge, organic matter content was lower than 55%, pH was neutral, total nutrient content was more than 5.0%, and heavy metal content might exceed the limit values of *Control Standards of Pollutants in Sludge for Agricultural Use* (GB 4284-2018). The development of advanced anaerobic digestion, collaborative anaerobic digestion and high solid anaerobic digestion technologies solved the problem of low stability of anaerobic digestion caused by the low organic matter content of YREB sewage sludge and reduced the anaerobic digestion project cost. The development of composting passivation technology solved market problems of sewage sludge compost caused by high heavy metal content in YREB sewage sludge. The

收稿日期: 2020-01-30 修订日期: 2020-03-27

作者简介: 王先恺(1992-),男,湖北鄂州人,工程师,博士,主要从事固体废物资源化研究,wang_xiankai@ctg.com.cn.

* 责任作者,董滨(1978-),男,山东青岛人,教授,博士,主要从事城市污泥资源化能源化技术研究,tj_dongbin@vip.163.com

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研专项

Supported by Scientific Research Project of China Three Gorges Corporation, China

research showed though sewage sludge biological treatment technologies has some limitations, they can be effectively combined with other sewage sludge treatment technologies through appropriate planning and can be widely used in YRP sewage sludge treatment and disposal projects.

Keywords: sewage sludge; Yangtze River Protection; industry coordination; anaerobic digestion; composting

城市污水厂污泥(简称“污泥”)是污水在生化和物化过程中的副产物,富含有机质及营养元素,也可能含有大量的病毒、虫卵、重金属和有机污染物^[1-3]. 经妥善处理的污泥,其产物可作为土壤改良剂或有机肥;未得到妥善处置的污泥,其中的污染物存在转移到自然环境的风险,从而造成二次污染^[4-6]. 大量污泥没有得到妥善处置,将严重制约着三峡集团长江大保护工作中“长江水质根本好转”目标的实现. 污泥含水率高,并且含有一定量易腐成分,其性质与餐厨垃圾在生物处理上存在较好的互补性,具有协同处理处置的潜力^[7-9]. 中国共产党第十九届中央委员会第四次全体会议通过的《中共中央关于坚持和完善中国特色社会主义制度、推进国家治理体系和治理能力现代化若干重大问题的决定》要求“健全资源节约集约循环利用政策体系,普遍实行垃圾分类和资源化利用制度”,为污泥与餐厨垃圾的协同处理处置提供了有力的政策支持.

生物处理技术由来已久,厌氧消化和好氧发酵是最主流的两种污泥生物处理技术. 生物处理技术可以实现污泥的无害化、稳定化、减量化和资源化,而且投资与运行成本相对较低,因此该技术已有广泛的工程应用案例^[10-13]. 然而,现阶段我国的污泥生物处理技术已相对成熟,但尚未形成全产业链的行业标准,导致污泥处理项目运行不畅,甚至出现停产现象^[14-15]. 该研究基于长江经济带各省市的泥质情况,梳理污泥生物处理技术的发展情况,研究污泥生物处理技术在长江经济带各省市的应用潜力,以期为解决长江大保护中的污泥处理处置问题提供理论支持.

1 长江经济带各省市污泥现状

1.1 长江经济带各省市污泥产量

随着城市化的快速发展和水体污染防治力度的提高,我国城镇污水的产量大幅上升,截至2017年,我国城市污水处理量已达 $492 \times 10^8 \text{ m}^3$,污水处理率不足95%. 在未来一段时间里,我国仍将大力推动城镇污水的收集与处理工作,污水处理量也会持续快速增长^[16]. 长江经济带集聚的人口占全国人口的40%以上,污水处理量也占全国污水总处理量的40%以上,未来长江流域的污水处理量也将持续提升.

污泥承接了污水中的污染物,是污水处理过程的

延续和必然要求,截至2017年,我国污泥产量已突破 $5000 \times 10^4 \text{ t}$ (以含水率80%计),长江经济带11省市污泥产量接近 $2000 \times 10^4 \text{ t}$,约占全国污泥总量的40%(见图1). 长期以来污泥处理处置工作没有得到应有的重视,污泥无害化处置率处于较低水平,造成了较大的环境风险. 因此,污泥处理处置短板已成为制约长江水质根本好转目标达成的关键因素之一,解决污泥处理处置问题是长江大保护工作的重要环节. 此外,《长江保护修复攻坚战行动计划》要求在2020年底前,沿江地级及以上城市污泥无害化处理处置率在90%以上,给推进污泥处理处置工作提出了新的要求^[16].

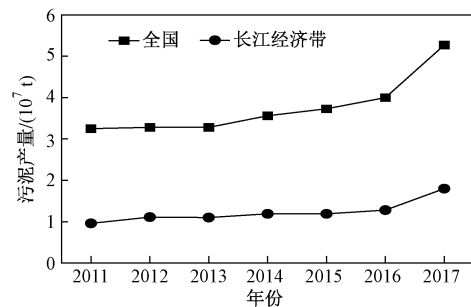


图1 全国及长江经济带污泥产量变化

Fig.1 Change in sewage sludge production in China and the Yangtze River Economic Belt

1.2 长江经济带各省市污泥产率与性质

从全国范围看,我国污泥与发达国家污泥相比,具有有机质含量低、微细砂和金属含量高、泥龄长等特点^[14]. 造成国内外泥质差异的主要原因有:①我国污水管网存在严重的“雨污混接”现象,污水厂进水COD浓度低,导致污泥泥龄长;②我国城市基础设施建设处于蓬勃发展时期,大量砂砾进入污水管网,导致污泥中微细砂含量高、有机质含量低;③我国工业污水重金属处理系统不完善,部分工业污水混入城市污水处理系统,导致重金属及其他金属含量过高^[14].

在长江经济带范围内,各省市之间污泥产率与性质也呈现出较大的差异. 根据住房和城乡建设部《2017年城乡统计年鉴》,2017年我国各省(自治区、直辖市)平均污泥产率为 $2.26 \text{ t}/(10^4 \text{ m}^3)$ [以DS(干污泥)计],长江经济带11省市的污泥产率在 $0.98 \sim 2.75 \text{ t}/(10^4 \text{ m}^3)$ 区间浮动,整体来看长江经济带各省市的污泥产率远低于全国平均水平(见图2).

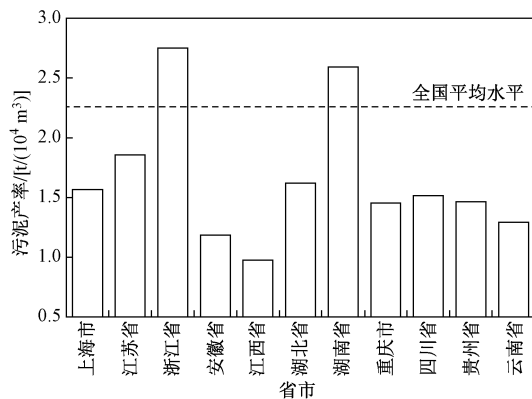


图2 长江经济带各省市污泥产率
Fig.2 The yield of sewage sludge in Yangtze River Economic Belt

表1为长江经济带和全国污泥pH、有机质及养分含量抽样调研结果。由表1可见:长江经济带各省市污泥pH均在中性区间内,总养分含量(TN、P₂O₅、K₂O含量之和)超过5.0%,具有较好的土地利用潜

表1 长江经济带和全国污泥pH、有机质及养分含量^[17]

Table 1 Organic matter, pH and nutrient contents of sewage sludge in the Yangtze River Economic Belt and the whole China^[17]

项目	pH	有机质含量/%	TN含量/%	P ₂ O ₅ 含量/%	K ₂ O含量/%
长江经济带	6.6~7.3	29.5~55.3	2.1~4.2	2.6~4.8	0.3~0.9
全国	6.6~7.3	11.2~60.4	0.8~5.0	1.4~8.6	0.1~4.3

表2 长江经济带和全国污泥重金属含量以及农用污泥产物重金属含量限值

Table 2 Heavy metal content of sewage sludge in the Yangtze River Economic Belt and the whole China and the control standards of heavy metal content in sludge products for agricultural use

项目	含量/(mg/kg)								数据来源
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
长江上游	15.4~34.1	1.8~3.0	144~372	562~917	1.3~1.5	42.4~78.3	58.6~77.3	471~684	文献[17]
长江中下游	7.4~82.9	1.0~23.0	33~278	113~969	0.8~4.0	20.9~53.9	42.5~2360.0	363~13112	文献[17]
全国	0.9~108.0	0.4~39.9	11~2707	56~4814	0.1~15.8	13.0~639.0	22~2360.0	42~13112	文献[17-18]
标准值 ¹⁾	≤30	≤3	≤500	≤500	≤3	≤100	≤300	≤1200	

注:1) 标准值参考 GB 4284—2018《农用污泥污染物控制标准》。

普遍低于全国水平,pH为中性、总养分含量超过5.0%、重金属含量存在超过GB 4284—2018标准限值的风险。

2 污泥生物处理技术进展及适用性

2.1 污泥厌氧消化技术进展

厌氧消化是指在无氧条件下,由兼性菌和厌氧细菌分解有机质并产生沼气的过程^[19-20]。厌氧消化技术是西班牙、英国、意大利、芬兰和斯洛伐克等国家主流的污泥处理技术^[21-22];美国和日本大多数污水厂也采用厌氧消化技术处理污泥^[14]。我国污泥厌氧消化率不足3%,与发达国家相差较大^[14]。究其原因

力;然而,长江经济带各省市污泥中有机质含量较低,范围在30%~55%之间,并不适用于厌氧消化等国外常见的污泥处理工艺。由于缺乏对长江流域污泥产量与泥质的科学估测,给长江经济带各省市污泥处理处置项目的规划与设计带来了较大的困难,也造成了已建成污泥处理处置设施运行不稳定的现象。

表2为我国污泥中重金属含量的抽样调查结果^[17-18]。由表2可见:长江经济带各省市污泥中重金属含量波动较大,长江中下游污泥中重金属含量高于长江上游。长江上游污泥中除As和Cu以外,其他重金属含量均在GB 4284—2018《农用污泥污染物控制标准》限值以内;长江中下游污泥中除Cr和Ni外,其他重金属含量均超过GB 4284—2018标准限值,污泥产物农用时存在重金属含量超过标准限值的风险。因此,选择污泥处理处置技术路线时,需充分评估污泥中重金属对其处置途径的影响。

综上,长江经济带各省市污泥产率及有机质含量

有以下两点:①我国的政策长期以来“重水轻泥”,对污泥的处理处置重视程度低,资金投入不足;②我国污泥有机质含量普遍较低且微细砂含量较高,直接采用国外成熟设备会出现厌氧消化转化率低、厌氧消化设备运行不稳定的现状;③缺乏系统规划,导致污泥厌氧消化产物消纳途径不明朗。对于长江经济带各省市而言,其污泥中有机质含量普遍低于55%,污泥厌氧消化工程运行的稳定性较差的情况尤为普遍。

“十一五”以来,我国全面推进污水处理厂污泥处理处置政策和标准的编制,进而推动污泥厌氧消化工程的落地,我国污泥厌氧消化技术因此得到了有效

的发展,涌现出了一批新技术.如针对厌氧消化过程中的产气率与有机质降解率较低问题,开发了高级厌氧消化技术,即通过高温热水解等预处理手段可实现污泥破壁,降低难降解有机质含量,增加易降解有机质含量,提升污泥厌氧消化效率^[23-25];针对污泥来源不稳定以及有机质含量较低问题,开发了污泥与其他有机固体废物协同厌氧消化技术,提升共发酵基质中易生物降解组分的含量、调节发酵底物的理化性质,进而提升厌氧消化过程的产气率,并且产生规模效应、降低综合投资成本^[9];针对厌氧消化工程投资运营成本较高问题,开发了高含固厌氧消化技术(含固率 $\geq 15\%$),实现在高含固率情况下污泥厌氧消化设备的正常运行,提升了单位体积反应器的污泥处理能力,进而降低反应器体积和保温能耗^[26-27].此外,随着我国污水管网逐步修复与完善、基础设施建设进度逐渐放缓,我国污泥泥质呈有机质含量上升、微细砂和金属含量降低、泥龄缩短的趋势.由此可见,制约污泥厌氧消化项目推广的因素正在逐步被破解,污泥厌氧消化技术已具备大规模推广的潜力.

2.2 污泥好氧发酵技术进展

好氧发酵是指在好氧条件下,由好氧嗜热菌分解有机质并形成腐殖质的过程^[28-29].现代好氧发酵技术源自传统堆肥技术,广泛用于有机固体废物的处理,可实现有机质的高效降解与稳定化,其产物可用作有机肥或土壤改良剂^[30-31].与厌氧消化技术相比,好氧发酵技术投资成本、运营与维护难度相对较低,在我国已有较多的工程实践案例.在实际工程应用中,污泥好氧发酵技术所面临的制约因素主要有以下三点:①好氧发酵过程中臭气控制难度大、成本高,缺乏廉价且可靠的臭气控制技术;②好氧发酵需要稳定的调理剂来源,而传统调理剂的供应受到季节与地域的制约;③污泥好氧发酵产品出路不畅,污泥产品的土地利用缺乏规划且可能存在环境风险^[32].对于长江经济带各省市而言,其污泥中重金属含量存在超过 GB 4284—2018 标准限值的情况,污泥发酵产品的出路不畅问题尤为突出.

“十一五”以来,随着国家产业政策的倾斜,越来越多好氧发酵工程得以落地,好氧发酵工程的设计标准和规范趋于成熟^[13].在基础科研方面,针对污泥好氧发酵过程的臭气及温室气体大量释放问题,研究了臭气及温室气体的产生机制,通过提升易降解有机质含量、添加调理剂等方式,减少好氧发酵过程臭气及温室气体的排放量^[33];针对好氧发酵过程有机调理剂来源不稳定问题,研究了好的好氧发酵过程碳源的作用

机制,通过使用无机调理剂及反混料部分替代有机调理剂,减少对有机调理剂的依赖^[34-35];针对好氧发酵产物土地利用时存在重金属和有机污染物污染的风险,通过强化微生物活性、添加钝化材料、改变好氧发酵过程的通风参数等方式,实现重金属钝化、强化有机污染物降解,降低好氧发酵产物中重金属活性与有机污染物含量^[36-37].在好氧发酵装备制造上,智能化的控制系统与一体化设备相继研发成功并落地使用,采用新型好氧发酵设备既可以降低好氧发酵工程的投资与人工成本,又可以精准调节好氧发酵过程中的参数、提高好氧发酵效率,还可以在全密闭环境中处理污泥、减少臭气和温室气体排放对环境的影响^[15,35].制约污泥好氧发酵技术推广的因素也相继被破解,污泥好氧发酵技术也将迎来蓬勃的发展.

2.3 污泥生物技术的适用范围

缺乏对污泥产物消纳途径的规划是除技术条件限制以外导致现有污泥生物处理项目运行不畅的另一原因.因此,在污泥处理处置项目的设计阶段,需充分调研该项目的污泥处理量、泥质、其他城市有机固体废物的协同处理处置潜力以及污泥处置途径,基于每一座城市的具体情况尤其是污泥具体出路,制定相应的规划,优化各技术单元之间的衔接关系.采用污泥厌氧消化和好氧发酵技术处理污泥的基本前提有以下几个:

a) 污泥厌氧消化设备运行稳定性,其主要受到污泥中有机质含量的影响.当污泥处理量较少时,采用厌氧消化技术的成本相对较高.针对污泥处理量大于 100 t/d 的项目,如污泥有机质含量高于 50%,可直接采用高级厌氧消化工艺处理污泥;如污泥有机质含量低于 50%,若可通过与有机质含量较高的有机固废(如餐厨垃圾)协同处理,使得发酵基质有机质含量高于 50%,适合于采用协同(高级)厌氧消化技术,若不具备协同厌氧消化条件,不建议采用厌氧消化技术.针对污泥处理量小于 100 t/d 的项目,若有足够有机固废可供协同,即污泥与其他有机固废处理的处理量之和大于 100 t/d 时,可采用协同(高级)厌氧消化技术,否则不建议采用厌氧消化技术.

b) 经厌氧消化后的污泥,可根据城市实际情况选取污泥产物的消纳途径.针对污泥产物中重金属含量不超过标准限值情形(见表 2),若项目所在地具备土地利用条件,可采用好氧发酵技术对其进行稳定化处理,其后进行土地利用;若项目所在地具备建材利用条件,可直接进行建材利用或焚烧后进行建材利用;若项目所在地不具备资源化条件,则需(协同)焚

烧后进行填埋处置. 针对污泥中重金属含量超过 GB 4284—2018 标准限值的情况,需(协同)焚烧后进行填埋处置.

c) 好氧发酵技术对污泥有机质含量要求较低,而且长江经济带各省市污泥养分含量较高(见表1),然而,仅当污泥中重金属含量不超过 GB 4284—2018 标准限值(见表2)且项目所在地具备足够的土地利用潜力时,才适合采用好氧发酵技术处理污泥. 针对污泥处理量大于 100 t/d 的项目,好氧发酵可作为污泥厌氧消化的后续工艺,实现厌氧消化污泥的稳定化,使之符合土地利用的需求,这也是欧美国家广泛使用的技术路线^[20];针对污泥处理量小于 100 t/d 的项目,可采取好氧发酵后直接进行土地利用技术路线,该技术路线在长江经济带农村污水污泥处理处置项目上具有较大的优势和推广潜力.

综上,污泥处理处置是一个系统工程,污泥生物处理技术具有其局限性. 但是,通过与上下游技术相协同,污泥生物处理技术不仅可以实现污泥的资源化,还具备经济可行、环保可靠等特点. 因此,经过合适的规划与有效的协同,污泥生物处理技术可在长江保护工作中发挥较大的作用.

3 结论与建议

a) 长江经济带各省市污泥产量约占全国污泥产量的 40%,污泥产率普遍低于全国平均水平,长江经济带各省市污泥有机质含量低于 55%、pH 为中性、总养分含量超过 5.0%,重金属含量存在超过 GB 4284—2018 标准限值的风险.

b) 高级厌氧消化、协同厌氧消化和高含固厌氧消化等技术的发展破解了由于长江经济带污泥有机质含量普遍较低而导致的污泥厌氧消化稳定性低的问题,降低了污泥厌氧消化工程的成本.

c) 污泥好氧发酵过程重金属钝化技术的发展在一定程度上破解了由于长江经济带污泥重金属含量过高而导致的污泥发酵产物出路不畅问题.

d) 污泥生物处理技术仍具有一定的局限性,通过合适的规划,污泥生物处理技术可与其他污泥处理处置技术高效耦合,具有广泛应用于长江大保护污泥处理处置项目的潜力.

参考文献 (References):

- [1] HUANG Qingqing, YU Yao, WAN Yanan, *et al.* Effects of continuous fertilization on bioavailability and fractionation of cadmium in soil and its uptake by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 215: 13-21.
- [2] SUN Shaojing, JIA Linran, LI Bo, *et al.* The occurrence and fate of PAHs over multiple years in a wastewater treatment plant of Harbin, northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 491-498.
- [3] WOLEJKO E, WYDRO U, JABLONSKA-TRYPUC A, *et al.* The effect of sewage sludge fertilization on the concentration of PAHs in urban soils [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 232: 347-357.
- [4] UMAIR R, GHULAM M, SAIFULLAH, *et al.* Influence of different sewage sludges and composts on growth, yield, and trace elements accumulation in rice and wheat [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(5): 1343-1352.
- [5] ZHANG Chaosheng, XU Ying, ZHAO Meihua, *et al.* Influence of inoculating white-rot fungi on organic matter transformations and mobility of heavy metals in sewage sludge based composting [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 344: 163-168.
- [6] ZHENG Guodi, WANG Tieyu, NIU Mingjie, *et al.* Biodegradation of nonylphenol during aerobic composting of sewage sludge under two intermittent aeration treatments in a full-scale plant [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 783-791.
- [7] ŞEVİK F, TOSUN I, EKINCI K. The effect of FAS and C/N ratios on co-composting of sewage sludge, dairy manure and tomato stalks [J]. *Waste Management*, 2018, 80: 450-456.
- [8] WANG Meijing, AWASTHI M K, WANG Quan, *et al.* Comparison of additives amendment for mitigation of greenhouse gases and ammonia emission during sewage sludge co-composting based on correlation analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 520-527.
- [9] 陈小华. 污泥和餐厨垃圾协同处理工程厌氧消化系统的启动调试 [J]. *净水技术*, 2018, 37(6): 86-90.
CHEN Xiaohua. Start-up and commissioning test of anaerobic digestion system for co-digestion project of kitchen waste and sewage sludge disposal [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(6): 86-90.
- [10] WANG Xiankai, CHEN Tongbin, ZHENG Guodi. Perlite as the partial substitute for organic bulking agent during sewage sludge composting [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019. doi: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00353-z>.
- [11] YU Dawei, YANG Min, LU Qi, *et al.* Effects of aeration on matrix temperature by infrared thermal imager and computational fluid dynamics during sludge bio-drying [J]. *Water Research*, 2017, 122: 317-328.
- [12] 刘议安, 田宇, 马迁, 等. 北京市高安屯污泥处理中心工程设计及优化 [J]. *给水排水*, 2018, 44(8): 39-42.
- [13] 赵亮, 乔海兵, 高定, 等. 浙川县污泥处理工程工艺设计 [J]. *中国给水排水*, 2014(24): 93-95.
ZHAO Liang, QIAO Haibing, GAO Ding, *et al.* Process design of sewage sludge treatment plant in Xichuan County [J]. *China Water & Wastewater*, 2014(24): 93-95.
- [14] 陈思思, 杨殿海, 庞维海, 等. 我国剩余污泥厌氧转化的主要影响因素及影响机制研究进展 [J]. *化工进展*, 2020. doi: <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2019-1128>.
CHEN Sisi, YANG Dianhai, PANG Weihai, *et al.* Main influencing factors and influencing mechanisms of anaerobic transformation of excess sludge in China [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020. doi: <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2019-1128>.

- [15] 冯康,孟海波,周海宾,等.一体化好氧发酵设备研究现状与展望[J].中国农业科技导报,2018,20(6):63-69.
FENG Kang, MENG Haibo, ZHOU Haibin, *et al.* Research status and prospect of integrated aerobic fermentation equipment [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(6): 63-69.
- [16] 生态环境部,国家发展和改革委员会.关于印发《长江保护修复攻坚战行动计划》的通知[EB/OL].北京:生态环境部,2019-01-21 [2019-11-27]. http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/201901/t20190125_690887.html.
- [17] 彭信子.城镇污水处理厂污泥泥质特性分析及处理处置方案评估[D].上海:同济大学,2017.
- [18] 郭广慧,陈同斌,杨军,等.2014.中国城市污泥重金属区域分布特征及变化趋势[J].环境科学学报,2014,34(10):2455-2461.
GUO Guanghui, CHEN Tongbin, YANG Jun, *et al.* Regional distribution characteristics and variation of heavy metals in sewage sludge of China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(10): 2455-2461.
- [19] 李琦,席北斗,李东阳,等.腐殖酸含量对污泥厌氧发酵过程产CH₄效率的影响[J].环境科学研究,2019,32(5):875-880.
LI Qi, XI Beidou, LI Dongyang, *et al.* Effect of humic acid content on methane production efficiency during anaerobic fermentation of sludge[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(5): 875-880.
- [20] 唐涛涛,李江,吴永贵,等.不同类型秸秆对污泥厌氧消化特性及细菌群落结构的影响[J].环境科学研究,2019,32(11):1936-1944.
TANG Taotao, LI Jiang, WU Yonggui, *et al.* Effects of different types of straw on sludge anaerobic digestion characteristics and bacterial community structure [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(11): 1936-1944.
- [21] 曹秀芹,陈爱宁,甘一萍,等.污泥厌氧消化技术的研究与进展[J].环境工程,2008,26(S1):215-219.
CAO Xiuqin, CHEN Aining, GAN Yiping, *et al.* New development of anaerobic digestion technology of sewage sludge[J]. Environmental Engineering, 2008, 26(S1): 215-219.
- [22] KELESSIDIS A, STASINAKIS A S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries[J]. Waste Management, 2012, 32(6): 1186-1195.
- [23] CHEN Sisi, LI Ning, DONG Bin, *et al.* New insights into the enhanced performance of high solid anaerobic digestion with dewatered sludge by thermal hydrolysis: organic matter degradation and methanogenic pathways [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 342: 1-9.
- [24] PILLI S, YAN S, TYAGI R D, *et al.* Thermal pretreatment of sewage sludge to enhance anaerobic digestion: a review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2015, 45(6): 669-702.
- [25] XUE Yonggang, LIU Huajie, CHEN Sisi, *et al.* Effects of thermal hydrolysis on organic matter solubilization and anaerobic digestion of high solid sludge[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 264: 174-180.
- [26] DUAN Nina, DONG Bin, WU Bing, *et al.* High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: feasibility study [J]. Bioresource Technology, 2012, 104: 150-156.
- [27] WANG Guopeng, DAI Xiaohu, ZHANG Dong, *et al.* Two-phase high solid anaerobic digestion with dewatered sludge: improved volatile solid degradation and specific methane generation by temperature and pH regulation [J]. Bioresource Technology, 2018, 259: 253-258.
- [28] YU Zhen, TANG Jia, LIAO Hanpeng, *et al.* The distinctive microbial community improves composting efficiency in a full-scale hyperthermophilic composting plant [J]. Bioresource Technology, 2018, 265: 146-154.
- [29] 严兴,侯毛宇,李碧清,等.微生物发酵菌和生物质炭及蘑菇渣对污泥堆肥效果的影响[J].环境科学研究,2018,31(1):136-142.
YAN Xing, HOU Maoyu, LI Biqing, *et al.* Effects of microbial inoculant, biomass charcoal and mushroom residue on sludge composting [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(1): 136-142.
- [30] MARGARITIS M, PSARRAS K, PANARETOU V, *et al.* Improvement of home composting process of food waste using different minerals [J]. Waste Management, 2018, 73: 87-100.
- [31] MENG Xingyao, DAI Jiali, ZHANG Yue, *et al.* Composted biogas residue and spent mushroom substrate as a growth medium for tomato and pepper seedlings [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 216: 62-69.
- [32] 陈俊,陈同斌,高定,等.城市污泥好氧发酵处理技术现状与对策[J].中国给水排水,2012(11):112-115.
CHEN Jun, CHEN Tongbin, GAO Ding, *et al.* Current status and countermeasures of aerobic fermentation technologies for sewage sludge treatment in China [J]. China Water & Wastewater, 2012(11): 112-115.
- [33] SANTOS C, GOUFO P, FONSECA J, *et al.* Effect of lignocellulosic and phenolic compounds on ammonia, nitric oxide and greenhouse gas emissions during composting [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 548-556.
- [34] WANG Xiankai, ZHENG Guodi, CHEN Tongbin, *et al.* Application of ceramicsite and activated alumina balls as recyclable bulking agents for sludge composting [J]. Chemosphere, 2019, 218: 42-51.
- [35] PAN Tianhao, CHEN Tongbin, GAO Ding, *et al.* Comparison of cassava distillery residues and straw as bulking agents for full-scale sewage sludge composting [J]. Compost Science & Utilization, 2017, 25(1): 1-12.
- [36] WANG Xiankai, ZHENG Guodi, CHEN Tongbin, *et al.* Effect of phosphate amendments on improving the fertilizer efficiency and reducing the mobility of heavy metals during sewage sludge composting [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 235: 124-132.
- [37] WU Juan, ZHANG Aiguo, LI Guoxue, *et al.* Effect of different components of single superphosphate on organic matter degradation and maturity during pig manure composting [J]. Science of the Total Environment, 2019, 646: 587-94.