

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.16.010

水热碳化技术用于污泥处理处置前景分析

许 劲^{1,2}, 徐 军^{1,2}, 吕秋颖^{1,2}, 范 准^{1,2}, 唐 琦^{1,2}, 李 杨^{1,2},
方俊华^{1,2}

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 由于土地利用受阻、填埋空间有限以及二次污染等问题,污泥处理处置主流技术路线在国内面临困境,所以亟需从科学方法角度分析其可行路径。根据污泥处置途径对含水率的要求,建议当污泥水分存在时先去或转化有机物;同时从生物质转化技术角度进行了可行性分析,其中水热碳化技术具有处理对象无需干燥、易与其他废弃生物质及技术组合、产物无菌、磷回收率高等优势。污泥基水热生物炭有固-固转化和液相晶核转化两条形成途径,其热值与煤相当,脱水性能良好、磷富集回收率高、可固定重金属,其碳骨架作为氮磷缓释载体可增加土壤肥力,而且与无机肥减量配施兼具农业经济价值和环境生态效益。污泥水热碳化处理可实现污泥减量化、稳定化、无害化和资源化,推荐污泥处理处置方案为重力浓缩/机械脱水+水热碳化,该工艺适用于原位与分散处理,同时建议采用低温(150~170℃)水热碳化以避免高温下污泥发生美拉德反应生成溶解性难降解有机物,其液体产物可作为有效碳源补充到低碳源污水厂进水。

关键词: 水热碳化; 污泥处理处置; 生物质转化技术; 污泥基水热生物炭

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)16-0054-06

Perspectives on Hydrothermal Carbonization Technology for Municipal Sludge Treatment and Disposal

XU Jin^{1,2}, XU Jun^{1,2}, LÜ Qiu-ying^{1,2}, FAN Zhun^{1,2}, TANG Qi^{1,2}, LI Yang^{1,2},
FANG Jun-hua^{1,2}

(1. School of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Ecological Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Due to hindered agriculture use and limited space for landfill as well as secondary pollution, the mainstream technology route of municipal sludge treatment and disposal is facing difficulties in China. So it is urgent to analyze its feasible path from scientific approaches. According to requirements of moisture content in sludge disposal process, it is suggested to remove or transform organic matter when sludge moisture exists. Meanwhile, the feasibility analysis is carried out from the point of view of biomass conversion technology. Among them, hydrothermal carbonization (HTC) technology has the advantages of treating object without drying, easy to combine with other waste biomass and technology, sterile

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07401001-02); 中央高校基本科研业务费资助项目(2019CDCGCH339)

product and high recovery rate of phosphorus. Sludge-based hydrothermal biochar has two formation pathways, which are solid – solid and liquid phase nucleation transformations. It has the same calorific value as coal, good dehydration performance, high phosphorus enrichment recovery rate, and could fix heavy metals. Its carbon backbone could be used as a slow-release carrier of nitrogen and phosphorus so as to increase soil fertility. Moreover, the biochar with inorganic fertilizer reduction and application has both functions of agricultural economic value and environmental ecological benefits. Sludge HTC treatment could realize sludge reduction, stabilization, harmlessness and resource recovery. As a result, the process of gravity concentration/mechanical dehydration + HTC was taken as the recommended sludge treatment and disposal scheme, which was suitable for in situ and decentralized processing. In addition, low temperature (150 – 170 °C) in HTC was suggested to prevent soluble refractory organics generating from Maillard reaction during high temperature, consequently, the liquid product could be used as an effective carbon source to supplement the low-carbon WWTP.

Key words: hydrothermal carbonization; municipal sludge treatment and disposal; biomass conversion technology; sludge-based hydrothermal biochar

污泥处理是指对污泥进行减量化、稳定化、无害化的过程,一般包括污泥脱水、干化、热水解、消化和堆肥等,污泥处置是指污泥的最终消纳,一般包括填埋、焚烧、建材和土地利用等,处理与处置相辅相成。

污泥减量化包括污泥体积与污泥质量的减少,前者一般采用浓缩、脱水、干化等技术,后者一般采用消化、焚烧等技术;稳定化是指污泥中的固体物质、产生气味的物质和病原菌得到减少,包括实现稳定化的方法与污泥经稳定化处理后所处的状态^[1]。稳定化处理工艺主要有厌氧消化、好氧发酵、干化焚烧、热解(碳化)等;污泥无害化包括污泥稳定、减少污泥中致病菌和寄生虫卵数量等,主要通过高温厌氧、高温堆肥、焚烧、碳化等高温技术实现无害化,而污泥在土地利用前必须经过无毒无害化处理。

目前污泥处理处置的主流技术路线有 4 种:①基于厌氧消化的处理处置工艺[重力浓缩(预处理+热水解)+厌氧消化+机械脱水+干化+土地利用];②基于好氧发酵的处理处置工艺(机械脱水+高温好氧发酵+土地利用);③深度脱水+应急填埋的处理处置工艺(调理/预处理+深度机械脱水+填埋);④干化焚烧处理处置工艺(机械脱水+热媒干化+焚烧)。前 3 条技术路线都是以土地利用或填埋为出路,但是目前沼渣难以消纳,国家相关部门也不让堆肥腐熟的污泥进入农田,三者处置路径不通。由于污泥汇聚污水中大部分难生物降解污染物包括重金属、持久性有机物、寄生虫卵等,大部分未经严格的无害化处理而直接填埋,对土

地造成二次污染,部分地区甚至将未经处理的污泥随意丢弃至荒山或河道,不仅降低了污水系统的有效处理能力,而且严重威胁人类活动和生态环境。

干化焚烧技术利用脱水污泥具有一定热值的特点来处理污泥,可实现减量化、稳定化、无害化、资源化,尤其适用于土地紧张地区,通常被认为投资和运行费用高而不适用于发展中国家。近来有专家对该工艺进行了能量衡算以及投资和运行成本匡算,并与传统厌氧和高级厌氧工艺进行了对比,结果表明污泥干化后直接焚烧在污泥全生命周期处理处置方面最佳,同时还能从焚烧灰分中回收磷等资源^[2]。

现有主流技术路线行之不畅、高端的污泥焚烧工艺还未被广泛接受,面对污泥处理处置的困境,亟需从科学方法角度分析其可行路径,以期系统分析和解决问题。

1 污泥处理处置途径与生物质转化技术

1.1 污泥处理处置途径分析

碳中和污水厂的核心是资源和能源的高效回收利用^[3],因此污泥资源化至关重要。污泥资源化主要包括污泥厌氧消化产甲烷回收生物能源、土地利用、建材利用等。污泥土地利用主要利用其中的营养元素和稳定化的有机物,污泥建材化主要利用其中的无机物,两者都需要去除水分并转化有机物,而污泥中的水分、有机物、无机物三者互相制约,例如污泥有机物含量及其组成影响水分的去除效率,而水分和无机物也会影响污泥有机物的燃烧转化。

目前各种处置方法对污泥含水率都有明确要

求,其核心环节是脱除水分。由于污泥脱水效果取决于水分存在形态即污泥颗粒结构与有机物构成,如果能在污泥脱水前尽量将有机物转变为近似无机物,就可大幅改善脱水效果,因此从分质处理与系统优化的角度,建议在水分存在时首先尽量去除或转化有机物,然后去除水分,最后处置或利用无机物与有机物转化产物的混合物。

1.2 生物质转化技术

生物质能是指太阳能以化学能形式贮存在生物质中的能量形式,通过一定的技术手段将蕴藏在其中的能量进行释放,可实现生物质能的利用。根据产物形态,生物质转化利用技术可分成4类:直接燃烧、固体转化技术、液体转化技术和气体转化技术^[4]。直接燃烧属传统生物质热化学转化方法,是将生物质作为燃料转换成能量的过程,可分为炉灶燃烧、锅炉燃烧、垃圾焚烧和成型燃料燃烧等方式。固体转化技术主要包括固化压缩成型和碳化,分别可得到成型燃料和生物质炭,其中,碳化是指生物质在缺氧环境下经过碳化反应得到高能量密度的生物炭,通常可分为热解碳化和水热碳化,两者分别在惰性气氛和水溶剂中进行,经过碳化过程脱氧,所得生物炭热值较高,应用广泛。生物质液体转化技术以制取液体燃料为目标,主要包括转酯化制取生物柴油、生物酶转化制取燃料乙醇、热裂解和液相分解制取生物油。生物质气体转化技术主要有生物质气化和厌氧消化,生物质气化是在高温条件下生物质经过干燥、裂解、氧化反应和还原反应等过程之后裂解成 H_2 、CO、小分子烃类以及 CO_2 等分子质量较低混合物的过程,经过合成可进一步转化为甲醇、乙醇等液体燃料。气化技术转化效率高,但存在复杂程度高、焦油较难脱除、储存和运输不便等问题,其发展受到了一定程度的制约^[4]。

从生物质转化角度看,基于厌氧消化的技术路线属于生物质气体转化类型,干化焚烧技术路线属于直接燃烧类型,生物质液体转化技术处理污泥的投资运行费用很高,国内现阶段还难以应用,而生物质固体转化技术尚未进入该领域。鉴于目前热解炭化技术已用于处理危险废弃物,故笔者着重分析水热碳化技术用于污泥处理处置的前景。

2 污泥水热碳化技术

2.1 水热碳化技术原理与优势

水热碳化是指在密闭体系中,以污泥等废弃生

物质为原料、以水为反应媒介,在一定温度($150 \sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$)及自生压力下,原料经水解、脱水、脱羧、缩聚和芳香化反应,碳含量提高、氢氧含量降低并生成高能量水热生物炭的过程^[5]。在此放热过程中,污泥中的水处于亚临界状态,随着温度升高,水中规律的氢键变得脆弱直至断开^[6],基本结构的变化使水同时作为溶剂、催化剂和反应物^[7],此时水既具有液体的流动性又具有气体的渗透性,可渗透到微生物絮体及细胞内实现破壁^[8],表现为COD和氨氮浓度升高^[9]。处理后的污泥含水率降至50%左右^[10],脱水性能明显提高。

水热碳化法是将生物质转化为更高能量密度形式的一种有效途径,其优势在于^[11]:①原料无需干燥,应用范围广,处理对象多样化(干或湿,混合或单一);②易与其他技术组合,将固体废弃物转化成有应用价值的产品(如炭、燃料、有机产品等),实现资源化;③作为彻底去除病原菌的卫生方法,产物无菌,可同时实现废弃物减量;④磷回收潜力大。

2.2 污泥基水热生物炭形成途径与性能

污泥基水热生物炭主要有两条形成途径:一是固-固转化,污泥经过脱挥发分、缩聚、脱水、脱羧等,结构改变,芳香度提高,直接转化为类煤样生物炭^[12];二是液相中的溶解性有机物以及水解后产生的中间体分子经过单体脱水并诱发聚合反应,聚合物在高温作用下进一步芳构化,当芳香度达到饱和浓度后即形成晶核,并向四周均匀生长成碳微球(二次生物炭)沉淀在固相产物表面^[13]。另外,在高温下污泥结构发生变化,其表面积和孔隙率均得到了较大提高,比表面积的提高和官能团的增加使生物炭更容易吸附液相中溶解性和疏水性的有机分子,这部分有机物通过范德华力、氢键等构成了生物炭的一部分^[14]。

① 生物炭热值。污泥属于废弃生物质,其热值与污泥挥发分含量特别是含碳量密切相关。未处理的干污泥热值一般为 $6 \sim 11\text{ MJ/kg}$,经水热碳化处理后,污泥基生物炭热值($14.4 \sim 27.2\text{ MJ/kg}$)明显提高,与褐煤(16.3 MJ/kg)、烟煤($17 \sim 23.25\text{ MJ/kg}$)、木炭(23 MJ/kg)热值相当^[13]。

② 生物炭脱水性能。水热碳化反应由于脱水脱羧消去了羟基和羧基,使得污泥基生物炭的H/C和O/C比例降低,而O/C比例降低表示生物炭的亲水性能比污泥有所降低,处理后污泥含水率降至

50% 左右^[10], 可通过机械脱水将含水率进一步降至 20% ~ 30%^[11], 脱水性能明显提高, 说明水热碳化技术跨越了热能干化阶段, 突破了污泥机械能脱水的瓶颈。污泥厌氧消化是无需脱除水分实现生物转化的重要途径之一, 而污泥水热碳化处理技术提供了生物转化的另一条路径。

③ 磷回收。市政污泥中磷的形态与污水来源和工艺有关, 大致可分为无机磷、有机磷化物、聚磷酸盐等。水热碳化反应发生在液相而且环境相对均匀, 反应物元素之间相互作用自由度高, 故对磷的迁移及形态转化影响较大^[11,15]。在高温高压条件下, 污泥中有机质充分反应, 包括有机磷在内的所有磷形态均向正磷酸盐转化, 同时, 储存于聚磷菌细胞内的有机和无机磷化物释放出来, 进一步转化为正磷酸盐^[16], 随后金属离子如钙、镁、铜、锌等与正磷酸盐形成络合物, 沉淀在生物炭或吸附在矿物质(如铁、铝氧化物)上而被捕集^[17]; 污泥中的无机磷化物经过溶解和重组/重结晶形成更加稳定的磷化物^[15]。同时, 水解阶段产生的大量有机酸使系统呈酸性, 有利于有机磷转化为无机磷、磷灰石态无机磷向非磷灰石态无机磷转化^[18], 说明磷形态在酸性条件下趋于稳定。故污泥经水热碳化处理后, 磷的回收率可达 89.3% ~ 101.3%^[19], 是目前最高效的磷富集回收方式之一。而从污泥中回收磷已是大势所趋, 德国已于 2017 年 9 月出台强制磷回收政策。

④ 固定重金属。污泥水热碳化可将大部分重金属富集在固相产物中^[20], 并抑制其活性, 以稳定、不表现生态毒性的络合态或残渣态固定在生物炭中^[21], 其实质是重金属在固相和液相的再分配, 取决于溶解、沉淀和吸附等过程^[22]; 少量转移到液相的金属离子作为催化剂, 促进液相中的有机物向碳微球转化。生物炭中的重金属总量低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 中对污泥农用的浓度限值^[23]。

⑤ 土地利用。生物炭能够增加土壤肥力、提高作物产量, 是学者们通过观察大量实验现象得出的事实, 其具体机理还有待探究。国际生物炭协会指出, 无机肥减量配施生物炭具有农业经济价值和环境生态效益双重功能。生物炭具有多芳香环和非芳香环的复杂结构, 使其表现出高度的化学和微生物惰性, 施进土壤后难以被土壤微生物利用, 同时由于其复杂成分中丰富的碳水化合物、长链烯烃等有

机大分子, 具有与土壤中的矿物质形成有机无机复合体的功能活性。生物炭的碳骨架起着载体作用, 实现了炭质-矿物质-化肥的团聚体结合, 而受益于该物理保护作用, 降低了土壤微生物对施入生物炭的作用, 延缓了化肥的快速溶解释放, 有利于生物炭中的氮、磷元素长期固持。同时, 生物炭因具有较高吸附性能、阳离子交换量和化学反应特性而被视为肥料的缓释载体, 能降低氮、磷等土壤养分向地下水或地表水的淋溶与冲刷流失, 并维持农作物生长期土壤的肥力^[16]。

与热解生物炭相比, 水热生物炭具有更多数量的含氧官能团, 说明水热碳化保留了更多的活性位点及稳定的 C—O 化合物^[24], 这预示着水热炭在促进土壤对污染物的吸附、固定并降低其生态威胁方面可能更具优势。

将污泥基生物炭作为土壤改良剂施入土壤, 不仅为污泥资源化利用提供了新途径, 而且对防止农田土壤养分流失、缓解农业面源污染具有重要意义。

3 污泥水热碳化处理工艺流程推荐

3.1 推荐工艺流程

污泥水热碳化处理推荐工艺流程见图 1。

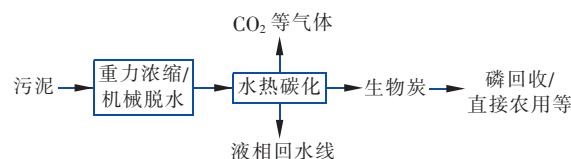


图 1 污泥水热碳化处理推荐工艺流程

Fig. 1 Recommended HTC technology scheme for sludge treatment and disposal

3.2 工艺优势

① 实现减量化、稳定化、无害化和资源化

a. 污泥经水热碳化处理转变为含水率 50% 左右的生物炭, 固体密度增大, 污泥减量明显。

b. 经水热碳化处理后, 污泥中有机物降解率为 30% ~ 50%, 与反应条件直接相关, 而且污泥中有机物的主要成分碳大部分都保留在了生物炭中^[10,25], 固碳也是稳定化的一种方式。

c. 污泥经水热碳化处理, 产物均无菌, 特别有利于后续利用或处理; 污泥中大部分重金属被富集并稳定固着在生物炭中, 而且重金属总量低于污泥农用的浓度限值。

d. 生物炭可作土壤改良剂, 同时实现磷回收或直接农用及重金属固定; 液相因溶解、水解作用而含

有丰富的有机物^[10],可进一步回收利用。

② 适于原位和分散处理

水热碳化适于在城镇污水厂的泥区原位处理污泥,固液分离后的液相回到进水处。由于水热碳化过程条件相对温和,所得生物炭稳定无毒、易于处理和存储,在分散型或小规模应用方面具有明显优势。

③ 低温液相产物可作有效碳源进入污水系统

污泥经水热碳化处理后,液相产物富含 COD 和氨氮。为抑制高温下发生美拉德反应,建议采用相对较低反应温度(150~170℃),所得液相产物主要为生物可降解有机物如乙酸、苯乙酸、丁酸等^[10],故可作为碳源补充到现有碳源限制型污水厂进水中。

根据现有实测数据(污泥液相 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 20 000 mg/L 和 1 000 mg/L)^[10,24],以处理规模 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的城镇污水处理厂为例,分析液相产物回流对污水厂进水水质的影响。

假设污水厂进水 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 250 mg/L 和 30 mg/L,污泥产量取值为 5 m^3 污泥/ 10^4 m^3 污水(污泥含水率为 80%),则该厂每日 80% 含水率的污泥产量为 25 m^3 。进入水热碳化装备的污泥含水率以 90% 计,每日反应所得液相产物体积不超过 90% 含水率的污泥,则液相产物的体积约为 50 m^3 。将液相产物与该污水处理厂的进水混合后,可得 COD 为 269.7 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 31.0 mg/L。可见,将污泥水热碳化液回流至进水,可使进水 COD 增加约 20 mg/L,即浓度提高 8% 左右,而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加约 1 mg/L,即浓度提高 3% 左右。COD 和氨氮浓度仍在城镇污水处理厂正常进水水质范围内。

4 建议

水热碳化技术处理污泥可实现减量化、稳定化、无害化和资源化,应引起业界重视。目前污泥水热碳化处理技术在国内尚无工业规模应用的具体参数,亟需进行机理研究和系列装备研发,并开发新的检测方式,对水热处理过程进行原位观测,以实现对该过程及所获产物的精确控制。同时,希望主管部门能准确核定污泥处理处置价格,有效落实污泥处理处置的投资和运行费用,加强污泥与土地以及农用标准之间的衔接,重视生物炭的生态功能,促进污泥处理处置行业健康发展。

参考文献:

[1] 梅晓洁,唐建国,张悦. 城镇污水处理厂污泥稳定化

处理产物转化机理及可利用价值揭示[J]. 给水排水,2018,44(11):11-19.

Mei Xiaojie, Tang Jianguo, Zhang Yue. Transformation mechanism of the sludge stabilization process and the products value in municipal wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44 (11): 11-19 (in Chinese).

[2] 郝晓地,陈奇,李季,等. 污泥干化焚烧乃污泥处理/处置终极方式[J]. 中国给水排水,2019,35(2):35-42.

Hao Xiaodi, Chen Qi, Li Ji, et al. Ultimate approach to handle excess sludge: Incineration and drying [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (2): 35-42 (in Chinese).

[3] 郝晓地,方晓敏,李季,等. 污水碳中和运行潜能分析[J]. 中国给水排水,2018,34(10):11-16.

Hao Xiaodi, Fang Xiaomin, Li Ji, et al. Analysis of potential in carbon-neutral operation of WWTPs [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (10): 11-16 (in Chinese).

[4] 林海周. 生物质碳水化合物液相催化转化制取呋喃类平台化合物研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.

Lin Haizhou. Liquid-phase Catalytic Conversion of Biomass-Derived Carbohydrates into Furanic Platform Chemicals [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017 (in Chinese).

[5] Xu X W, Tu R, Sun Y, et al. The influence of combined pretreatment with surfactant/ultrasonic and hydrothermal carbonization on fuel properties, pyrolysis and combustion behavior of corn stalk [J]. Bioresour Technol, 2019, 271: 427-438.

[6] Patel B, Guo M, Izadpanah A. A review on hydrothermal pre-treatment technologies and environmental profiles of algal biomass processing [J]. Bioresour Technol, 2016, 199: 288-299.

[7] Nakason K, Panyapinyopon B, Kanokkantarapong V, et al. Characteristics of hydrochar and liquid fraction from hydrothermal carbonization of cassava rhizome [J]. J Energy Inst, 2017, 91 (2): 184-193.

[8] Xu X W, Jiang E C. Treatment of urban sludge by hydrothermal carbonization [J]. Bioresour Technol, 2017, 238: 182-187.

[9] Wang L P, Li A M, Chang Y Z. Relationship between enhanced dewaterability and structural properties of hydrothermal sludge after hydrothermal treatment of excess sludge [J]. Water Res, 2017, 112 (1): 72-82.

- [10] Danso-Boateng E, Shama G, Wheatley A D. Hydrothermal carbonization of sewage sludge: Effect of process conditions on product characteristics and methane production[J]. *Bioresour Technol*, 2015, 177: 318 – 327.
- [11] Huang R X, Fang C, Lu X W. Transformation of phosphorus during (hydro) thermal treatments of solid biowastes: Reaction mechanisms and implications for P reclamation and recycling[J]. *Environ Sci Technol*, 2017, 51: 10284 – 10298.
- [12] Afolabi O O D, Sohail M, Thomas C L P. Characterization of solid fuel chars recovered from microwave hydrothermal carbonization of human biowaste [J]. *Energy*, 2017, 134: 74 – 89.
- [13] Lu X J, Jiang C H, Hu Y L, *et al.* Preparation of hierarchically porous carbon spheres by hydrothermal carbonization process for high-performance electrochemical capacitors [J]. *J Appl Electrochem*, 2018, 48(2): 233 – 241.
- [14] Chen X F, Ma X Q, Peng X W, *et al.* Conversion of sweet potato waste to solid fuel via hydrothermal carbonization[J]. *Bioresour Technol*, 2018, 249: 900 – 907.
- [15] Huang R X, Fang C, Zhang B. Transformations of phosphorus speciation during (hydro) thermal treatments of animal manures[J]. *Environ Sci Technol*, 2018, 52: 3016 – 3026.
- [16] Huang R X, Tang Y Z. Speciation dynamics of phosphorus during (hydro) thermal treatments of sewage sludge[J]. *Environ Sci Technol*, 2015, 49: 14466 – 14474.
- [17] Chen X J, Lin Q M, He R D, *et al.* Hydrochar production from watermelon peel by hydrothermal carbonization[J]. *Bioresour Technol*, 2017, 241: 236 – 243.
- [18] Wang T, Zhai Y B, Zhu Y, *et al.* Feedwater pH affects phosphorus transformation during hydrothermal carbonization of sewage sludge [J]. *Bioresour Technol*, 2017, 245: 182 – 187.
- [19] Huang R X, Tang Y Z. Evolution of phosphorus complexation and mineralogy during (hydro) thermal treatments of activated and anaerobically digested sludge: Insights from sequential extraction and P K-edge XANES[J]. *Water Res*, 2016, 100: 439 – 447.
- [20] Liu T T, Liu Z G, Zheng Q F, *et al.* Effect of hydrothermal carbonization on migration and environmental risk of heavy metals in sewage sludge during pyrolysis [J]. *Bioresour Technol*, 2018, 247: 282 – 290.
- [21] 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 Res*, 2015, 68: 291 – 303.
- [22] Huang R X, Zhang B, Saad E M. Speciation evolution of zinc and copper during pyrolysis and hydrothermal carbonization treatments of sewage sludges [J]. *Water Res*, 2018, 132: 260 – 269.
- [23] Zhang J H, Lin Q M, Zhao X R. The hydrochar characters of municipal sewage sludge under different hydrothermal temperatures and durations [J]. *J Integrative Agric*, 2014, 13(3): 471 – 482.
- [24] 赵丹, 张琳, 郭亮. 水热碳化与干法碳化对剩余污泥的处理比较[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(10): 78 – 83.
- Zhao Dan, Zhang Lin, Guo Liang. Comparison of hydrothermal carbonization and dry pyrolysis for domestic wastewater sludge treatment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(10): 78 – 83 (in Chinese).
- [25] Afolabi O O D, Sohail M. Comparative evaluation of conventional and microwave hydrothermal carbonization of human biowaste for value recovery [J]. *Water Sci Technol*, 2017, 75(12): 2852 – 2863.



作者简介:许劲(1968 –),女,湖北武汉人,博士,教授,主要从事可持续废水废物处理技术、高盐高浓度难降解工业废水处理、水环境综合治理及水污染控制系统规划的研究与实践。

E – mail: xujinglily@163.com

收稿日期: 2019 – 07 – 08