

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.004

山地城市污泥水热炭化产物特性研究

许 劲^{1,2}, 范 准^{1,2}, 吕秋颖^{1,2}, 唐 琦^{1,2}, 李 杨^{1,2}, 李遥瑶^{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: 以山地城市污水处理厂未添加化学调理剂的浓缩污泥为原料,通过设置 200、220、240、260 ℃ 这 4 个反应温度和 2、4、6 h 这 3 个反应时间共 12 组实验,探究反应温度和反应时间对污泥水热炭化固相和液相产物的影响。结果表明,随着反应温度和时间的增加,污泥水热炭产率从 69.32% (200 ℃ - 2 h) 降至 59.49% (260 ℃ - 6 h),同时水热炭中的官能团 O—H、C—H 和 C=C 逐渐降解,H/C 值和 O/C 值(物质的量之比)减小,水热炭的脱羧和芳构化反应增强。整体而言,升高反应温度比延长反应时间对污泥水热炭化的影响更大。BMP(产甲烷潜力)实验表明,随着反应温度的升高,液相产物中难降解有机物含量增加,而且其中的苯酚和呋喃衍生物等复杂有机物对厌氧反应具有抑制作用,累积甲烷产量随之降低。随着反应温度和时间的增加,C 含量呈上升趋势,而 H、O 和 N 含量反之,水热炭的高位热值(HHV)、能量密度和能量产率均低于污泥原料。污泥的高含砂量对水热炭的元素含量和热值影响显著,建议对污泥含砂量进行有效控制。

关键词: 山地城市; 污泥; 含砂量; 水热炭化; 反应时间; 反应温度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)21-0021-08

Characteristics of Hydrothermal Carbonization Products of Municipal Sludge in Mountainous Cities

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

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of Three Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Effects of reaction temperature and time on solid and liquid hydrothermal carbonization products of the concentrated sludge without adding chemical conditioner in a wastewater treatment plant of a mountainous city were investigated. Twelve groups of experiments were set up by setting four reaction temperatures (200 ℃, 220 ℃, 240 ℃ and 260 ℃) and three reaction times (2 h, 4 h and 6 h). With the increase of reaction temperature and time, the yield of sludge-based hydrothermal charcoal decreased from 69.32% (200 ℃ and 2 h) to 59.49% (260 ℃ and 6 h), the functional groups of O—H, C—H and C=C were gradually degraded, H/C value and O/C value decreased, and the decarboxylation and

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07401001-02)

通信作者: 许劲 E-mail: xujinglily@163.com

aromatization reactions of hydrothermal charcoal were enhanced. Overall, increasing reaction temperature had a greater impact on hydrothermal carbonization of sludge than extending reaction time. Biochemical methane potential (BMP) experiments indicated that the content of refractory organics in liquid products increased with the increase of reaction temperature, complex organics such as phenol and furan derivatives inhibited the anaerobic reaction, and the cumulative methane production decreased accordingly. With the increase of reaction temperature and time, the carbon content showed an upward trend, while the contents of hydrogen, oxygen, and nitrogen decreased, and the high heat value (HHV), energy density, and energy yield of hydrothermal charcoal were all lower than those of the raw sludge. The high sand content of sludge had a significant influence on the element content and HHV of hydrothermal charcoal. It was suggested to control the sand content of sludge effectively.

Key words: mountainous city; sludge; sand content; hydrothermal carbonization; reaction time; reaction temperature

随着人口的增长和生活水平的提高,城市污水处理厂的污泥产量也逐年增加。山地城市的污泥处理处置不仅存在着环境污染风险以及处理成本高、资源化率低等问题^[1-2],同时还面临高含砂量的挑战。以山地城市重庆为例,由于砂壤质地土壤本身易侵蚀,导致水土流失严重;而重庆降雨峰值较大、雨型急促,短时间内易形成强降雨,加剧了水土流失,强化了合流雨污水的冲刷作用,大量小粒径砂粒随污水进入污水处理厂^[3];另外,为保留碳源提高生物脱氮除磷效率,大多数污水厂未设置初沉池^[4],不能有效去除小于0.2 mm的特细砂,直接导致剩余污泥的含砂量高。因此,重庆市污水处理厂活性污泥的MLVSS/MLSS值仅为25%~40%^[5],而相邻平原城市成都的大部分污水厂该值高达60%,北方平原城市多为45%~60.2%^[6]。

目前我国市政污泥处理处置的主流工艺有厌氧消化、干化焚烧和填埋等^[7],填埋依赖场地而不具可持续性,而厌氧消化和污泥干化都受制于污泥的高含砂量,如重庆鸡冠石污水处理厂的厌氧消化系统^[8]和上海石洞口污水处理厂的干化焚烧系统^[9]。因此,山地城市污泥的处理处置除了需要有效降低含砂量外,还需探索其他路径。

水热炭化是一种在180~260℃、自生压力下持续反应数小时,将生物质转化成水热炭的热化学过程^[10],包含水解、脱水、脱羧、聚合和芳构化等复杂的化学反应,受温度和时间等参数影响^[11]。水热炭化可将污泥转化为性能良好的水热炭^[12],同时产生有机物浓度高、黑褐色、有特殊气味的水热液相产物,后续可通过厌氧消化技术实现资源化利

用^[13-14]。污泥水热炭化处理可实现减量化、稳定化、无害化和资源化,是污泥处理处置的可能技术路径之一。目前污泥水热炭化实验常采用含水率为80%左右的脱水污泥,含无机/有机高分子混凝剂等化学调理剂,增加了环境和健康风险^[2];若直接采用含水率为99%的剩余污泥作为反应原料,则会降低单位干污泥的能源效率。因此,笔者所在课题组采用重力浓缩污泥进行水热炭化实验,不仅降低了药剂成本,而且水热炭化产物更具环境友好性,还可探索泥线的工艺革新之路。笔者针对山地城市污泥因含砂量高、有机物含量低而面临的处理处置困境,以重庆某污水处理厂浓缩污泥为原料,探究不同反应温度和时间条件下水热炭的理化性质变化趋势,以及水热液的厌氧产甲烷性能,旨在为高含砂量污泥的水热炭化处理提供参考。

1 材料与方法

1.1 污泥原料

污泥原料取自重庆某污水处理厂,为市政污水经氧化沟工艺处理后进入浓缩池的污泥,含水率为94.30%。新鲜污泥样品取回后放入0~4℃冰箱中冷藏保存。实验用污泥样品的基本性质如下:C、H、O、N、S含量分别为14.83%、3.16%、16.80%、2.74%、0.56%,灰分为61.91%,pH值为5.85。

1.2 水热炭化实验设计

水热炭化反应设定了200、220、240、260℃这4个温度,以及2、4、6h这3个反应时间,共12组实验。将混合均匀的污泥原料倒入容积为1L的水热炭化反应釜并密闭,使釜体内压强保持在设定温度的饱和大气压。反应温度通过温控仪调节,搅拌器

的转速设置为 300 r/min,到达反应温度后开始计时,到达指定反应时间后停止加热。待反应釜自然冷却至环境温度后,采用真空抽滤的方式对水热炭化产物进行固液分离,固体产物在 105 ℃ 的烘箱中干燥 24 h 后即水热炭,称量后储存待用;液相产物倒入棕色玻璃瓶中,于 0~4 ℃ 冰箱中保存待测。

1.3 BMP (产甲烷潜力) 实验设计

本实验以 200 ℃ -6 h、220 ℃ -6 h、240 ℃ -6 h、260 ℃ -6 h 反应条件下污泥水热炭化后的液相产物为底物,以重庆某垃圾填埋场厌氧发酵液为接种物,在 (37 ± 1) ℃ 中温条件下,采用全自动甲烷潜力测试系统对液相产物进行厌氧产甲烷测试,以探究水热炭化反应温度对液相产物厌氧产甲烷潜力的影响。厌氧发酵单元为 500 mL 带搅拌的带塞血清瓶,设置接种比为 3 (接种物 VS : 底物 VS),且统一各组接种物 VS 均为 1.8 g,底物 VS 均为 0.6 g,随后加入蒸馏水至 350 mL 作为厌氧发酵单元工作体积。反应产生的气体通入 3 mol/L 的 NaOH 溶液以吸收其中的二氧化碳和酸性气体,然后通过导气管进入气体体积测量单元。通过该测试系统记录每组血清瓶的累积产甲烷体积,直到连续 3 d 的日甲烷产量 < 甲烷累积产量的 1% 时,停止实验。

1.4 检测指标与方法

元素分析:采用 Unicube 型元素分析仪测定样品的 C、H、N 和 S 含量,并通过差减法确定 O 含量;灰分含量:参照《煤的工业分析方法》(GB/T 212—2008),在马福炉中 815 ℃ 下灼烧到质量恒定,残留物的质量即为样品的灰分质量;傅里叶红外分析 (FTIR):采用 Nicolet iS50 型红外光谱仪,在 400 ~ 4 000 cm⁻¹ 的范围内对样品进行扫描;样品表面形貌观察:采用 S-4800 型场发射扫描电子显微镜 (SEM),实验前需对样品表面进行喷金处理,电子加速电压为 0.5~30 kV;TS 含量:采用恒定重量法,在 105 ℃ 下烘干至恒重,称量;VS 含量:采用灼烧法,在马福炉中 600 ℃ 下灼烧 4~6 h,冷却至恒重,称量。

水热炭的高位热值 (HHV) 根据 Dulong 方程计算,计算公式如下:

$$\text{HHV} = 0.339C + 1.443(H - O/8) + 0.0093S + 0.001494N \quad (1)$$

式中: C、H、O、S、N 为该元素在水热炭中的含量, g/100 g 干污泥。

$$\text{水热炭产率} = (\text{水热炭质量} / \text{原料质量}) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{水热炭的能量密度} = \text{水热炭的热值} / \text{原料的热值} \quad (3)$$

$$\text{水热炭的能量产率} = \text{水热炭的产率} \times \text{能量密度} \times 100\% \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 反应温度和时间对污泥基水热炭产率的影响

不同反应条件下的污泥基水热炭产率如图 1 所示,其范围为 59.49% ~ 69.32%,随着反应温度和时间增加而降低,而且反应温度比反应时间对水热炭产率的影响更大,这与黄玉莹等人^[15]的研究结果一致。当反应时间相同时,提高反应温度则水热炭产率迅速下降,当反应时间为 2 h 时,200 ℃ 与 260 ℃ 的水热炭产率差值达到 8.43%;当反应温度相同时,延长反应时间,水热炭产率变化相对较小,尤其在较高温度时这种情况更加明显,例如,在 260 ℃ 时,2 h 与 6 h 的水热炭产率差值仅为 2.20%,这是因为当达到反应温度后,大量有机物通过水解、脱水、脱羧反应不断分解为可溶性物质转移到液相中,随着反应时间的延长,该温度下剩余的可分解物质的量减少,反应减缓。并且,随着反应时间的增加,部分液相中的中间产物在高温高压下经过聚合和芳构化反应重新回到固相中,从而导致水热炭产率减小的趋势变缓。因此,在本研究中,想要获得更高的水热炭产率,需要适当降低反应温度和时间。

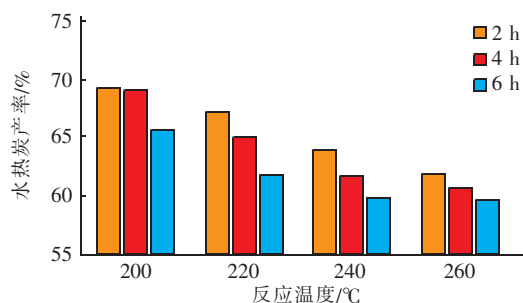


图 1 反应温度和时间对污泥基水热炭产率的影响

Fig. 1 Effect of reaction temperature and time on sludge-based hydrothermal charcoal yield

2.2 污泥基水热炭的元素分析

在水热炭化前后分别对污泥和水热炭进行元素分析,结果见表 1。与污泥相比,水热炭中的 C、H、O 和 N 含量均有不同程度的下降。C 含量随温度和时间增加呈上升趋势,从 8.62% 增加到 11.93%,而

H、O 和 N 含量的变化趋势则相反。这是由于反应过程中污泥中的大量有机物被分解,各元素随之溶解到液相中,导致水热炭中各元素含量整体下降,而灰分含量增加。另一方面,随着温度和时间的增加,脱水脱羧反应强度增加,水热炭中的含氧官能团含量减少,O 含量呈下降趋势。同时,芳构化反应强度也随着温度的上升而增强,使得 H 含量不断降低。此外,液相中的中间产物回到水热炭中,从而使 C 含量不断增加,然而这部分增加的 C 含量并未抵消由于分解和溶解至液相中的那部分 C。因此,尽管水热炭中的 C 含量随温度和时间的增加而呈上升趋势,但是总体仍小于污泥中的 C 含量,这与王定美等人^[16]的研究结果一致,而任杰^[17]的研究结果则相反,即污泥基水热炭中的 C 含量整体随温度和时间的增加而增加,且均大于原料中的 C 含量,这可能是由于城市所处地域(山地或平原城市)、排水管网(合流制或分流制)以及污水处理工艺的不同,使得污泥含砂量差异较大,从而导致污泥水热炭化产物差异显著。

表1 污泥与污泥基水热炭的元素分析

Tab.1 Elemental analysis of sludge and sludge-based hydrothermal charcoal

项 目	元素含量/%					灰分/%	H/C 值	O/C 值
	C	H	O	S	N			
污泥	14.83	3.16	16.80	0.56	2.74	61.91	2.56	0.85
200 ℃ - 2 h	8.62	1.93	12.21	0.44	0.98	75.82	2.69	1.06
200 ℃ - 4 h	8.75	1.89	12.14	0.42	0.96	75.85	2.59	1.04
200 ℃ - 6 h	9.13	1.80	11.71	0.40	0.98	75.98	2.37	0.96
220 ℃ - 2 h	9.94	1.81	10.84	0.44	0.81	76.16	2.19	0.82
220 ℃ - 4 h	10.19	1.68	10.65	0.42	0.83	76.23	1.98	0.78
220 ℃ - 6 h	10.55	1.70	10.19	0.47	0.84	76.25	1.93	0.72
240 ℃ - 2 h	10.71	1.74	7.97	0.46	0.82	78.31	1.95	0.56
240 ℃ - 4 h	10.68	1.70	8.02	0.35	0.81	78.44	1.91	0.56
240 ℃ - 6 h	11.22	1.64	7.56	0.49	0.78	78.32	1.75	0.51
260 ℃ - 2 h	11.20	1.49	5.69	0.40	0.76	80.45	1.60	0.38
260 ℃ - 4 h	11.11	1.56	5.42	0.56	0.72	80.63	1.68	0.37
260 ℃ - 6 h	11.93	1.39	4.85	0.56	0.69	80.58	1.40	0.30

注: H/C 值和 O/C 值均为物质的量之比。

H/C 值通常用来表征物质的芳香性,H/C 值越低,则芳香性越高;而 O/C 值与水热炭的含氧官能团有关,可反映脱羧反应的剧烈程度^[18-19]。如表1所示,随着水热炭化温度和时间的增加,H/C 值降低,说明水热炭的芳香性升高,芳构化反应程度高;同时 O/C 值降低,说明其脱羧反应程度随温度和时

间的增加而增强。水热炭化后,呋喃和苯酚类有机物含量增加,印证了此分析结果^[20]。

2.3 污泥基水热炭的能量分析

根据2.2节中的元素分析结果,结合 Dulong 公式可以计算水热炭高位热值、能量密度和能量产率等参数,结果见表2。

表2 污泥与污泥基水热炭的能量分析

Tab.2 Energy analysis of sludge and sludge-based hydrothermal charcoal

项 目	HHV/(MJ · kg ⁻¹)	能量密度	能量产率/%
污泥	6.56	—	—
200 ℃ - 2 h	3.51	0.53	37
200 ℃ - 4 h	3.51	0.53	37
200 ℃ - 6 h	3.58	0.55	36
220 ℃ - 2 h	4.03	0.61	41
220 ℃ - 4 h	3.96	0.60	39
220 ℃ - 6 h	4.19	0.64	40
240 ℃ - 2 h	4.71	0.72	46
240 ℃ - 4 h	4.63	0.71	43
240 ℃ - 6 h	4.81	0.73	44
260 ℃ - 2 h	4.92	0.75	46
260 ℃ - 4 h	5.04	0.77	46
260 ℃ - 6 h	5.18	0.79	47

与污泥相比,各反应条件下水热炭的高位热值普遍较低,能量密度和能量产率也相应较低。然而,目前普遍认为水热炭化是一项高效的碳固存和能量回收的热处理技术^[21-22]。Danso-Boateng 等人^[23]在160~200 ℃条件下对污泥进行水热炭化,获得的水热炭高位热值在16.66~18.65 MJ/kg 范围内,与褐煤热值相当;但是其污泥原料中灰分含量较低,仅为27.54%,水热炭中的含量也仅为22.89%~38.94%。Peng 等人^[12]的研究中,以长沙某污水厂污泥为原料,其灰分含量为49.85%,水热炭热值也能达到9.8~11.79 MJ/kg。而在本研究中,水热炭热值仅为3.51~5.18 MJ/kg,灰分含量由初始污泥的61.91%增加到75.82%~80.58%,以微砂为主的灰分构成了水热炭的主要成分。由此可见,污泥原料的含砂量会极大地影响水热炭的能量参数。不过有研究表明,在水热炭化过程中加入木质素含量高的生物质,不仅可以降低水热炭的灰分含量,而且对提高水热炭产率也有积极作用^[24]。因此,在后续研究中,可以考虑将污泥与其他生物质协同反应,以实现污泥基水热炭的改性,同时提高其水热炭产率和热值。

2.4 污泥基水热炭的FTIR 分析

不同水热炭化条件下污泥及水热炭的红外图谱如图 2 所示。3 300 ~ 3 600 cm^{-1} 范围内出现的峰值为水、羧基和羟基中 O—H 的振动吸收峰, 2 925 cm^{-1} 和 2 855 cm^{-1} 处为 C—H 的振动吸收峰, 1 645 cm^{-1} 处为 C=C 的伸缩振动吸收峰^[25]。随着温度和时间的增加, 以上峰值逐渐减小, 说明在反应条件剧烈时, O—H、C—H、C=C 降解程度加剧, 其含量逐渐降低。总体来说, 随着反应温度和时间的增加,

脱水 and 脱羧反应占据优势, 水热炭芳构化速率降低、芳香烃浓度有所下降, 这与随反应时间和温度的增加水热炭产率逐渐降低以及液相产物中有机物浓度逐渐增加的趋势一致。1 030 cm^{-1} 处峰值较大, 这是由于 Si—O—Si 振动引起的^[12], 说明水热炭中含有大量的硅酸盐成分, 反映出污泥的高含砂量; 另外, 随着反应温度和时间的增加, 其峰值逐渐增大, 说明硅酸盐在生物炭中的比例逐渐增大, 这与前文中灰分含量的变化趋势一致。

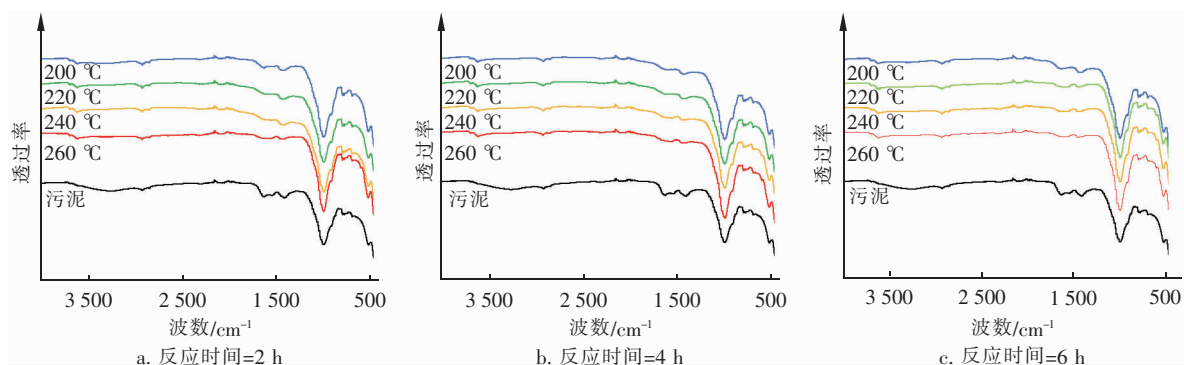


图 2 不同反应温度下污泥与污泥基水热炭的红外光谱

Fig. 2 Infrared spectrum of sludge and sludge-based hydrothermal charcoal at different reaction temperatures

2.5 污泥基水热炭的SEM 分析

污泥与污泥基水热炭的电镜扫描照片如图 3 所示。可见, 水热炭化对污泥的多孔结构和表面积等表面形态的影响很大。经水热炭化处理后, 污泥基水热炭的碎片化程度增加, 孔隙率明显大于原始污泥。水热炭多孔结构的形成表明污泥的致密结构遭到破坏, 包含在污泥中的束缚水、结合水以及各类元素和有机物得以释放, 进入到液相产物中。

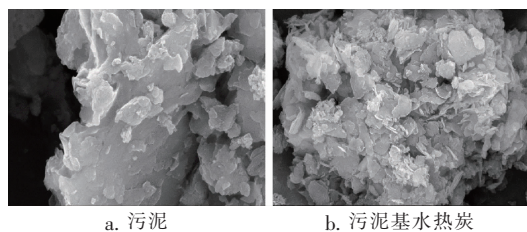


图 3 污泥与污泥基水热炭的电镜扫描照片

Fig. 3 Electron micrograph of sludge and hydrothermal charcoal

污泥基水热炭的多孔结构以及孔隙率的增加使其具有作为吸附材料的可能。虽然其比表面积远低于热解生物炭^[25], 但由于热解生物炭的芳香性远高于水热炭, 大量的芳烃构成了热解生物炭的主要成分而污泥中的含氧官能团被分解^[26], 而吸附材料中

的含氧官能团在吸附过程中的作用比结构形态更为重要^[27], 因此, 表面含氧官能团的保留可以抵消水热炭比表面积低的形态特性, 使其具有良好的吸附性能。

2.6 污泥水热炭化液相产物的BMP 实验结果

水热炭化后, 污泥中大量有机物溶解到水热液相中, 需妥善处理后才能进入环境。厌氧消化作为一项环保效益较高的生物处理技术, 可作为处理水热液相产物的有效技术。由 2.1 节可知, 反应温度对各项参数的影响大于反应时间, 因此, BMP 实验设置反应温度作为唯一变量, 探究反应温度对水热液相产物厌氧产甲烷性能的影响, 结果见图 4。对于产甲烷速率, 除 260 $^{\circ}\text{C}$ 以外, 其余各温度条件下的甲烷产率均在厌氧反应首日达到峰值, 分别为 30.29 (200 $^{\circ}\text{C}$)、33.14 (220 $^{\circ}\text{C}$) 和 42.57 (240 $^{\circ}\text{C}$) $\text{mL}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 。并且, 随着反应温度的上升, 最大反应速率随之上升, 说明在低于 240 $^{\circ}\text{C}$ 的反应温度下, 可厌氧降解有机物含量随水热反应温度的升高而增加, 这与液相产物中挥发性脂肪酸 (VFAs) 的变化趋势相同。对于累积甲烷产量, 在 200 $^{\circ}\text{C}$ 时最高, 达到 764.57 mL/L , 220、240 和 260 $^{\circ}\text{C}$ 时分别为 730.29、684.86 和 638.00 mL/L , 说明当底物的 VS 含量相

同时,随着水热反应温度的上升,累积甲烷产量呈下降趋势。此外,除 220 ℃ 外其余 3 组厌氧反应的累积甲烷产量在进行到第 27 天时均出现拐点,200 ℃ 的反应速率明显下降,但随着时间的延长,累积甲烷产量仍有阶段性增加;220 ℃ 的反应速率明显低于其余 3 个温度,到第 38 天才出现拐点,这可能是因为反应前期 220 ℃ 的水热液相产物 pH 值较低,对厌氧菌产甲烷产生了抑制作用;240 ℃ 和 260 ℃ 在第 27 天后累积甲烷产量基本不再变化,说明厌氧菌已无法分解剩余的复杂有机物,反应提前到达终点。随着水热反应温度的上升,液相产物中苯酚和呋喃衍生物等复杂有机物含量增加,这部分有机物不仅难以生物降解,而且对厌氧菌具有一定毒性,会抑制厌氧反应的进行^[20]。因此,在 200 ~ 260 ℃ 范围内,增加水热反应温度会导致液相产物的生化产甲烷潜力降低,不利于其进行厌氧生物处理。

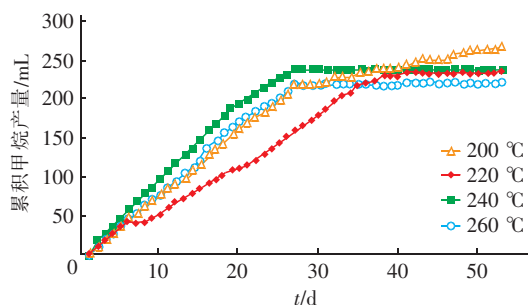


图4 不同反应温度下水热液相产物的厌氧累积甲烷产量

Fig.4 Anaerobic cumulative methane production from hydrothermal liquid products at different reaction temperatures

3 结论

① 以山地城市浓缩污泥为原料进行水热炭化实验,随着反应温度和反应时间的增加,污泥基水热炭产率不断下降,从 69.32% (200 ℃ - 2 h) 降至 59.49% (260 ℃ - 6 h);同时,水热炭中的官能团 O—H、C—H 和 C=C 逐渐降解,H/C 值和 O/C 值减小,水热炭的芳构化和脱羧反应随反应温度和时间的增加而增强。由扫描电镜照片可知,水热炭的孔隙率和碎片化程度明显大于原始污泥。整体而言,反应温度比反应时间对污泥水热炭化的影响更大。

② 在 200 ~ 260 ℃ 范围内,随着水热反应温度的升高,液相产物中难降解有机物含量增加,且其中的苯酚和呋喃衍生物等复杂有机物对厌氧反应具有抑制作用,累积甲烷产量随之降低。

③ 水热炭中的 C、H、O、N 含量较污泥均有不同程度的下降,增加反应温度和时间,C 含量呈上升趋势,而 H、O、N 含量降低。此外,各反应条件下水热炭的能量参数均小于污泥,热值从污泥的 6.56 MJ/kg 下降到 3.51 ~ 5.18 MJ/kg。污泥原料中较高的含砂量会对水热炭的元素含量和热值产生显著影响,使其明显低于污泥中的相应值。

④ 建议对山地城市污泥的含砂量进行有效控制,例如防治水土流失、规范文明施工、建设雨污分流管网、升级改造除砂工艺单元等,以降低微砂对污泥处理处置过程的危害。

参考文献:

- [1] Lu L, Pan Z, Hao N, et al. A novel acrylamide-free flocculant and its application for sludge dewatering[J]. Water Res, 2014, 57: 304 - 312.
- [2] Bondy S C. The neurotoxicity of environmental aluminum is still an issue[J]. NeuroToxicology, 2010, 31(5): 575 - 581.
- [3] 何强, 胡澄, 徐志恒, 等. 山地城市合流污水特细砂来源[J]. 环境工程学报, 2013, 7(10): 3874 - 3880.
He Qiang, Hu Cheng, Xu Zhiheng, et al. Sources of ultra-fine grit in combined sewer of mountainous urban [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(10): 3874 - 3880 (in Chinese).
- [4] 张波, 高廷耀. 初沉池取消后活性污泥法工艺的功能强化与局限性问题[J]. 中国给水排水, 1996, 12(2): 29 - 31.
Zhang Bo, Gao Tingyao. Function enhancement and limitation of activated sludge process after the cancellation of primary sedimentation tank [J]. China Water & Wastewater, 1996, 12(2): 29 - 31 (in Chinese).
- [5] 吉芳英, 晏鹏. 山地城市排水管网特细颗粒物特性及变化规律[J]. 环境科学研究, 2012, 25(3): 322 - 327.
Ji Fangying, Yan Peng. Characteristics and variation of superfine particles in a drainage pipe network of a mountainous city [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(3): 322 - 327 (in Chinese).
- [6] 刘一威. 辽宁省污水处理厂剩余污泥现状及处置对策研究[A]. 中国环境科学学会 2009 年学术年会论文集[C]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
Liu Yiwei. Study on the current situation and disposal countermeasures of residual sludge in Liaoning sewage

- treatment plant [A]. Proceedings of 2009 Academic Annual Meeting of Chinese Academy of Environmental Sciences [C]. Beijing: Beihang University Press, 2009 (in Chinese).
- [7] 李雄伟,李俊,李冲,等. 我国污泥处理处置技术应用现状及发展趋势探讨[J]. 中国给水排水,2016,32(16):26-30.
- Li Xiongwei, Li Jun, Li Chong, *et al.* Current application situation and development trend of sludge treatment and disposal technologies in China [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(16): 26-30 (in Chinese).
- [8] 蒋玲燕. 污水处理厂污泥厌氧消化优化设计与运行探讨[J]. 给水排水, 2015, 41(2): 32-35.
- Jiang Lingyan. Probe into optimal design and operation of the sludge anaerobic digestion in wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(2): 32-35 (in Chinese).
- [9] 胡维杰,周友飞,陈汝超,等. 上海市石洞口片区污泥干化焚烧处理工程设计总结与分析[J]. 给水排水, 2018, 44(9): 34-41.
- Hu Weijie, Zhou Youfei, Chen Ruchao, *et al.* Summary on sludge drying and incineration treatment project design for Shanghai Shidongkou area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(9): 34-41 (in Chinese).
- [10] Berge N D, Ro K S, Mao J, *et al.* Hydrothermal carbonization of municipal waste streams [J]. Environ Sci Technol, 2011, 45(13): 5696-5703.
- [11] 王兴栋,林景江,李智伟,等. 水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 1048-1054.
- Wang Xingdong, Lin Jingjiang, Li Zhiwei, *et al.* Effect of hydrothermal treatment time on the transformations of N, P, K and heavy metals in sewage sludge [J]. Environmental Science, 2016, 37(3): 1048-1054 (in Chinese).
- [12] Peng C, Zhai Y, Zhu Y, *et al.* Production of char from sewage sludge employing hydrothermal carbonization: Char properties, combustion behavior and thermal characteristics [J]. Fuel, 2016, 176: 110-118.
- [13] De la Rubia M A, Villamil J A, Rodriguez J J, *et al.* Effect of inoculum source and initial concentration on the anaerobic digestion of the liquid fraction from hydrothermal carbonisation of sewage sludge [J]. Renewable Energy, 2018, 127: 697-704.
- [14] Wirth B, Reza T, Mumme J. Influence of digestion temperature and organic loading rate on the continuous anaerobic treatment of process liquor from hydrothermal carbonization of sewage sludge [J]. Bioresour Technol, 2015, 198: 215-222.
- [15] 黄玉莹,袁兴中,李辉,等. 稻草的水热炭化研究[J]. 环境工程学报, 2013, 7(5): 1963-1968.
- Huang Yuying, Yuan Xingzhong, Li Hui, *et al.* Study on hydrothermal carbonation of rice straw [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(5): 1963-1968 (in Chinese).
- [16] 王定美,徐荣险,秦冬星,等. 水热炭化终温对污泥生物炭产量及特性的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(10): 1775-1780.
- Wang Dingmei, Xu Rongxian, Qin Dongxing, *et al.* Influence of final hydrothermal carbonization temperatures on the yields and characteristics of sludge biochars [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(10): 1775-1780 (in Chinese).
- [17] 任杰. 市政污泥水热生物炭对土壤性质及其中重金属的作用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- Ren Jie. Effect of Municipal Sewage Sludge Hydrochar on Soil Properties and Soil Heavy Metals [D]. Changsha: Hunan University, 2018 (in Chinese).
- [18] Chen B, Johnson E J, Chefetz B, *et al.* Sorption of polar and nonpolar aromatic organic contaminants by plant cuticular materials: Role of polarity and accessibility [J]. Environ Sci Technol, 2005, 39(16): 6138-6146.
- [19] 袁金华,徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 779-785.
- Yuan Jinhua, Xu Renkou. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions [J]. Ecology and Environment, 2011, 20(4): 779-785 (in Chinese).
- [20] Reza M T, Wirth B, Lüder U, *et al.* Behavior of selected hydrolyzed and dehydrated products during hydrothermal carbonization of biomass [J]. Bioresour Technol, 2014, 169: 352-361.
- [21] Lu X, Jordan B, Berge N D. Thermal conversion of municipal solid waste via hydrothermal carbonization: Comparison of carbonization products to products from current waste management techniques [J]. Waste Manage, 2012, 32(7): 1353-1365.
- [22] Liu Z, Quek A, Hoekman K S, *et al.* Production of solid
- (下转第 34 页)