

述评与讨论

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.20.001

剩余污泥制取生物炭可行性分析与评价

郝晓地, 李佳勇, 郝丽婷, 李 季

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中-荷未来污水处理
技术研发中心, 北京 100044)

摘 要: 在碳中和背景下, 剩余污泥资源与能源化利用成为今后研究与应用的方向。用污水处理后产生的剩余污泥制造生物炭受到广泛关注, 但是对污泥生物炭的研究却值得商榷。在简述生物炭一般制备原理与过程的基础上, 通过详细计算定量评估并分析了污泥生物炭制造过程能耗、成本、性能等方面的内容, 并与秸秆生物炭进行了横向比较。结果显示, 污泥生物炭制备需投入大量能量($-695 \text{ kW} \cdot \text{h/tDS}$), 难以抵消其产能, 且生产成本高达 927.49 元/t 生物炭。相比之下, 秸秆生物炭制造为净能量输出过程, 平衡投入能量后仍有 $1\,400 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ 秸秆的盈余能量; 秸秆生物炭制备成本远低于污泥生物炭, 仅为 575.72 元/t 生物炭。在性能方面, 污泥生物炭“固碳”含量仅为秸秆生物炭的 20%, 灰分含量却高达秸秆生物炭的两倍。显然, 与秸秆生物炭相比, 污泥生物炭无论是制备过程还是性能方面都不占优势。在秸秆生物炭尚未大规模推广应用的情况下, 大规模投入对污泥生物炭的研究应慎行。

关键词: 剩余污泥; 农业秸秆; 生物炭; 重金属

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)20-0001-08

Analysis and Assessment on the Feasibility of Sludge-based Biochar

HAO Xiao-di, LI Jia-yong, HAO Li-ting, LI Ji

(Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: With the background of carbon neutrality, resource and energy utilizations of waste activated sludge (WAS) have become a future topic of research and application. Biochar produced by WAS seems currently attractive in the aspect of research & development (R & D). However, is it practical for sludge conversion to biochar? Based on a summarized description on the principles and processes of biochar production, this article is dealt with quantitative (calculation-based) evaluations on energy consumption, cost and performance of sludge-based biochar, which is then compared with those of straw-based biochar. The calculated results reveal that sludge-based biochar would consume a lot of net energy ($-695 \text{ kW} \cdot \text{h/tDS}$), which can not balance the energy input and thus result in a high producing cost, up to $927.49 \text{ yuan per ton}$ of biochar. By comparison, the manufacturing process of straw-based biochar could produce an energy surplus of $1\,400 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ straw, associated with a lower producing cost, down to $575.72 \text{ yuan per ton}$ of biochar. Regarding the carbon-fixation performances, the fixed carbon content by sludge-based biochar is about 20% of straw-based biochar, while sludge-based biochar

contains two-time higher ash content than that of straw-based biochar. Clearly, sludge-based biochar has no priority over straw-based biochar, in regard of both production and performance. Considering straw-based biochar has not been applied widely, input into R & D on sludge-based biochar is inappropriate.

Key words: waste activated sludge; straw; biochar; heavy metals

剩余污泥是污水处理厂的主要副产物,长期以来被视为污水处理过程产生的废弃物。在“碳达峰、碳中和”双碳目标指引下,人们开始重新审视其资源、能源属性^[1],厌氧消化、堆肥、焚烧等一些传统资源化处置方式重新进入人们视线,更有污泥气化、生物炭等能源/资源化方式开始进行研发^[2-3]。

其中,污泥生物炭近年研究已呈上升趋势。生物炭(BC)是基于各种有机原料,在低氧条件下热解而形成的富碳物质。生物炭的碳含量高,因有机碳并未完全矿化导致其表面官能团较多、比表面积大,在土壤改良、污水处理等方面具有良好的应用前景。农业秸秆与剩余污泥是两种极具资源化潜力的生物炭制造原料,对其研究相对较多。

近年对污泥生物炭的研究很多,但始终没有出现大规模应用场景。因此,有必要对污泥生物炭能耗、成本及性能等进行定量评估,以揭示其工程应用中的瓶颈。在简述生物炭一般制备原理与过程的基础上,重点比较污泥与秸秆两种有机原料在制备生物炭过程中的能耗与应用性能,以阐明污泥生物炭研究与应用不相匹配的窘境。

1 污泥生物炭制备与改性

1.1 污泥生物炭制备

污泥生物炭制备与其他生物炭制备区别不大,通常是在惰性气体(主要是 N_2 、 CO_2 等)条件下,将热干化后的污泥升温至 $300\sim 950\text{ }^\circ\text{C}$,热解固体成分后可形成生物炭^[2]。

制备生物炭常用方法有慢速热解和水热炭化两种^[2]。慢速热解作为最常用的热解制炭方法,具有制备条件易控制、生物炭产量高且表面官能团种类丰富的优点,但该方法制备获得的生物炭性质受原始污泥物化性质影响大,难以预测。与传统热解方法不同,水热炭化对原始污泥含水量要求不高,因此可避免污泥干化过程消耗大量能量。此外,水热法可有效保留原料中的C、O等元素,所以,水热炭化过程中含氧官能团含量比传统热解法更高^[4]。但水热过程在封闭空间内进行,目前尚不清楚其反

应机理,且存在一定危险性。因此,尽管研究者在水热炭制备技术和应用中取得了不小的进展,但对水热炭化研究仍处于实验室阶段。

除传统制备方法外,研究者还尝试通过改变制备过程中的其他因素来增加生物炭产量或者改进生物炭性质,如在热解过程中采用高压或真空热解^[5]、微波低温热解^[6]等。这些研究尽管并非专门针对污泥生物炭,但在制备农业秸秆衍生生物炭中已被证明有效,可以为污泥生物炭改进提供思路。

1.2 污泥生物炭潜在应用

目前,对生物炭的应用研究主要集中于农业与环境两个领域。生物炭对土壤的改良是很多作用的共同结果。一方面,生物炭的添加可以增加土壤中的营养组分含量、增强作物吸收;另一方面,生物炭影响了土壤的孔隙率、阳离子交换容量等理化性质,在进一步强化土壤保肥能力的同时,还有增强土壤内微生物活性的作用^[7]。

生物炭表面含氧官能团种类丰富、数量众多,且孔隙率高、比表面积大,因此,对环境污染表现出非常好的吸附效果^[8]。生物炭对污染物的吸附机理十分复杂,与污染物种类也具有较高的相关性。吸附机理主要包括静电吸引、离子交换、物理吸附和化学键(络合和/或沉淀)作用等,受到表面官能团、比表面积、孔结构和矿物成分等物理化学性质的影响。

除此之外,近些年生物炭在能源和材料领域的应用也得到了发展。生物炭不仅可以作为燃料直接焚烧供能,还可以代替颗粒活性炭和石墨颗粒作为燃料电池的阳极材料,在提高性能的同时降低供能成本和碳足迹。

2 不同原料生物炭能耗与成本

2.1 污泥生物炭制造能耗分析

污泥热解通常包含三个步骤:机械脱水、热干燥以及污泥热解。机械脱水是为了将污泥含水率从99%降至80%左右,在此过程中污泥体积减少约95%。然而,如果此时直接对污泥进行热解,则热解

装置体积会相当大,并且热解产生的热解气会因为含有大量水蒸气而使热值大幅降低,使热解气难以具有利用价值,以至于浪费热解气所含能量。因此,热解前还需要添加热干燥过程,将污泥含水率进一步降低至50%左右。此后,干化污泥直接进入污泥热解装置,生成物主要包括热解油、热解气以及生物炭。由于生物炭热值较低,且通常不作为燃料,因此不考虑生物炭产生的能量,仅考虑热解油以及热解气作为燃料产生的能量。

2.1.1 机械脱水过程能耗

机械脱水有多种方法,如真空过滤脱水、压滤脱水和离心脱水等,脱水过程能耗随着使用脱水设备的不同而变化,在我国使用最多的带式压滤机能耗约60 kW·h/tDS^[9],计算中将采用这一数值。

2.1.2 热干燥过程能耗

研究^[10]表明,当污泥含水率较低时,热解气热值随着含水率的增加而增加,当含水率为50%时达到最大值,之后开始降低。为使热解产物能量达到最大化,同时降低热解过程中的能量消耗,通常在热干燥阶段将污泥含水率降至50%左右。热干燥过程中总能耗 E_{total} 由固体升温所需能量与水分蒸发所需能量构成,计算公式^[9]如下:

$$E_{\text{sludge}} = (T_2 - T_1) \cdot C_{\text{sludge}} \cdot M_{\text{sludge}} \cdot 100 \quad (1)$$

式中: E_{sludge} 为固体升温能耗, kJ/tDS; T_1 、 T_2 分别为干燥前与干燥后的污泥温度,分别为20和100 °C; C_{sludge} 为干污泥比热容,取3.62 kJ/(kg·°C); M_{sludge} 为每吨原始污泥(含水率99%)中所含干污泥质量,取10 kgDS/t。

$$E_{\text{water}} = C_{\text{water}} \cdot \left(\frac{M_{\text{sludge}} w_1}{1 - w_1} \right) \cdot (T_2 - T_1) \cdot 100 + Q_g \cdot M_{\text{water}} \quad (2)$$

$$M_{\text{water}} = \left(\frac{M_{\text{sludge}}}{1 - w_1} - \frac{M_{\text{sludge}}}{1 - w_2} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

式中: E_{water} 为蒸发能耗, kJ/tDS,包括水升温 and 汽化所需能量; C_{water} 为水的比热容,为4.2 kJ/(kg·°C); w_1 、 w_2 分别为输入(80%)和输出(50%)污泥的含水率; Q_g 为水的汽化热,取2 260 kJ/kg; M_{water} 为蒸发水的质量。

考虑到热干燥设备存在热损耗,实际能耗 E'_{total} 应高于理论能耗 E_{total} 。不同热干燥设备的热损耗率 η 为10%~20%,计算中采用中间值15%。 E'_{total} 计算

公式如下:

$$E'_{\text{total}} = E_{\text{total}} \cdot (1 + \eta) \quad (4)$$

2.1.3 过程能耗

污泥热解过程能耗可以简化为升温过程能耗 E_{target} 和反应过程能耗 E_{reaction} 两部分,升温过程能耗 E_{target} 可由下式^[10]计算:

$$E_{\text{target}} = \left(M_{\text{sludge}} \cdot C_{\text{sludge}} + M_{\text{water,sludge}} \cdot C_{\text{water(g)}} \right) \cdot (T_3 - T_2) \quad (5)$$

式中: $M_{\text{water,sludge}}$ 为干化后污泥中水的质量; $C_{\text{water(g)}}$ 为水蒸气比热容,在定压条件下由基于IAPWS-IF97公式的计算软件计算,由于热解过程为匀速升温,在计算中取平均值2.11 kJ/(kg·°C); T_3 为热解后温度,取500 °C。

反应过程能耗 E_{reaction} 参考文献[11],对于一般污泥热解反应,取0.15 MJ/kgDS。

2.1.4 副产物产能计算

污泥热解过程中产能副产物主要包括热解油和热解气。在500 °C时,污泥热解液产率为30%左右(以含水率50%污泥作为原料,下同),其热值约为9.5 MJ/kg^[12];热解气产量为10%左右,热值约为14.2 MJ/kg^[10]。

2.1.5 能量衡算

根据上述能量计算并转化为电当量,可绘制如图1所示的污泥热解制生物炭工艺能量衡算图。由图1可以看出,污泥热解工艺能量赤字约为695 kW·h/tDS。因热解油以及热解气应用过程中并不能达到100%能源利用率,故实际能量赤字可能会更高。

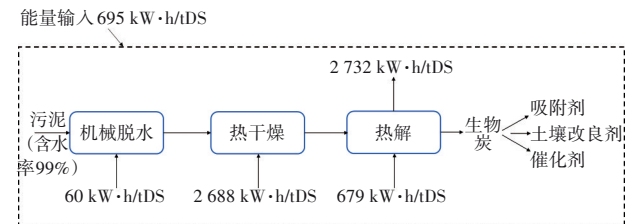


图1 污泥热解制生物炭工艺能量衡算

Fig.1 Energy balance of sludge-based pyrolysis for biochar production

2.2 秸秆生物炭制造能耗分析

秸秆生物炭制造包含破碎成粒和热解两个阶段。与剩余污泥不同,秸秆含水量不高,自然风干后仅为7%左右,因此,无需在热解之前进行脱水并热干燥,可为生物炭制备节省大量能量。

2.2.1 秸秆生物炭制造过程能耗

秸秆破碎过程包括粗破碎(粒径>10 mm)和精破碎(粒径<5 mm)两个步骤,粗破碎电耗约为35~40 kW·h/t 秸秆,精破碎电耗约为75~90 kW·h/t 秸秆;两者联用,计算中取120 kW·h/t 秸秆^[13]。

秸秆热解过程与污泥热解类似,热解能耗 $E_{\text{pyrolysis}}$ 可用下式计算:

$$E_{\text{pyrolysis}} = M_{\text{water,straw}} \cdot C_{\text{water}} \cdot \Delta T_1 + M_{\text{water,straw}} \cdot C_{\text{water(g)}} \cdot \Delta T_2 + M_{\text{water,straw}} \cdot Q_g + M_{\text{straw}} \cdot C_{\text{straw}} \cdot \Delta T_3 \quad (6)$$

式中: $M_{\text{water,straw}}$ 为秸秆中的水分含量,计算中取含水率为7%; ΔT_1 为水温变量(25~100 °C); ΔT_2 为水蒸气温度变量(100~500 °C); M_{straw} 为秸秆质量,kg; C_{straw} 为秸秆的比热容,计算中取1.4 kJ/(kg·°C)^[14]; ΔT_3 为秸秆温度变量(25~500 °C)。

2.2.2 秸秆生物炭副产物产能计算

与污泥生物炭相比,秸秆生物炭制备过程中热解油和热解气产量更高,这是源于秸秆中有机质含量远比污泥中高得多。一般来说,在500 °C时,热解油产率为40%左右,热值约为12.3 MJ/kg;热解气产率为20%左右,热值约为7.1 MJ/kg^[14]。

2.2.3 能量衡算与比较

根据上述能量计算并转化为电当量,可绘制如图2所示的秸秆热解制生物炭工艺能量衡算图。不难发现,秸秆热解副产物不仅能满足热解所需的全部能量,还能产生1400 kW·h/t 秸秆的富余外输能量,这归功于秸秆低含水率所节省的大量干化所需能量。可见,秸秆生物炭在能耗方面远胜于污泥生物炭。

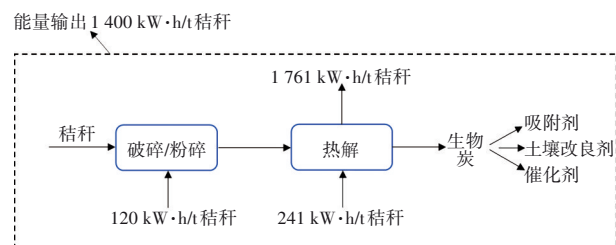


图2 秸秆热解制生物炭工艺能量衡算

Fig.2 Energy balance of straw-based pyrolysis for biochar production

2.3 两种生物炭制造成本核算

生物炭制造成本计算从原料收集开始,包含原料成本、运输成本、热解厂建设成本以及运营成本等。其中,制备原料(秸秆、污泥)通常被当作废弃

物,容易获得,且热解厂可以就近建设,因此,在计算成本时仅计算热解厂建设成本和运行成本。

热解厂建设成本包括土建成本和设备成本两部分。污泥生物炭所需设备包括污泥浓缩机、板框压滤机、回转干燥机、炭化炉及各设备配套的进出料装置,以及烟气处理系统和生物炭储存运输系统等。以某污泥热解厂为例,一座湿泥(含水率80%)实际处理规模200 t/d的热解厂投资额为1.39亿元^[15]。秸秆生物炭所需设备包括粉碎机、炭化炉及配套进出料系统、烟气处理系统、生物炭储存运输系统等,以某秸秆热解厂为例,其处理规模为400 t/d,投资额为2.5亿元^[16]。

热解厂运营成本包括电费、燃料费、员工工资福利和其他费用(水费、药剂费等)。水费主要指设备冲洗水费等,电费是热解厂运行的主要动力费,分别按照一般工业用水和用电的全国均价4.10元/m³和0.75元/(kW·h)计算^[17]。燃料是污泥热解所需的热源,根据上述能量核算,秸秆热解过程中产生的油气足以满足热解过程所需能量,因此,秸秆热解厂不计算燃料费;污泥热解厂所需燃料按照理论计算并结合实际运行计算,天然气价格取2.63元/m³。员工工资按照2021年全国城镇人口收入中位数计算,取值为3951元/(人·月)。

根据以上核算规则,可以计算出两种生物炭制造过程中的投资和运营成本,具体如表1所示。

表1 两种生物炭制造成本核算

Tab.1 Investment and operating costs of two biochar preparation processes 元·t⁻¹生物炭

类型(炭产率)	秸秆生物炭(50%)	污泥生物炭(65%)
投资成本	342.47	488.23
运营成本	电费	216.35
	燃料费	167.91
	人工费	5.00
	其他费用	50.00
合计	575.72	927.49

由于湿污泥含水率较高,干化减量之后制备得到的生物炭更少,因此,生物炭单位投资更高。污泥生物炭运营成本远高于秸秆生物炭,主要是由于污泥热解产生的油气不足以满足其所需能量,需要外加燃料。表1计算所得污泥生物炭运营成本与实际工程基本吻合^[15]。

2.4 两种生物炭制造能耗与成本比较

与污泥生物炭相比,秸秆生物炭制备过程中能耗更低,热解气足以满足其能量需求,还可以对外输出多余的能量(1 400 kW·h/t 秸秆),而污泥则需要从外界输入能量 695 kW·h/tDS。在成本方面,秸秆生物炭也比污泥生物炭低,分别为 575.72 和 927.49 元/t 生物炭。两种生物炭的投资成本分别为 342.47 元/t 生物炭和 488.23 元/t 生物炭,运营成本分别为 233.25 元/t 生物炭和 439.26 元/t 生物炭。总之,污泥生物炭投资成本和运营成本比秸秆生物炭分别高出 42.6% 和 88.3%。将两种生物炭综合能耗与成本绘制在柱状图中进行更直观的比较,结果见图 3。

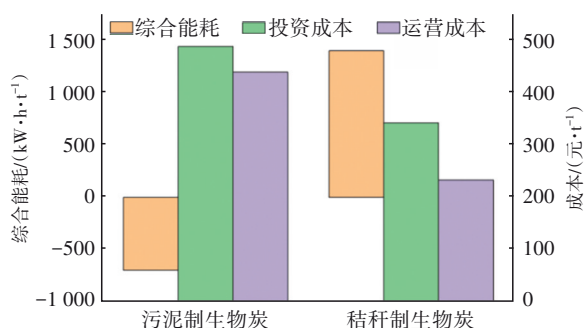


图 3 两种生物炭综合能耗与成本比较

Fig.3 Comparison between energy consumptions and costs for two biochar processes

3 两种生物炭组分对比

生物炭用作土壤改良剂时其效果主要取决于生物炭化学组分,特别是有机质含量。为比较污泥生物炭与秸秆生物炭有机质和灰分含量的差异,汇总了近几年部分研究中制备获得的生物炭化学组分和碳含量^[18-22],结果见图 4。其中,图 4(a)中 1~8 号为秸秆生物炭,9~15 号为污泥生物炭;图 4(b)中 1~12 号为秸秆生物炭,13~24 号为污泥生物炭。

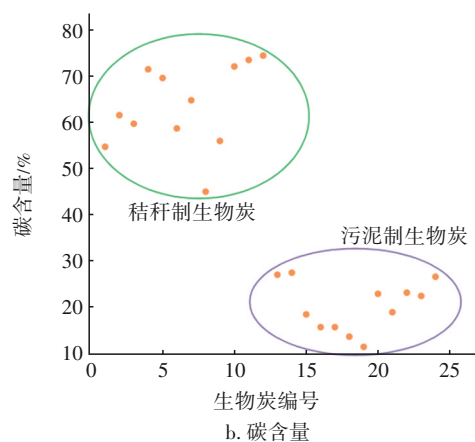
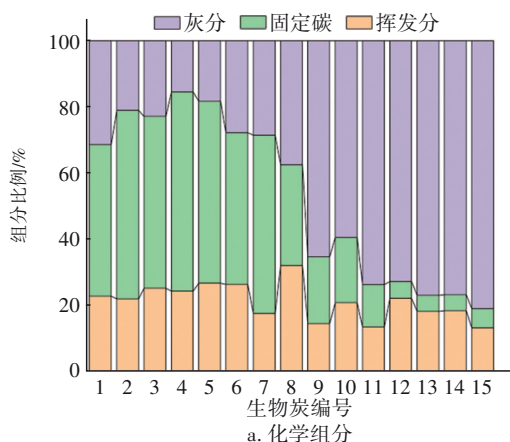


图 4 两种生物炭化学组分与碳含量

Fig.4 Chemical components and carbon contents of two types of biochar

生物炭形成后保留了原材料(污泥或秸秆)中的大部分有机碳和几乎全部的无机灰分,而有机碳又可分为挥发分(950 °C 时可无氧挥发)和固定碳(950 °C 无氧时不挥发)。为此,图 4(a)按 3 种化学组分(灰分、固定碳及挥发分)来区别生物炭中的无机与有机化学组分,而图 4(b)则显示的是无机与有机总碳(TC)含量。

图 4(a)显示,污泥生物炭与秸秆生物炭在挥发性组分上差别并不是很大,但两者固定碳比例差别非常明显,污泥生物炭仅为秸秆生物炭的 20%;换句话说,污泥生物炭中灰分是主要成分,总有机质比例平均在 30% 以下。这是因为秸秆化学成分中含有大量纤维素和木质素等难分解有机质,在热解过程中会以固定碳形式留存于生物炭中,起到“碳封存”的效果。相反,原污泥中本来总有机质就难以与秸秆相比,且在热解中部分有机质已挥发,导致生物炭形成后固定碳的比例极低(平均在 10% 以下),这也就极大影响了污泥生物炭的“固碳”效果。

图 4(b)显示的生物炭总碳含量表明,污泥生物炭总碳含量不足 30%,而秸秆生物炭一般均能达到 60% 以上。这说明污泥生物炭中有机质含量确实不高,主要是无机矿物等形成的灰分含量(两倍于秸秆)。由于灰分物质的容重远高于有机质,所以,高灰分生物炭施加于土壤时效果可能会相反,影响土壤中营养物质的释放和保留。

4 两种生物炭重金属含量比较

关于污泥热解过程中重金属的迁移转化,不同文献有不同描述,但研究共识是污泥生物炭中重金属含量远高于秸秆生物炭。生物炭中重金属含量

与其原料中的含量直接相关。现行污水处理工艺中常常需要投加大量化学药剂除磷或去除浊度,而化学药剂中所含的重金属元素最终大都会进入污泥。热解时,除一些熔沸点较低的金属(如汞在350℃左右会完全挥发)外,绝大多数金属都会固定在生物炭中。因此,污泥生物炭中的重金属含量比秸秆生物炭高几倍到几十倍^[23],并有可能超过污泥返田要求的重金属标准。

将污泥生物炭、秸秆生物炭中部分重金属含量与污泥土地利用国家标准《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)^[24-28]进行比较,结果见表2。在文献中提到的若干个生物炭样本中,污泥生物炭中的重金属含量均高于秸秆生物炭,并且大多数污泥生物炭均无法达到污泥产物农业利用的重金属含量标准^[24-25]。

表2 两种生物炭重金属含量比较

Tab.2 Comparison of heavy metal contents in two types of biochar mg·kg⁻¹

重金属名称	Cu	Zn	Pb	Cd
秸秆生物炭	5.57 ~ 47.92	20.71 ~ 128.75	4.14 ~ 15.47	0.19 ~ 1.75
污泥生物炭	139 ~ 1 267.3	432 ~ 2 316	17.1 ~ 525	1.8 ~ 23.5
GB 4284—2018	500	1 200	300	3

有人向土壤中施加了由木屑、造纸污泥和污水污泥制备得到的生物炭,并种植生菜等作物,以观察作物根茎叶产量及作物中的重金属浓度^[26]。与另外两种污泥相比,污泥生物炭培养出来的生菜根、茎发育都较差^[26]。此外,与不添加污泥生物炭相比,作物根中的重金属含量更高,如Zn含量增加了4~5倍,远高于其他原料所制备的生物炭^[26]。这表明污泥生物炭中含有更高浓度的重金属,且可以转移到土壤和作物中。

目前已有一些研究者试图通过将污泥与其他生物质共热解来降低生物炭中重金属含量,并取得了一定效果,但是与其他生物质所制备的生物炭相比,其重金属含量仍处于较高水平。有人将污泥与水稻秸秆作为共热解原料,因污泥与共热解原料混合产生了“稀释效应”,所以,在相同制备条件下共热解生物炭中重金属含量降低了40%左右^[29],但仍远高于秸秆生物炭含量。进言之,与单独热解相

比,共热解制备的污泥生物炭中Mn、Ni等重金属生物富集有效性更高^[29]。也有人利用塑料废物与污泥协同秸秆共热解制备生物炭,亦得到了类似的研究结果^[30]。随着PVC塑料含量的增加,生物炭中重金属含量会有所下降,但仅对Cr和As有一定的固定效果,而对Zn、Cu等其他重金属生物富集有效性均有所提高^[30]。这可能是由于PVC塑料中Cl含量较高,对重金属有一定的激活作用,从而提高了生物炭中重金属的生物富集有效性。

由此可见,将污泥生物炭用于土地改良或者污水处理时,需要对重金属进行全面检测,以评估污泥生物炭潜在的环境危害。

5 特性比较总结

通过对两种不同原料生物炭制造过程、能量消耗、制造成本、碳组分、重金属等的详细分析、比较,两种生物炭特性总结见表3。

表3 污泥与秸秆生物炭特性总结

Tab.3 Summary of the characteristics for two types of biochar

生物炭类型	污泥生物炭	秸秆生物炭
制备成本/(元·t ⁻¹ 生物炭)	927.49	575.72
能量核算	赤字695 kW·h/tDS	盈余1 400 kW·h/t 秸秆
生物炭产率/%	50~80	40~60
生物炭性能	固定碳含量低,总碳含量不到30%,重金属和灰分含量高	固定碳含量高,总碳含量约60%,重金属含量低

6 结语

通过详细计算、分析、比较,与秸秆生物炭相比,污泥生物炭无论是在制备过程还是终端产品应用方面显然均不具备明显优势,特别是其制备过程过高的能耗、高昂的成本以及较高的重金属含量等都会限制其实际应用。况且,占尽优势的秸秆生物炭在技术已经相当成熟的情况下还并没有实现大规模生产应用。因此,对污泥生物炭的研究和应用恐怕将会事倍功半。

参考文献:

- [1] 郝晓地,李季,曹达啟. 污水处理碳中和运行需要污泥增量[J]. 中国给水排水, 2016, 32(12): 1-6.
HAO Xiaodi, LI Ji, CAO Daqi. Carbon-neutral operation of wastewater treatment needing sludge

- increment [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32 (12): 1-6 (in Chinese).
- [2] CHUN Y S, LEE S K, YOO H Y, *et al.* Recent advancements in biochar production according to feedstock classification, pyrolysis conditions, and applications: a review [J]. *BioResources*, 2021, 16 (3): 6512-6547.
- [3] PONNUSAMY V K, NAGAPPAN S, BHOSALE R R, *et al.* Review on sustainable production of biochar through hydrothermal liquefaction: physico-chemical properties and applications [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 310: 123414.
- [4] 王森, 袁娇娇, 易佩, 等. 水热炭化技术及其在废水处理中的应用研究进展 [J]. *工业水处理*, 2022, 42 (3): 1-8.
- WANG Sen, YUAN Jiaojiao, YI Pei, *et al.* Hydrothermal carbonization technology and its application research progress in wastewater treatment [J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 42 (3): 1-8 (in Chinese).
- [5] RATHORE N S, PAWAR A, PANWAR N L. Kinetic analysis and thermal degradation study on wheat straw and its biochar from vacuum pyrolysis under non-isothermal condition [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021, 165: 13.
- [6] 耿海红. 微波热解模拟污泥产生物炭的重金属转化与资源化利用研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2018.
- GENG Haihong. Transformation of Heavy Metals and Utilization of Biochar Produced by Microwave Pyrolysis Simulated Sludge [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018 (in Chinese).
- [7] 曹秀芹, 刘丰, 柴莲莲, 等. 污泥与污泥生物炭对比修复铜、镉污染土壤 [J]. *应用化工*, 2022, 51 (4): 1-8.
- CAO Xiuqin, LIU Feng, CHAI Lianlian, *et al.* Restoration of Cu and Cd heavy metal contaminated soil by sludge-derived biochar [J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, 51 (4): 1-8 (in Chinese).
- [8] BASER B, YOUSAF B, YETIS U, *et al.* Formation of nitrogen functionalities in biochar materials and their role in the mitigation of hazardous emerging organic pollutants from wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 126131.
- [9] 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 (4): 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 (4): 35-42 (in Chinese).
- [10] 李宏森. 市政污泥热解过程模拟及能量平衡探讨 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- LI Hongsen. Study on Simulation of Sewage Sludge Pyrolysis Process and Energy Balance in Pyrolysis [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018 (in Chinese).
- [11] GIL-LALAGUNA N, SANCHEZ J L, MURILLO M B, *et al.* Energetic assessment of air-steam gasification of sewage sludge and of the integration of sewage sludge pyrolysis and air-steam gasification of char [J]. *Energy*, 2014, 76: 652-662.
- [12] 朱玉雯, 王渊, 张磊, 等. 污泥热解产物与可回收热值分布规律研究 [J]. *安徽农业科学*, 2015, 43 (24): 187-189, 229.
- ZHU Yuwen, WANG Yuan, ZHANG Lei, *et al.* Distribution of products and its recycled heat value during sludge pyrolysis [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43 (24): 187-189, 229 (in Chinese).
- [13] 赵希强, 马春元, 王涛, 等. 生物质秸秆预处理工艺及经济性分析 [J]. *电站系统工程*, 2008, 24 (2): 30-33.
- ZHAO Xiqiang, MA Chunyuan, WANG Tao, *et al.* The pretreatment technology of straw and economic analysis [J]. *Power System Engineering*, 2008, 24 (2): 30-33 (in Chinese).
- [14] PARK J, LEE Y, RYU C, *et al.* Slow pyrolysis of rice straw: analysis of products properties, carbon and energy yields [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 155: 63-70.
- [15] 吴云生, 汪国梁, 银正一, 等. 市政污泥热解炭化工程应用及运行分析 [J]. *给水排水*, 2022, 48 (6): 43-48.
- WU Yunsheng, WANG Guoliang, YIN Zhengyi, *et al.* Application and operation analysis of sewage sludge pyrolysis carbonation project [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48 (6): 43-48 (in Chinese).
- [16] 龚晓宇. 基于LCA的水稻秸秆热解经济与环境效益分析 [D]. 南昌: 江西财经大学, 2021.
- GONG Xiaoyu. Analysis of Economic and Environmental Benefits of Rice Straw Pyrolysis Based on LCA: A Case Study of 11 Cities in Jiangxi Province

- [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2021 (in Chinese).
- [17] 戴晓虎, 陈淑娴, 蔡辰, 等. 秸秆主流能源化技术研究 with 经济性分析 [J]. 环境工程, 2021, 39(1): 1-17. DAI Xiaohu, CHEN Shuxian, CAI Chen, *et al.* Research and economic analysis of mainstream energy technologies for straw [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(1): 1-17 (in Chinese).
- [18] WANG J X, LIU P, LAI F Y, *et al.* Pyrolysis of different sewage sludge feedstocks for biochar products: characterization and application [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(11): 3302-3319.
- [19] KONG L L, LIU J Z, ZHOU Q X, *et al.* Sewage sludge derived biochars provoke negative effects on wheat growth related to the PTEs [J]. Biochemical Engineering Journal, 2019, 152:107386.
- [20] 刘朝霞, 牛文娟, 楚合营, 等. 秸秆热解工艺优化与生物炭理化特性分析 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 196-203. LIU Zhaoxia, NIU Wenjuan, CHU Heying, *et al.* Process optimization for straws pyrolysis and analysis of biochar physiochemical properties [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 196-203 (in Chinese).
- [21] 吴诗雪, 王欣, 陈灿, 等. 凤眼莲、稻草和污泥制备生物炭的特性表征与环境影响解析 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 4021-4032. WU Shixue, WANG Xin, CHEN Can, *et al.* Characterization of biochar derived from water hyacinth, rice straw and sewage sludge and their environmental implications [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(12): 4021-4032 (in Chinese).
- [22] 简敏菲, 高凯芳, 余厚平. 不同裂解温度对水稻秸秆制备生物炭及其特性的影响 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1757-1765. JIAN Minfei, GAO Kaifang, YU Houping. Effects of different pyrolysis temperatures on the preparation and characteristics of bio-char from rice straw [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(5): 1757-1765 (in Chinese).
- [23] LI D N, SHAN R, JIANG L X, *et al.* A review on the migration and transformation of heavy metals in the process of sludge pyrolysis [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 185:106452.
- [24] LU T, YUAN H R, WANG Y Z, *et al.* Characteristic of heavy metals in biochar derived from sewage sludge [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2016, 18(4): 725-733.
- [25] JIN H M, ARAZO R O, GAO J, *et al.* Leaching of heavy metals from fast pyrolysis residues produced from different particle sizes of sewage sludge [J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2014, 109: 168-175.
- [26] GASCO G, CELY P, PAZ-FERREIRO J, *et al.* Relation between biochar properties and effects on seed germination and plant development [J]. Biological Agriculture & Horticulture, 2016, 32(4): 237-247.
- [27] XU W, HOU S, LI Y, *et al.* Bioavailability and speciation of heavy metals in polluted soil as alleviated by different types of biochars [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2020, 104(4): 484-488.
- [28] YANG T X, MENG J, JEYAKUMAR P, *et al.* Effect of pyrolysis temperature on the bioavailability of heavy metals in rice straw-derived biochar [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(2): 2198-2208.
- [29] JIN J W, WANG M Y, CAO Y C, *et al.* Cumulative effects of bamboo sawdust addition on pyrolysis of sewage sludge: biochar properties and environmental risk from metals [J]. Bioresource Technology, 2017, 228: 218-226.
- [30] 汪刚, 余广炜, 谢胜禹, 等. 添加不同塑料与污泥混合热解对生物炭中重金属的影响 [J]. 燃料化学学报, 2019, 47(5): 611-620. WANG Gang, YU Guangwei, XIE Shengyu, *et al.* Effect of co-pyrolysis of different plastics with sewage sludge on heavy metals in the biochar [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2019, 47(5): 611-620 (in Chinese).

作者简介:郝晓地(1960—),男,山西柳林人,博士,教授,从事市政与环境工程专业教学与科研工作,主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术。现为国际水协期刊 *Water Research* 区域主编(Editor)。

E-mail:haoxiaodi@bucea.edu.cn

收稿日期:2022-10-24

修回日期:2022-11-04

(编辑:丁彩娟)