

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.03.015

# 污泥水热炭中磷及主要伴生金属元素的浸出行为

方俊华<sup>1</sup>, 旷鹏<sup>1</sup>, 程思捷<sup>1</sup>, 唐琦<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 成都市自来水有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘要:** 以水热碳化对市政污泥进行预处理,采用硫酸法对制得的污泥水热炭进行磷提取实验,同时考虑钙、铁、铝的释放,探究硫酸浓度、浸出时间、液固比对磷提取效果的影响。结果表明,水热炭中磷的形态以Ca-P、Mg-P为主,该形态有利于磷的提取利用。磷及相关金属的浸出率随硫酸浓度的增大而升高。长时间浸出会导致溶液形成硫酸钙晶体,降低磷和钙的浸出率,铁和铝的浸出率随着浸出时间的增加而升高,但所需浸出时间较长。液固比通过影响水热炭与酸的接触面积来影响磷及相关金属的浸出效果。在硫酸浓度为0.5 mol/L、浸出时间为120 min及液固比为50 mL/g的条件下,水热炭中磷的浸出效果最好,浸出率为93.8%,钙、铁、铝的浸出率分别为70.4%、54.5%、65.8%。

**关键词:** 污泥水热炭; 磷回收; 金属; 浸出

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)03-0101-06

## Leaching Behavior of Phosphorus and Main Associated Metal Elements from Sludge Hydrothermal Carbon

FANG Jun-hua<sup>1</sup>, KUANG Peng<sup>1</sup>, CHENG Si-jie<sup>1</sup>, TANG Qi<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Chengdu Municipal Waterworks Co. Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Municipal sludge was pretreated by hydrothermal carbonization method, and phosphorous was extracted from the sludge hydrothermal carbon by sulfuric acid method. Considering the release of calcium, iron and aluminum, the effects of sulfuric acid concentration, leaching time and liquid-solid ratio on the phosphorus extraction performance was investigated. The forms of phosphorus in hydrothermal carbon were mainly Ca-P and Mg-P, which were conducive to the extraction and utilization of phosphorus. The leaching rates of phosphorus and related metals showed an overall increasing trend with the increase of sulfuric acid concentration. Long leaching time led to the formation of calcium sulfate crystals in the solution, and reduced the leaching rates of phosphorus and calcium. The leaching rates of iron and aluminum increased with the increase of leaching time. However, the leaching time was longer. The liquid-solid ratio affected the leaching performance of phosphorus and related metals by influencing the contact area between hydrothermal carbon and acid. When the sulfuric acid concentration was 0.5 mol/

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: 方俊华 E-mail: 1400525812@qq.com

L, leaching time was 120 min and liquid-solid ratio was 50 mL/g, the maximum leaching rate of phosphorus from hydrothermal carbon was 93.8%, and the leaching rates of calcium, iron and aluminum was 70.4%, 54.5% and 65.8%, respectively.

**Key words:** sludge hydrothermal carbon; phosphorus recovery; metals; leaching

污泥作为污水处理的副产物,包含大量不溶性和被吸附的可溶性杂质,若这些物质进入生态系统,将威胁人类健康和生态环境安全。根据《全国环境统计公报(2019年)》,污泥产量为 $1\,457.6\times 10^4$  t。2025年我国污泥产量预计突破 $8\,000\times 10^4$  t<sup>[1]</sup>。由于污泥的含水率高,增加了常用热处理技术(如焚烧、热解、超临界水氧化等)前期预处理成本。水热碳化是一种对环境友好的、有发展前景的废弃生物质处理技术,它可将生物质转化为水热炭、水热液或气体等具有附加值的产物,既可作为碳封存的途径,也可作为回收利用污泥中磷的预处理技术。

经过水热处理后,污泥中磷的化学形态和物理分布发生改变,磷的迁移率和生物利用率受到影响。水热碳化过程会将有机磷、聚磷酸盐等水解为正磷酸盐,最终富集于水热炭中。磷的形态还与污泥中主要伴生元素(Al、Ca、Fe)有关,Huang等<sup>[2]</sup>和Li等<sup>[3]</sup>认为,水热炭中Ca-P是磷的主要存在形态,这有利于将水热炭中的磷及营养转化为植物可利用的形式(如肥料)或成为制磷酸盐的工业原料。化学提取法是一种操作简单、回收效率高、应用广泛的磷回收工艺。浸提剂种类对磷的释放与回收率十分重要。碱性浸提剂对磷的提取率较低<sup>[4]</sup>,有机酸的螯合作用增加了重金属的溶解能力,无机酸对磷的提取能力较高。从成本和最大回收率角度

考虑,硫酸是最佳浸提剂。当硫酸投加量在0.39~0.78 kg/kg灰分之间时,磷的浸出率在85%以上<sup>[5]</sup>。Donatello等<sup>[6]</sup>认为,在硫酸浓度为最低化学计量值、浸出时间为120 min、液固比为20 mL/g条件下,磷的回收率可达到90%以上。然而目前的研究大多集中于污泥焚烧灰中磷的提取,从污泥水热炭中提取磷的研究较少。因此,探究污泥水热炭中磷的提取特性,对污泥中磷的回收利用具有重要意义。

笔者以市政污泥为原料制备水热炭,使用硫酸对水热炭进行浸出实验,通过单因素控制法探究硫酸浓度、浸出时间、液固比对原料中磷浸出的影响,同时考虑Ca、Fe、Al的释放,旨在为污泥水热炭中磷的回收利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验原料及方法

污泥[含水率为 $(95.45\pm 0.24)\%$ ]取自重庆市某污水处理厂。样品污泥放置在 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰柜中保存待用。将污泥水热碳化后得到的固体产物称为水热炭。将污泥置于体积为1 L的磁力搅拌高压反应釜中,加热至 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,维持4 h。反应结束后用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜进行真空抽滤,将收集的固相产物在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中干燥24 h至恒质量,研磨过100目筛( $d=0.15\text{ mm}$ ),将水热炭收集并置于干燥皿中储存。污泥和水热炭的基本性质见表1。

表1 污泥和水热炭的基本性质

Tab.1 Physicochemical characteristics of sludge and hydrothermal carbon

项目	元素含量/% <sup>①</sup>				高位热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> ) <sup>③</sup>	主要矿物元素/(mg·g <sup>-1</sup> )			
	C	H	O <sup>②</sup>	N		P	Ca	Fe	Al
污泥	17.830	3.160	7.360	2.740	9.26	11.88	23.55	57.90	34.47
水热炭	9.190	0.660		1.583		20.92	41.82	87.63	15.65

注: ①表示以干物质计算;②表示采用差量法计算氧含量(O%), $O\%=100\%-\text{Ash}\%-\text{C}\%-\text{N}\%-\text{H}\%$ ;③高位热值(HHV)= $0.338\,3\text{C}+1.443(\text{H}-\text{O}/8)$ 。

### 1.2 Hedley磷及相关金属分级形态

利用改进的Hedley顺序提取法分析水热炭中磷的形态及相关金属浸出行为。具体操作如下:取0.2 g固体样品放入50 mL的离心管中,依次采用20 mL去离子水、0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub>、0.1 mol/L NaOH、

1 mol/L HCl在气浴恒温振荡仪( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )中振荡16 h,然后以3 500 r/min的转速离心5 min。用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤上清液,酸化后在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保存待用。对滤渣进行下一步提取。上清液中磷、钙、铁、铝浓度采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-MS)进行测

定。磷及伴生金属元素分级形态所占比例为浸出液含量与原料中各元素含量的比值。

### 1.3 浸出实验

取0.2 g水热炭与不同浓度的提取剂按不同比例在50 mL的离心管中进行混合,设计时间内完成振荡。在4 000 r/min的转速下离心10 min,滤液用0.45  $\mu\text{m}$ 的混合纤维素酯膜过滤器过滤,调节浸出液pH<1。滤液储存在4  $^{\circ}\text{C}$ 环境下。滤渣在105  $^{\circ}\text{C}$ 下烘至恒质量,磨碎后装袋保存。测定浸出液中磷及钙、铁、铝的浸出浓度。同时,考察硫酸浓度、浸出时间、液固比对水热炭中磷及金属浸出的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磷和金属形态分析

污泥和水热炭中P、Ca、Fe、Al在Hedley顺序提取法中的浸出行为如图1所示。

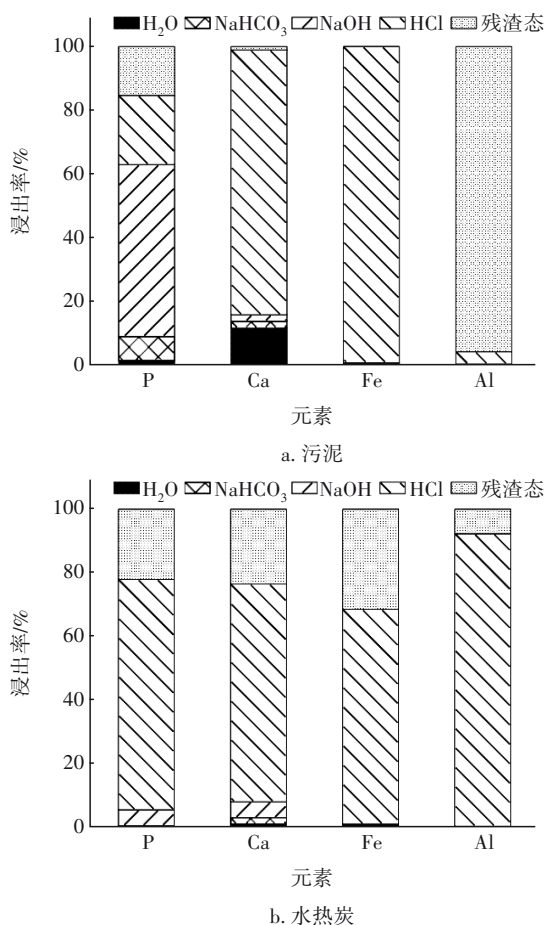


图1 污泥和水热炭中P、Ca、Fe、Al的浸出能力

Fig.1 Extraction capacity of P, Ca, Fe and Al from sludge and hydrothermal carbon

由图1可知,与污泥相比,水热炭中磷的 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{NaOH}$ 溶解态均大幅减少,而 $\text{HCl}$ -P含量

由21.64%显著增加至72.68%。水热碳化过程促进了 $\text{H}_2\text{O}$ -P、 $\text{NaHCO}_3$ -P、 $\text{NaOH}$ -P向 $\text{HCl}$ -P和残渣态-P转化。水热炭中钙和铁的残渣态含量均增加,这是因为污泥中 $\text{H}_2\text{O}$ -Ca和 $\text{NaHCO}_3$ -Ca通过水热碳化向 $\text{HCl}$ -Ca和残渣态-Ca转化。而Fe在污泥中以 $\text{HCl}$ 溶解态为主,经过水热碳化后向残渣态转化。Al在污泥中主要以残渣态形式存在,而水热炭中 $\text{HCl}$ -Al含量最多,说明铝元素由污泥中的残渣态转化为水热炭中的 $\text{HCl}$ 溶解态。

采用X射线粉末衍射仪(XRD)定量分析污泥和水热炭矿物相的组成,结果如图2所示。污泥及水热炭中都有 $\text{SiO}_2$ ,但峰面积大小不同。磷与金属形成的矿物组成也有所不同。污泥中磷主要以 $\text{AlPO}_4$ 的形态存在,但也有少量的 $\text{Fe}_2\text{PO}_5$ ,说明污泥中磷主要以Al-P形态存在。水热炭中还可以观察到 $\text{CaP}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaP}_2\text{O}_6$ 、 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ,说明污泥中磷在水热碳化后形态发生改变,以Ca-P和Mg-P为主。Ca-P和Mg-P具有高生物利用度,有利于后续化肥生产。此外,水热炭中还存在 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 两种金属氧化物,这与Fe、Al在Hedley顺序提取法中浸出效率的结果一致。水热碳化后,污泥中磷的主要存在形态由Al-P(少部分以Fe-P形态存在)转变为Ca-P、Mg-P。因此,以水热碳化对污泥进行预处理,将污泥转化为水热炭,有利于磷的后续提取回收和利用。

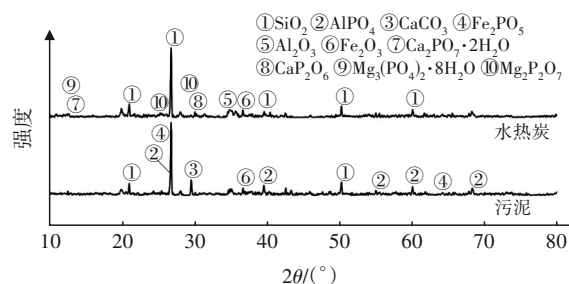


图2 污泥和水热炭的XRD图谱

Fig.2 XRD patterns of sludge and hydrothermal carbon

### 2.2 硫酸浓度对水热炭中磷及金属浸出率的影响

在水热碳化温度为260  $^{\circ}\text{C}$ 、浸出时间为120 min、液固比为50 mL/g的条件下,分析硫酸浓度(0、0.01、0.05、0.1、0.3、0.5、0.8、1.0 mol/L)对P、Ca、Fe、Al浸出率的影响,结果如图3所示。可以看出,水热炭中磷的浸出率总体上随着硫酸浓度的增加而升高,从14.5%(硫酸浓度为0.01 mol/L)上升到98%(硫酸浓度为0.8 mol/L),说明硫酸浓度对磷浸

出率的影响十分显著。水热炭中钙磷酸盐(如羟基磷灰石等)迅速释放,使浸出液中磷的浓度增加。

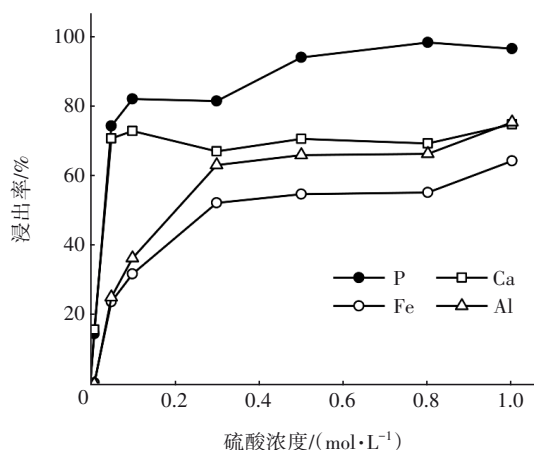
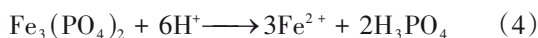
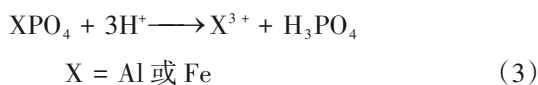
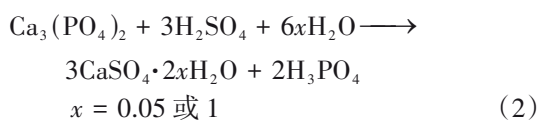
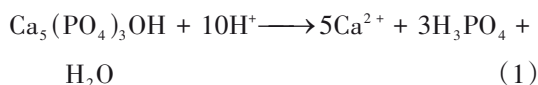


图3 硫酸浓度对P、Ca、Fe、Al浸出率的影响

Fig.3 Effect of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentration on leaching rates of P, Ca, Fe and Al

含磷物质溶解的化学反应过程见式(1)~(4)<sup>[7]</sup>。当硫酸浓度增加至1.0 mol/L时,水热炭中磷的浸出率呈现下降趋势,这与Shiba等<sup>[8]</sup>的研究结果类似,可能是由于金属发生了成核现象,过多的硫酸包裹在基质表面,使得浸出率降低。因此,用化学提取法提取磷时,选用的硫酸浓度不宜过高。考虑经济因素,硫酸浓度为0.5 mol/L时,磷的浸出率为93.8%,绝大部分磷被提取出来,因此后续实验采用该浓度。



钙溶解度对酸的敏感性高于铁和铝。当硫酸浓度为0.05~1.0 mol/L时,水热炭中钙的浸出率基本保持在70%左右。当硫酸浓度为0.01 mol/L时,铁和铝的浸出率很低,均低于0.01%,但随着硫酸浓度增加至1.0 mol/L时,铁和铝的浸出率分别增至64.1%和75.1%,这与Biswas等<sup>[4]</sup>的实验结果一致。在水热炭中,钙、铁、铝不仅与磷生成磷酸盐矿物,同时还形成了MgO<sub>0.77</sub>FeO<sub>0.23</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和CaCO<sub>3</sub>

等金属化合物,这些物质在0.5 mol/L硫酸作用下也随之溶解,从而使钙、铁、铝的浸出率增大。

### 2.3 浸出时间对水热炭中磷及金属浸出率的影响

在水热炭化温度为260℃、硫酸浓度为0.5 mol/L、液固比为50 mL/g的条件下,分析浸出时间对P、Ca、Fe、Al浸出率的影响,结果如图4所示。可以看出,磷的浸出率随浸出时间先快速增加后逐渐减少,在120 min时达到最大值93.8%。浸出时间与酸的种类有关,若要达到相同的浸出率,有机酸、硝酸、盐酸均比硫酸的浸出时间短<sup>[7]</sup>。此外,炭的种类也会影响磷浸出时间。Kleemann等<sup>[9]</sup>认为,污泥热解炭在浸出30 min时,磷的释放效果最好。120 min后,磷的浸出率开始下降,360 min时已降至74.2%。这可能是由于随着反应时间的增加,基质表面形成了CaSO<sub>4</sub>晶体,其与赤铁矿和石英晶体形成位阻效应,限制了酸的接触<sup>[6]</sup>。同时浸出液的pH也随时间的延长而升高,水热炭中存在的金属会与磷形成不溶性化合物,降低磷的释放效果。

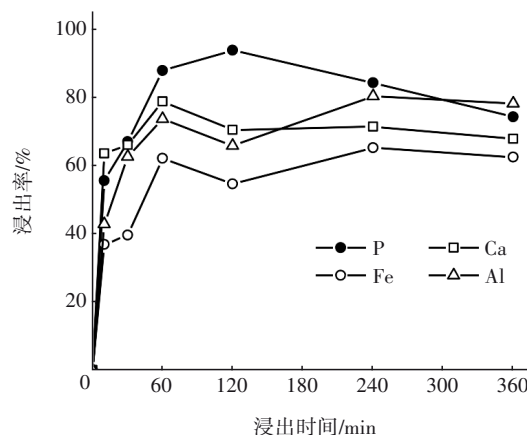


图4 浸出时间对P、Ca、Fe、Al浸出率的影响

Fig.4 Effect of contact time on leaching rates of P, Ca, Fe and Al

采用0.5 mol/L硫酸浸出的前10 min,水热炭中钙的浸出速度较快;60 min时,钙的浸出率达到最大值78.7%;之后下降并趋于平稳,360 min时浸出率接近70%,这可能是由于水热炭中释放的钙与硫酸形成了石膏(CaSO<sub>4</sub>)晶体,降低了钙的浸出率。整体来看,铁和铝的浸出率随着浸出时间的延长而升高,且所需浸出时间长,60 min时浸出率分别为62.1%和73.6%;但在120 min时,铁和铝的浸出率分别下降了12.2%、10.6%。相比之下,铁的浸出率较低,最高只有65.1%,这与Biswas等<sup>[4]</sup>所得结果类



似。水热炭中有31.6%的残渣态铁,因此浸出率较低。浸出时间对钙、铁、铝浸出率的影响主要是因为这些金属的存在形态及理化性质不同而有较大差异,可能与浸出化合物的吸附-解吸、溶解-沉淀-共沉淀、络合-解离等过程有关。

2.4 液固比对水热炭中磷及金属浸出率的影响

在水热炭化温度为260℃、硫酸浓度为0.5 mol/L、浸出时间为120 min的条件下,分析液固比(10、20、50、100、150、200 mL/g)对P、Ca、Fe、Al浸出率的影响,结果如图5所示。可以看出,当液固比为50 mL/g时,磷的浸出率达到最大值93.8%,此时钙、铁和铝的浸出率分别为70.4%、54.5%、65.8%;当液固比>50 mL/g时,磷的浸出率缓慢下降。Kleemann等<sup>[9]</sup>认为,在相同液固比下,污泥焚烧灰中磷的浸出能力强于热解炭,且最佳液固比为10 mL/g。Biswas等<sup>[4]</sup>发现,当硫酸浓度>0.5 mol/L时,无论液固比为多少,污泥焚烧灰中磷的释放率都接近100%。可见,液固比对水热炭中磷的释放与提取剂浓度有关,两者乘积为提取剂的投加量。采用不同浓度和液固比组合会对磷的提取结果产生影响。

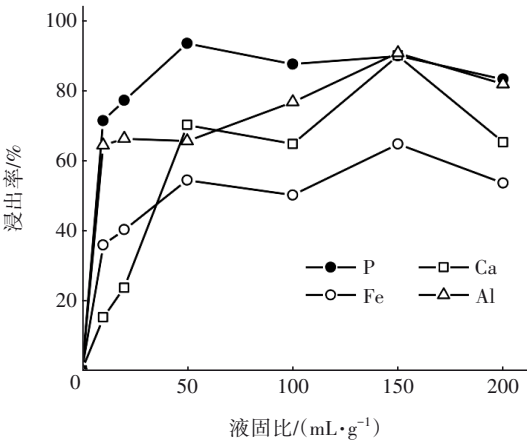


图5 液固比对P、Ca、Fe、Al浸出率的影响  
Fig.5 Effect of liquid-solid ratio on leaching rates of P, Ca, Fe and Al

随着液固比的增大,钙、铁、铝的浸出率整体呈上升趋势。液固比对钙的浸出影响较大,当液固比为10 mL/g时,钙的浸出率只有15.2%,但当液固比增至150 mL/g时,钙的浸出率达到最大值90.3%。由于水热炭中存在不溶性铁化合物,铁的浸出率总体不高,最大值仅为64.9%。当液固比为10 mL/g时,铝的浸出率为64.6%,远高于钙和铁,可以看出当固液接触面积较小时,水热炭中铝优先被提取。

当液固比为150 mL/g时,铝的浸出率为90.9%。该浸出体系在液固比为200 mL/g时,钙、铁、铝的浸出率均下降,可能是因为较大的液固比无法维持较低的pH,影响了浸出效果。

浸提剂体积与水热炭质量的比值是浸出过程中一个重要的技术经济参数。液固比的大小影响水热炭与提取剂的接触面积。合适的液固比既能保证水热炭与提取剂充分接触,又利于提取剂维持较低的pH。若液固比较低,虽然浸出液能维持较低的pH,但不利于固液之间的相互接触。为增强接触面积,需要增加提取剂投加量。当液固比较大时,固液相互接触比较充分,但不利于提取剂维持较低的pH,浸出效果也会降低,因此也需要增加提取剂投加量。为了降低浸出成本,应在浸出液中磷的提取率与液固比之间取得平衡<sup>[9]</sup>,优先选择用较少的提取剂投加量来获得较高的磷提取率。同时,为了提高经济效益,磷提取过程还可以考虑钙、铁、铝的回收。

2.5 经济性分析

污泥水热炭中的再生磷常用于生产磷肥。结合现有文献资料<sup>[10]</sup>,以生产磷酸氢二铵(DAP)为例,估算并对比水热炭回收磷制取磷肥与矿石磷肥生产成本。估算生产成本中包括原料、运输费用(以公路运输200 km计算)及其生产成本,不考虑设备维修、折旧等费用。其中,水热炭以污泥为原料制备,处置污泥收取的费用一般可以覆盖水热炭的制备成本,故原料成本按“0”计算。水热炭用硫酸浸提后选用添加硫化物沉淀分离重金属/氨化工艺制取磷肥。成本估算结果见表2。

表2 不同原料生产磷酸氢二铵的成本

Tab.2 Costs of producing DAP from different raw materials

项 目	回收磷生产		矿物生产	
生产规模/kg	1	50	1	50
原料成本/元	0	0	1.1	55
酸化溶解/元	0.37	18.5	0.07	3.5
重金属脱除/元	0.06	3	0	0
氨化和加工/元	0.75	37.5	0.75	37.5
运输成本/元	0.41	20.5	0.18	9
回收金属抵扣/元	-0.15	-7.5	0	0
总成本/元	1.44	72	2.10	105

由表2可知,再生磷肥因原料价格和金属回收抵扣导致生产成本低于矿石磷肥。即使水热炭将

来会收取一定成本,但由于其制取原料是污泥,价格应该不会超过矿石磷。提取磷后的水热炭若能回收制备燃料棒或掺烧,则能进一步降低成本。所以水热炭回收磷制取磷肥存在经济优势。加上再生磷肥更符合我国发展理念,今后定会取得政府的认可与扶植,获得政策优惠与经济补贴<sup>[10]</sup>,所以用水热炭回收磷制取磷肥存在较大的获利空间。

### 3 结论

水热碳化后,污泥中磷的主要存在形态由 Al-P 变为 Ca-P 和 Mg-P,更有利于磷回收利用。硫酸浓度对水热炭中磷及钙、铁、铝的浸出效果影响显著,整体随着硫酸浓度增加呈上升趋势,但超过 0.8 mol/L 时,磷的浸出率有所下降。水热炭中磷与钙的浸出率随浸出时间先增加后下降,溶解速率较大;而铁和铝的浸出率则逐渐增大,且所需浸出时间较长。液固比是浸出过程中重要的技术经济参数,当液固比为 50 mL/g 时,水热炭中磷的浸出率达到最大值 93.8%;钙、铁、铝的浸出率整体呈上升趋势,在 150 mg/L 时达到最大值,分别为 90.3%、64.9%、90.9%。在硫酸浓度为 0.5 mol/L、浸出时间为 120 min、固液比为 50 mL/g 的条件下,水热炭中磷的浸出效果最好,浸出率为 93.8%,钙、铁和铝的浸出率分别为 70.4%、54.5%、65.8%。在磷的回收过程中,若考虑钙、铁、铝的分离与回收,可以进一步降低成本。

### 参考文献:

- [1] 戴晓虎,侯立安,章林伟,等.我国城镇污泥安全处置与资源化研究[J].中国工程科学,2022,24(5):145-153.  
DAI Xiaohu, HOU Li'an, ZHANG Linwei, *et al.* Safe disposal and resource recovery of urban sewage sludge in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 145-153(in Chinese).
- [2] HUANG R X, TANG Y Z. Speciation dynamics of phosphorus during (hydro)thermal treatments of sewage sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(24): 14466-14474.
- [3] LI M, TANG Y Y, LU X Y, *et al.* Phosphorus speciation in sewage sludge and the sludge-derived biochar by a combination of experimental methods and theoretical simulation [J]. Water Research, 2018, 140: 90-99.
- [4] BISWAS B K, INOUE K, HARADA H, *et al.* Leaching of phosphorus from incinerated sewage sludge ash by means of acid extraction followed by adsorption on orange waste gel [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(12): 1753-1760.
- [5] COHEN Y. Phosphorus dissolution from ash of incinerated sewage sludge and animal carcasses using sulphuric acid [J]. Environmental Technology, 2009, 30(11): 1215-1226.
- [6] DONATELLO S, TONG D, CHEESEMAN C R. Production of technical grade phosphoric acid from incinerator sewage sludge ash (ISSA) [J]. Waste Management, 2010, 30(8/9): 1634-1642.
- [7] ACELAS N Y, LOPEZ D P, BRILMAN D W F, *et al.* Supercritical water gasification of sewage sludge: gas production and phosphorus recovery [J]. Bioresource Technology, 2014, 174: 167-175.
- [8] SHIBA N C, NTULI F. Extraction and precipitation of phosphorus from sewage sludge [J]. Waste Management, 2017, 60: 191-200.
- [9] KLEEMANN R, CHENOWETH J, CLIFT R, *et al.* Comparison of phosphorus recovery from incinerated sewage sludge ash (ISSA) and pyrolysed sewage sludge char (PSSC) [J]. Waste Management, 2017, 60: 201-210.
- [10] 郝晓地,于文波,时琛,等.污泥焚烧灰分磷回收潜力分析及市场前景[J].中国给水排水,2021,37(4):5-10.  
HAO Xiaodi, YU Wenbo, SHI Chen, *et al.* Potential analysis and market prospects of phosphorus recovery from the bottom ashes of sludge incineration [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(4): 5-10(in Chinese).

作者简介:方俊华(1965—),男,浙江金华人,博士,副教授,主要研究方向为污泥处理与处置。

E-mail:1400525812@qq.com

收稿日期:2023-05-27

修回日期:2023-06-27

(编辑:任莹莹)