

污泥热水解过程中磷的释放规律与影响因素

徐志墙¹, 李 瑶¹, 周爱朝¹, 姚宸朕^{1,2}, 刘荣荣¹

(1. 西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 中节能工业水务工程有限公司, 陕西 西安 710048)

摘 要: 剩余污泥中富含磷物质, 具有较大的回收利用价值。从污泥中高效回收磷最重要的步骤是将磷尽可能地释放到溶液中。以含固率为5%的剩余污泥(干污泥中磷占比为1.1%)为研究对象, 进行了热水解磷释放规律研究。结果显示: 当采用低温水解与投加酸联合处理剩余污泥时, 污泥絮体被破坏, 磷的释放量显著增加。当温度为75℃、加热时间为1 h、pH值为3时, TP和IP的释放量可达到最大, 分别为311.9 mg/L和293.8 mg/L, 是原污泥液相中TP和IP含量的7.9倍和8.4倍。将经上述条件处理的污泥混合液在35℃下静置24 h, 污泥液相中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度由96.0 mg/L提高到318.7 mg/L, 同时伴随着SCOD浓度的明显减小。因此, 通过低温短时热水解联合酸处理可显著提高污泥中磷和氨氮的释放量, 可为后续以鸟粪石沉淀法回收磷创造有利条件。

关键词: 剩余污泥; 热水解; pH值; 磷释放; 影响因素

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)21-0024-07

Phosphate Release and Influencing Factors Analysis during Sludge Thermal Hydrolysis

XU Zhi-qiang¹, LI Yao¹, ZHOU Ai-chao¹, YAO Chen-zhen^{1,2}, LIU Rong-rong¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Energy Saving Industrial Water Engineering Co. Ltd., Xi'an 710048, China)

Abstract: The phosphorus (P) in excess sludge (ES) produced by the sewage treatment plant has huge recycling value. The most important step of P recovery from the ES is to release as much P as possible into the solution. In this work, the ES with a solid content of 5% was used to study P release during the thermal hydrolysis. The results showed that when the ES was treated with low-temperature and pretreated with acid, the floc of the sludge was destroyed, and the release of P increased significantly. When the temperature was 75℃ for 1 h, the release of the total P (TP) and dissolving inorganic P (IP) in the liquid phase of raw sludge reached the maximum level, 311.9 mg/L and 293.8 mg/L, respectively, and was increased by 7.9 times and 8.4 times compared with raw sludge. When the sludge mixture was allowed to stand for 24 h at 35℃, the concentration of ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) increased from 96.0 mg/L to 318.7 mg/L, accompanied by a significant decrease in the concentration of soluble chemical oxygen demand (SCOD). These results demonstrated that the combination of low-temperature and short-time thermal and acid pretreatment could significantly increase the P and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ release in the

sludge, which created favorable conditions for P recovery by struvite precipitation.

Key words: excess sludge; thermal hydrolysis; pH; phosphorus release; influencing factor

磷是所有生命形式不可或缺的营养元素,又是一种不可再生而面临枯竭的重要资源^[1]。因此,从各类富含磷的残余物中回收磷,并开发促进磷释放和回收的方法越来越受到广泛的关注^[2,3]。污水处理厂产生的剩余污泥中磷含量丰富,如传统活性污泥法产生的污泥中含有1%~2%的磷,而生物强化除磷工艺产生的污泥中磷含量高达5%~7%^[4]。因此,剩余污泥具有巨大的磷回收利用价值。

在污泥磷回收中,鸟粪石沉淀法回收磷具有较高的经济效益,且同时还可以回收氮,操作简单,运行费用低廉,不仅可实现污泥的减量化和资源化,还可在农业生产中再次被利用^[5,6]。鸟粪石回收磷是在剩余污泥上清液或发酵液中加入镁和氨,以磷酸铵镁的形式回收磷。为了提高磷回收效率,应尽可能使污泥中的磷释放到液相。所以如何控制磷的释放条件,在高效释磷的同时,避免磷与污泥中存在的钙、镁、铁等金属离子结合,同时还需提高污泥中氨的释放率,减少鸟粪石磷回收时氨的投加量。

在剩余污泥中大部分磷是以多聚磷酸盐的形式储存在PAOs及EPS中^[7],为了促进这些磷的释放和提高有机物水解速率,一些预处理方法(热、机械和化学)已被采用^[8,9],其中低温热水解在提高生物可降解性和磷释放量的同时,消耗的能量较低^[10],是生物释磷的3.7倍^[11]。

Kuroda等发现,将富含聚磷的活性污泥在水浴中加热到70℃并维持1h,能够使总磷含量87%的磷释放到液相中。而Zhang等^[12]的研究表明,污泥经70℃和80min的热水解预处理后,总磷的释放率只有29%。此外,磷释放过程受液相pH值的影响显著,Xu等^[13]的研究表明,在pH值为2和12时,污泥中总磷的释放率分别为36.2%和12.4%,其中在酸性条件下磷的释放主要来自于无机磷(IP)的溶解,在碱性条件下磷的释放则主要来自非磷灰石无机磷(NAIP)和有机磷(OP)。

可见,受加热温度、加热时间、液相pH值等多种因素的影响,污泥热水解过程中磷的释放规律存在较大差异,同时受释放的SCOD、氨氮等物质的影响,使得鸟粪石磷回收效果存在较大的不确定性。因此,本研究的目标为:通过对加热温度、加热时间、

pH值等因素进行分析,获得磷释放的最佳条件,探讨污泥释放的SCOD、氨氮等对磷存在状态的影响,为提高剩余污泥鸟粪石磷回收效率奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

污泥取自西安市第四污水处理厂倒置A²/O工艺产生的剩余污泥。将污泥取回后,制成含固率为5%的剩余污泥(干污泥中磷占比为1.1%)待用。污泥的pH值为6.41~6.81,其他参数如表1所示。上清液中TP、IP、NH₄⁺-N浓度分别为35.2~37.3、34.5~37.1、36.2~41.8 mg/L。

表1 污泥混合液各项参数

Tab.1 Sludge mixture parameters mg·L⁻¹

项目	SCOD	TCOD	TP	IP
数值	106~265	44 707~48 303	573.2	406.5

1.2 试验方法

试验采用单因素方法:固定污泥加热时间为1h、污泥pH值为6,分别在45、60、75、90、105、120、135和150℃下进行热水解处理,以确定最佳温度;在最佳热水解温度下,固定污泥pH值为6,控制加热时间分别为0.5、1、2、3、4、5和6h,以确定最佳加热时间;在最佳热水解温度和加热时间下,通过1 mol/L的HCl和NaOH将污泥混合液pH值分别调节为3、4、5、6、7、8、9、10、11,以确定最佳pH值。

1.3 分析方法

TP、IP、NH₄⁺-N、SCOD、Ca²⁺均按照国家标准方法进行测定。其中,TP及IP:钼锑抗分光光度法;NH₄⁺-N:纳氏试剂分光光度法;SCOD:污泥样品经0.45 μm滤膜真空抽滤后,抽滤液中所含的有机质为SCOD,采用快速消解分光光度法测定;Ca²⁺:火焰原子吸收光谱法。

污泥中各种形态的磷含量,采用欧洲标准测试测量组织提出的SMT法测定。SMT法^[14]将所提取的磷分为5种:非磷灰石无机磷(NAIP,与Fe、Mn、Al氧化物及其氢氧化物结合的磷,不稳定态磷也包括在其中)、磷灰石无机磷(AP,钙磷,包括与Ca结合的各种磷)、无机磷(IP)、有机磷(OP)以及总磷(TP)。测得干污泥中总磷及各组分磷含量后,换算成5%含固率污泥混合液的磷含量,根据SMT提取

法, $TP = OP + IP$, $IP = NAIP + AP$ 。一般认为, TP 的回收率在 97.2% ~ 103.2%、IP 的回收率在 95.5% ~ 104.7% 是合理的。原污泥中的磷含量见表 2。

表 2 污泥混合液总磷及不同形态磷的含量

Tab. 2 TP and different form of phosphorus content

in sludge mixture $mg \cdot L^{-1}$

项 目	NAIP	AP	IP	OP	TP
含量	291.6	116.0	406.5	168.4	573.2

2 结果与讨论

2.1 磷在不同条件下的释放规律

2.1.1 温度对磷释放的影响

在 pH 值为 6 条件下, 对剩余污泥 (含固率为 5%) 进行加热水解, 加热时间维持在 1 h, 温度变化范围为 45 ~ 150 °C。图 1 为不同加热温度下, 污泥中的磷释放到液相的情况。可见, 随温度的升高, 释放到液相中的磷含量呈先增大后降低的趋势。当加热温度为 75 °C 时, TP 和 IP 的释放量达到最大, 分别为 249.7、246.0 mg/L, 释放率分别为 43.6% 和 60.3%, 而 OP 的释放率只有 2.2%; 75 °C 后随着温度的上升, 释放到液相中的 TP 和 IP 浓度逐渐减小, 而 OP 浓度逐渐增大。当加热温度为 150 °C 时, TP 和 IP 释放量分别为 179.9、154.0 mg/L, 释放率分别为 31.4%、37.9%, 而 OP 释放率增至 15.4%。但热水解释放出的磷仍以 IP 为主, 占 TP 的 85.6%, OP 只占到 14.4%。温度超过 75 °C 后磷的释放率反而降低, 主要是由于同时释放出的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等金属离子浓度升高, 与 $PO_4^{3-}-P$ 结合形成沉淀所致。所以污泥经 75 °C 热处理后 IP 的释放量达到最高, 更利于后期进行鸟粪石磷回收。

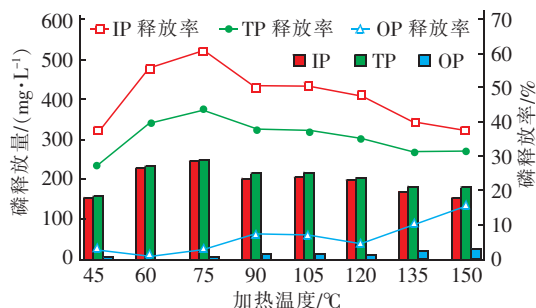


图 1 加热温度对磷释放的影响

Fig. 1 Effect of heating temperature on phosphorus release

2.1.2 加热时间对磷释放的影响

上述试验结果表明, 污泥磷释放的最佳处理温度为 75 °C。在加热温度为 75 °C、pH 值为 6 条件

下, 通过延长加热时间, 进一步探讨加热时间对磷释放的影响, 结果如图 2 所示。在加热时间为 0.5 h 时, TP 和 IP 的释放量分别为 210.0、207.0 mg/L, 释放率分别为 36.6% 和 50.7%; 加热时间为 1 h 时, TP 和 IP 的释放量分别增加至 230.0 和 226.8 mg/L, 释放率分别为 40.1% 和 55.8%, 而 OP 的释放率只有 1.9%。在加热时间为 2 h 时, TP 和 IP 释放量显著降低, 之后随着加热时间的延长, 磷的释放量呈增加趋势。在加热时间为 5 h 时, TP 和 IP 的释放量分别增加至 230.0 和 220.0 mg/L, 释放率分别为 40.1% 和 54.1%, 其 TP 释放率与加热时间为 1 h 时接近, 但 IP 的释放率降低, OP 的释放率却增加了。污泥释放出的 IP 是磷回收的有效部分, 因此加热时间为 1 h 是磷回收的最佳条件。

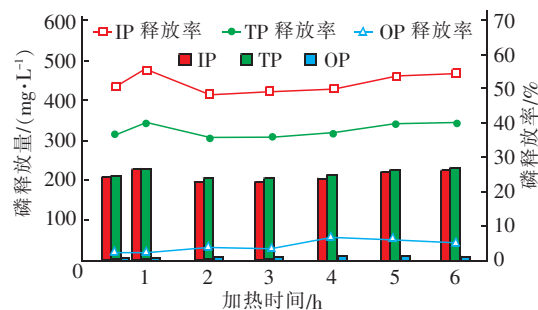


图 2 加热时间对磷释放的影响

Fig. 2 Effect of heating time on phosphorus release

2.1.3 pH 值对磷释放的影响

在上述确定的最佳加热温度和加热时间下, 进一步考察了 pH 值对磷释放量的影响, 结果见图 3。

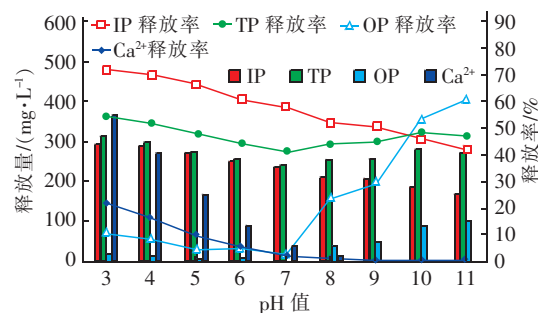


图 3 pH 值对磷释放的影响

Fig. 3 Effect of pH on phosphorus release

随着 pH 值的增大, IP 释放量呈逐渐下降趋势。而 OP 的释放量在 pH 值 > 7 之后逐渐增大, 导致 TP 释放量在 pH 值为 7 时达到最低值后, 随着 pH 值的继续增加, 释放量反而升高。在 pH 值为 3 时, 污泥中释放的 TP 和 IP 含量最高, 分别达 311.9

和 293.8 mg/L, TP 和 IP 的释放率高达 54.4% 和 72.3%。

由于污泥中含有较多的 Ca^{2+} 等阳离子,在碱性条件下, Ca^{2+} 更容易与 IP 结合形成磷酸钙沉淀^[15]。经分析,在 pH 值为 3 时污泥中释放的 Ca^{2+} 浓度约为 360 mg/L,但随着 pH 值的增加,液相中大量的 Ca^{2+} 与 IP 结合成溶度积更小的磷酸钙,导致 Ca^{2+} 含量呈显著降低趋势(见图 3),同时液相中的 IP 含量也降低。这将会影响后续鸟粪石磷回收的效率。在酸性条件下,IP 不易与 Ca^{2+} 等阳离子形成结晶产物,其一般在液相中以磷酸盐离子的形态存在。因此在 pH 值为 3 时 IP 的释放量最大,且主要以溶解态存在,更有利于后续磷的回收。

2.2 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的释放及对磷回收的影响

在 pH 值为 6、加热时间为 1 h 的条件下,热水解温度对污泥液相中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的影响见图 4。其中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为氨氮的释放量与挥发量之间的差值,因为液相中氨氮的残留量与氨氮的挥发量之间存在一定的平衡^[16]。随温度的升高,污泥释放出大量的氨氮,导致液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度增大,同时氨氮的挥发量也大大增加。当温度为 75 °C 时,液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 145.8 mg/L,而在 150 °C 时,液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 194.7 mg/L,是 75 °C 时的 1.3 倍,也表明氨氮的挥发量在 150 °C 时要大于 75 °C 时。温度越高,氨氮的损失量越大,越不利于污泥中氮、磷的回收。温度为 75 °C 时,虽然液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度不高,但挥发的损失量较少,可以通过中温静置的方式使大量的氨氮从污泥中释放到液相。

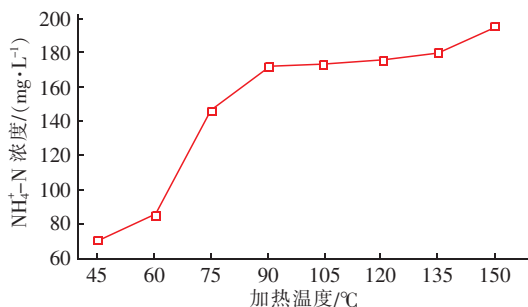


图 4 温度对液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的影响

Fig. 4 Effect of temperature on $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in liquid phase

在 pH 值为 6、加热温度为 75 °C 的条件下,加热

时间对液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的影响见图 5。当加热时间为 0.5 h 时,液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 118.6 mg/L。而当加热时间为 1 h 时,残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升到 139.0 mg/L,继续增加加热时间,液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度基本保持在 135.0 mg/L 左右,即液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度与氨氮的挥发量达到了平衡。可见,在加热时间为 1 h 时,液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高,同样还可通过后续的中温静置方法释放出大量的氨氮,以弥补鸟粪石法回收磷时氮的不足。

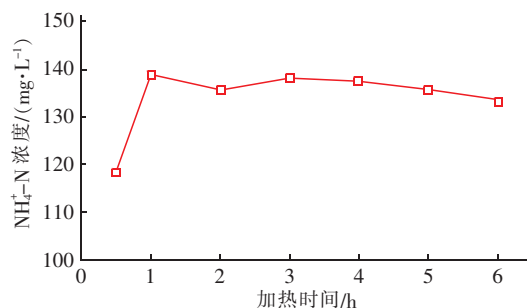


图 5 加热时间对液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的影响

Fig. 5 Effect of heating time on $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in liquid phase

图 6 是在加热温度为 75 °C、加热时间为 1 h 时, pH 值对液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的影响。在偏酸性条件下(pH 值为 3~7),液相中残留的氨氮浓度较低(小于 120 mg/L);当 pH 值为 7~9 时,液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度出现上升趋势,在 pH 值为 9 时残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度达到最大(173.2 mg/L);而在偏碱性(pH 值=9~11)条件下,液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度又出现下降趋势。

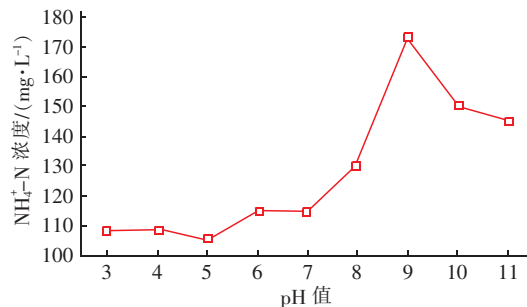


图 6 pH 值对液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的影响

Fig. 6 Effect of pH on $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in liquid phase

在 pH 值=7~9 时,由于污泥中蛋白质溶出后可进一步水解导致 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在 pH 值为 9 时达

到最大。在偏碱性条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 更容易与 OH^- 结合呈现 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 状态, 很容易从液相中挥发出来, 造成氨氮的损失。所以在偏酸性条件下, 虽然液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较低, 但可以通过后续中温静置方法释放出大量的氮。

在加热温度为 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 、加热时间为 1 h 、 pH 值为 3 的最佳释磷条件下, 液相中残留的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较低 ($90 \sim 130\text{ mg/L}$), 会影响以鸟粪石沉淀进行磷回收的效率。因此在短时酸热水解后, 将污泥混合液在 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下静置, 随着静置时间的加长, 液相的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度大幅度升高 (如图 7 所示)。当静置 24 h 后, 液相中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度由 96.0 mg/L 升高到 318.7 mg/L , 是 IP 的 2.4 倍 (物质的量之比), 远高于加热温度为 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 时液相中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度 (194.7 mg/L), 而液相中的 SCOD 浓度则发生了减少的现象。可能是液相中存在一些微生物可以将热水解过程中释放出的蛋白质等有机物进一步水解成氨氮, 结果导致液相 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的大幅度提高和 SCOD 的减少。可见, 在加热温度为 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 、加热时间为 1 h 、 pH 值为 3 的条件下, 污泥液相中可以得到高含量的磷, 之后通过中温静置的方法大幅度提高液相中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度, 在无需添加氮源的情况下, 就可以满足鸟粪石法同步回收氮、磷的要求。

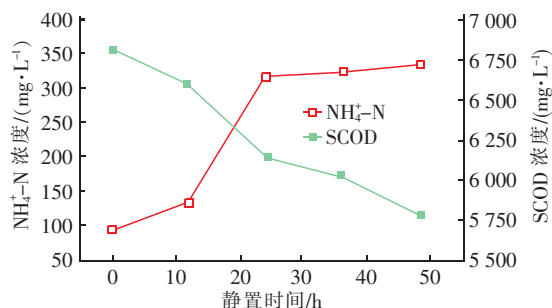


图7 污泥液相中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 SCOD 浓度随静置时间的变化

Fig. 7 Variation of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and SCOD in liquid phase

2.3 SCOD 的释放及其对磷回收的影响

在 pH 值为 6、加热时间为 1 h 条件下, 加热温度对 SCOD 释放量的影响见图 8。可见, SCOD 释放量随温度的升高而增加。当温度为 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 时, SCOD 释放量为 $5\,003.6\text{ mg/L}$, 温度为 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 时 SCOD 释放量为 $11\,353.2\text{ mg/L}$, 是 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 时的 2.27 倍。液相中有机物的浓度越高, 越会对鸟粪石磷回收产生影响, 会使磷的回收效率降低, 还会影响产物的纯度^[17]。所以应选择相对较低的加热温度, 以利于提

高后续的磷回收效率和产品纯度。

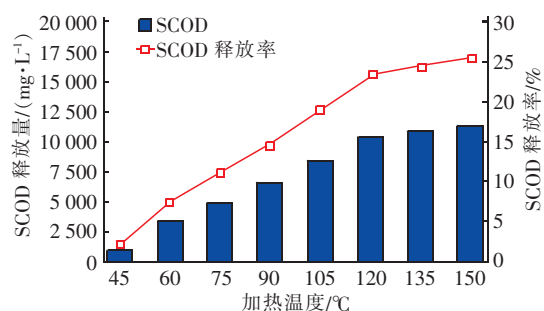


图8 加热温度对 SCOD 释放量的影响

Fig. 8 Effect of heating temperature on SCOD release

图9是在 pH 值为 6、加热温度为 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 加热时间对 SCOD 释放量的影响。当加热时间为 1 h 时, SCOD 的释放量为 $5\,130.4\text{ mg/L}$, 加热时间延长至 5 h , SCOD 的释放量增至 $7\,311.9\text{ mg/L}$, 为 1 h 的 1.4 倍, 但没有加热温度对 SCOD 释放量的影响显著。与 IP 和 TP 的释放特性不同, 随着加热时间的延长, 液相 SCOD 浓度逐渐升高。可能是由于随着加热时间的延长, 污泥混合液中细胞的破解程度增加所致。同样, 液相中过高的 SCOD 浓度会影响后续磷回收的效率和纯度, 且加热时间的延长还会消耗大量的能量, 所以从经济性方面考虑, 选择加热时间为 1 h 更有利于磷的回收。

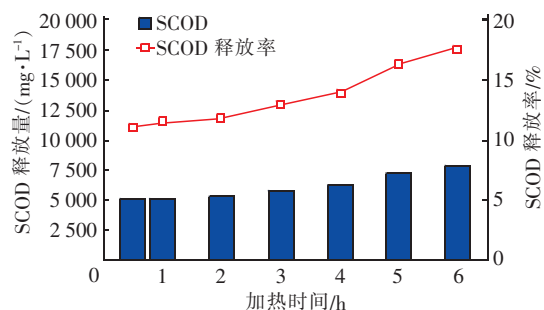


图9 加热时间对 SCOD 释放量的影响

Fig. 9 Effect of heating time on SCOD release

在不同 pH 值条件下, 污泥中 SCOD 的释放规律与磷的释放规律有所不同 (如图 10 所示)。在 pH 值为 7 时, 液相中的 SCOD 浓度最低, 仅为 $5\,451.5\text{ mg/L}$ 。在酸性条件下液相中的 SCOD 浓度较高, 如 pH 值为 3 时 SCOD 浓度为 $8\,229.2\text{ mg/L}$ 。在碱性条件下, 随着 pH 值的升高, 液相 SCOD 释放量高于酸性条件下的释放量。当 pH 值为 11 时, SCOD 释放量达到最大值, 为 $10\,420.4\text{ mg/L}$, 比 pH 值为 3 时高出近 30%。表明在碱性条件下污泥细

胞的破解程度更高^[18],但释放出的 OP 量也增加了(见图3),且释放出的 IP 更容易与 Ca^{2+} 等金属离子结合形成沉淀,导致液相中 IP 的含量减少。所以在酸性条件下,释放出的 IP 更多,而 SCOD 含量较低(原污泥 TCOD 约为 44 707 mg/L,释放出的 SCOD 只占其 18% 左右),更有利于后续通过鸟粪石沉淀法回收磷。

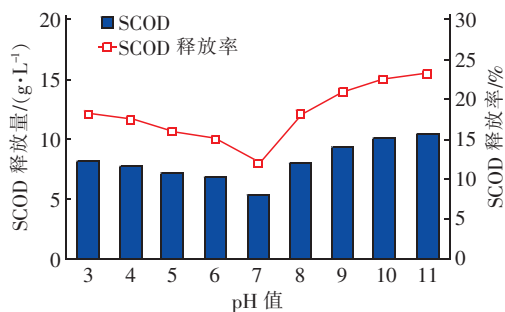


图10 pH值对SCOD释放量的影响

Fig. 10 Effect of pH on SCOD release

3 结论

① 采用低温热水解和酸联合处理的方法,可显著提高污泥中 IP 的释放量。对于含固率为 5% 的剩余污泥(干污泥中磷占比为 1.1%),磷释放的最佳条件是加热温度为 75 ℃、加热时间为 1 h、pH 值为 3。

② 将在加热温度为 75 ℃、加热时间为 1 h、pH 值为 3 条件下处理的污泥混合液在 35 ℃ 下放置 24 h 左右,液相中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度由 96.0 mg/L 升至 318.7 mg/L,是 IP 的 2.4 倍(物质的量之比),在不用外加氮源的条件下,更有利于磷的回收。

③ 液相中 SCOD 浓度过高会降低磷回收的效率,影响产物的纯度。在最佳磷释放条件下,液相 SCOD 浓度只占 TCOD 的 18% 左右,对后续磷回收影响较小。

参考文献:

- [1] Cordell D, Drangert J O, White S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought[J]. *Global Environmental Change*, 2009, 19(2): 292–305.
- [2] Rittmann B E, Mayer B, Westerhoff P, et al. Capturing the lost phosphorus[J]. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 846–853.
- [3] Wu L, Zhang C, Hu H, et al. Phosphorus and short-chain fatty acids recovery from waste activated sludge by anaerobic fermentation: Effect of acid or alkali pretreatment[J]. *Bioresour Technol*, 2017, 240: 192–196.
- [4] Yuan Z, Pratt S, Batstone D J. Phosphorus recovery from wastewater through microbial processes[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, 23(6): 878–883.
- [5] Shu L, Schneider P, Jegatheesan V, et al. An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant[J]. *Bioresour Technol*, 2006, 97(17): 2211–2216.
- [6] Wu Q, Bishop P L. Enhancing struvite crystallization from anaerobic supernatant[J]. *Journal of Environmental Engineering & Science*, 2015, 89(3): 21–29.
- [7] Cloete T E, Oosthuizen D J. The role of extracellular exopolymers in the removal of phosphorus from activated sludge[J]. *Water Res*, 2001, 35(15): 3595–3598.
- [8] Zou J, Li Y. Anaerobic fermentation combined with low-temperature thermal pretreatment for phosphorus-accumulating granular sludge: Release of carbon source and phosphorus as well as hydrogen production potential[J]. *Bioresour Technol*, 2016, 218: 18–26.
- [9] Steckenmesser D, Vogel C, Adam C, et al. Effect of various types of thermochemical processing of sewage sludges on phosphorus speciation, solubility, and fertilization performance[J]. *Waste Manage*, 2017, 62: 194–203.
- [10] Val del Rio A, Morales N, Isanta E, et al. Thermal pretreatment of aerobic granular sludge: impact on anaerobic biodegradability[J]. *Water Res*, 2011, 45(18): 6011–6020.
- [11] 薛涛, 黄霞, 郝王娟. 剩余污泥热处理过程中磷、氮和有机碳的释放特性[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(23): 22–25.
- [12] Xue Tao, Huang Xia, Hao Wangjuan. Characteristics of phosphorus, nitrogen and total organic carbon release in thermal excess sludge treatment process[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(23): 22–25 (in Chinese).
- [13] Zhang M Y, Kuba T. Inhibitory effect of metal ions on the poly-phosphate release from sewage sludge during thermal treatment[J]. *Environ Technol*, 2014, 35(9/12): 1157–1162.
- [14] Xu Y, Hu H, Liu J, et al. pH dependent phosphorus release from waste activated sludge: contributions of phosphorus speciation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 267: 260–265.
- [15] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—a synthesis of recent works[J]. *Fresenius*

- Journal of Analytical Chemistry, 2001, 370(2/3): 224 - 228.
- [15] 程振敏, 魏源送, 刘俊新. 酸碱预处理对常压微波辐射剩余活性污泥磷释放的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 1110 - 1114.
- Cheng Zhenmin, Wei Yuansong, Liu Junxin. Effect of acid and alkali on phosphorus release from sewage sludge in the microwave treatment process[J]. Environmental Science, 2009, 30(4): 1110 - 1114 (in Chinese).
- [16] Weiler R R. Rate of loss of ammonia from water to the atmosphere[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 2011, 36(6): 685 - 689.
- [17] 陶飞飞, 田晴, 李方, 等. 共存杂质对磷酸铵镁结晶法回收磷的影响研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(11): 2437 - 2441.
- Tao Feifei, Tian Qing, Li Fang, et al. Effects of coexisting impurities on phosphorus recovery in magnesium ammonium phosphate crystallization[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(11): 2437 - 2441 (in Chinese).
- [18] 许德超, 周礼杰, 尹魁浩, 等. 低温热碱破解低有机质污泥及磷形态分析[J]. 环境工程学报, 2017, 11

(10): 5621 - 5629.

Xu Dechao, Zhou Lijie, Yin Kuihao, et al. Disintegration and phosphorus forms of alkaline pretreatment with low-temperature heating for low-organic sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(10): 5621 - 5629 (in Chinese).



作者简介: 徐志婧(1969 -), 女, 重庆人, 博士, 教授, 主要从事污水再生利用与水生态修复技术研究。

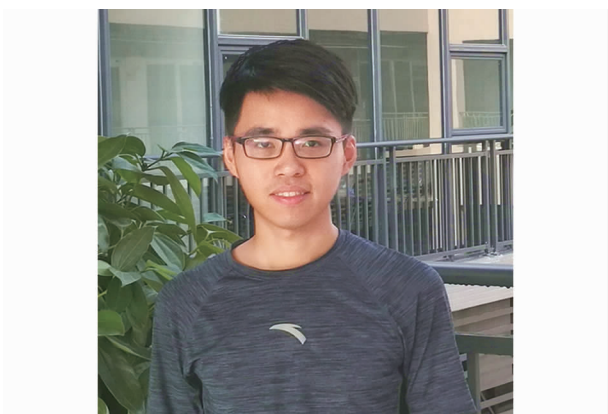
E-mail: 595269472@qq.com

收稿日期: 2018 - 06 - 05

(上接第23页)

- O_1 - O_2 biofilm system[J]. Technology of Water Treatment, 2008, 34(4): 12 - 18 (in Chinese).
- [8] 张朝升, 章文菁, 方茜, 等. DO对好氧颗粒污泥短程同步硝化反硝化脱氮的影响[J]. 环境工程学报, 2009, 3(3): 413 - 416.
- Zhang Chaosheng, Zhang Wenjing, Fang Qian, et al. Effect of DO on nitrogen removal process by granular sludge in shortened simultaneous nitrification and denitrification[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(3): 413 - 416 (in Chinese).
- [9] 孟了, 陈石. 亚硝酸型硝化工艺处理高氨氮渗滤液的试验研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(17): 79 - 81.
- Meng Liao, Chen Shi. Nitrous nitrification for treatment of high ammonia nitrogen landfill leachate[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(17): 79 - 81 (in Chinese).
- [10] 史一欣, 倪晋仁. 晚期垃圾渗滤液短程硝化影响因素研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(7): 110 - 114.
- Shi Yixin, Ni Jinren. Study on factors affecting shortcut

nitrification of mature landfill leachate[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007, 1(7): 110 - 114 (in Chinese).



作者简介: 王永庆(1993 -), 男, 广东阳春人, 硕士研究生, 从事高浓度废水脱氮技术研究。

E-mail: 506306167@qq.com

收稿日期: 2018 - 03 - 23