

造纸白泥和粉煤灰的添加对污泥消化液中氮磷回收的影响

李小建^{1,2} 冯文谦¹ 王德汉^{1*} 邓加曦¹ 周振鹏¹

(1. 华南农业大学资源环境学院环境科学与工程系, 广州 510642; 2. 惠州市欣荣环境保护科技有限公司, 惠州 516001)

摘要 污泥厌氧消化液中含有丰富的氮磷,若直接排放到环境中,将会对附近水体造成严重污染。由于消化液中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的含量很低,严重影响了氮磷的回收效果。把造纸白泥和粉煤灰引入到污泥厌氧消化液氮磷的回收当中,可以明显地提升消化液 pH 和提高 $PO_4^{3-}-P$ 和 NH_3-N 回收率。实验结果表明:当造纸白泥添加量为 $4\text{ g}/(\text{L}\cdot\text{h})$ 时,曝气 12 h 后, pH 可达 10.19, 此时 $PO_4^{3-}-P$ 和 NH_3-N 回收率分别达到 64% 和 45%; 而当粉煤灰添加量为 $4\text{ g}/(\text{L}\cdot\text{h})$ 时,曝气 12 h 后, pH 达到 9.63, $PO_4^{3-}-P$ 和 NH_3-N 回收率分别为 46% 和 41%。但仅用曝气方式处理, 12 h 后, pH 值仅为 8.52, $PO_4^{3-}-P$ 和 NH_3-N 回收率分别只有 20% 和 18%。实验结果还表明,水力停留时间(HRT)越大, pH 上升速度越快,幅度越大,氮磷的回收效果就越好。

关键词 造纸白泥 粉煤灰 污泥消化液 氮磷回收

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)12-4655-06

Recovery of nitrogen and phosphorus from digested effluent of sludge by paper mill lime mud and fly ash addition

Li Xiaojian^{1,2} Feng Wenqian¹ Wang Dehan¹ Deng Jiayi¹ Zhou Zhenpeng¹

(1. Department of Environmental Science & Engineering, College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Huizhou Xinrong Environmental Protection Technology Co. Ltd., Huizhou 516001, China)

Abstract The anaerobically digested effluent of sludge has plenty of nitrogen and phosphorus, when the digested effluent of sludge is discharged into the environment directly without treatment, the water body would be polluted seriously. There are not enough Mg^{2+} and Ca^{2+} contents to form MAP in the digested effluent of sludge, which inhibit the effects of nitrogen and phosphorus recovery seriously. The paper mill lime mud (PMLM) and fly ash (FA) were introduced into the recovery of nitrogen and phosphorus from digested effluent of sludge, which could raise the pH and increase the effects of nitrogen and phosphorus recovery of anaerobically digested effluent of sludge obviously. The experimental results showed that when the dosage of PMLM was $4\text{ g}/(\text{L}\cdot\text{h})$, and the aeration time was 12 h, the recovery rates of $PO_4^{3-}-P$ and NH_3-N were 64% and 45%, respectively, as well as the pH value was 10.19. Besides, when the dosage of FA was $4\text{ g}/(\text{L}\cdot\text{h})$, and the aeration time was 12 h, the recovery rates of $PO_4^{3-}-P$ and NH_3-N were 46% and 41%, respectively, and the pH was 9.63. However, without PMLM and FA addition, when the aeration time was 12 h, the recovery rates of $PO_4^{3-}-P$ and NH_3-N were only 20% and 19%, respectively. Therefore, it was important to recover the nitrogen and phosphorus from anaerobically digested effluent of sludge with PMLM and FA addition. The results also showed that the lifting speed of pH accelerated when HRT increased, and the bigger the HRT was, the larger the lifting range was.

Key words paper mill lime mud; fly ash; digested effluent of sludge; recovery of nitrogen and phosphorus

磷是动植物生长不可缺少的营养元素,在自然界近乎是一种单向循环^[1]。同时,磷矿已被列为我国 2010 年后不能满足国民经济发展需要的 20 种矿产之一^[2],在磷资源紧缺日益尖锐的情况下,如何开拓可靠的磷资源渠道,已成为一项迫在眉睫的战略任务。而从环境保护的角度来说,磷是造成水体

基金项目:广东省中国科学院全面战略合作项目(2010A0901000035);科技部“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2008BADCB04);广东省科技计划项目(2008b030302044)

收稿日期:2011-10-09; 修订日期:2012-02-13

作者简介:李小建(1978-),男,博士研究生,主要从事废弃物资源化利用研究工作。E-mail:171227540@qq.com

* 通讯联系人, E-mail:dehanwang@scau.edu.cn

富营养化的重要因素,当环境水体中总磷浓度达到 0.02 mg/L 时,即可被视为富营养化水体。因此,从废水中回收磷资源既可以得到磷肥,又可以防止水体富营养化。

随着废水排放标准进一步严格化,更多的强化脱氮除磷工艺被使用,从而使更多的氮、磷存在于剩余污泥中^[3]。在厌氧消化处理中,污泥经过水解酸化,把微生物细胞里面的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放出来^[4],从而造成污泥厌氧消化液磷质量浓度达到几十 mg/L,甚至上百 mg/L,同时消化液中含有较高浓度的氨氮,在调节 pH 值到碱性条件下,如果能使消化液中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 Mg^{2+} 生成难溶性鸟粪石 ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, MAP) 沉淀,在去除污水中磷和氮的同时,也实现了对这两种营养元素的回收。但由于消化液中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量较低,严重影响了氮磷的回收效果,现时多数研究都是通过外加镁源如 $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 来提高废液中 Mg^{2+} 含量,并利用 NaOH 调节废液中的 pH,以实现强化对氮磷资源的回收效果^[5-7],但这样会增加处理成本,不利于规模化应用。因此,寻找一种物美价廉的添加剂对污泥厌氧消化液中氮磷回收来说非常重要。

国内外对于外投添加剂化学沉淀法回收氮、磷已有一些研究,段金明^[8]利用海水为沉淀剂,以化学沉淀法去除污泥脱水液中的氮、磷。Chimenos 等^[9]用低品位的 MgO 作为 Mg 源,用 MAP 沉淀法去除废水中的氮磷。Lee 等^[10]研究了用盐卤作为 MAP 法镁源的可行性,向纯溶液中添加盐卤,磷的去除率等于添加 MgCl_2 或海水的去除率。Quintana 等^[11]利用菱镁矿煅烧生产 MgO 的副产物 BMP 作为镁源,也取得很好的除磷效果。

本实验选用两种工业碱性废弃物(造纸白泥和粉煤灰),把它们应用到污泥厌氧消化液氮磷资源回收当中,并考察了反应过程中消化液中的 pH、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 的变化规律,为氮磷回收工艺提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 材料

实验污泥取自广州市大坦沙污水处理厂,以其污泥经厌氧消化处理后得到的消化液为研究对象。处理前的消化液于 4℃ 条件下密封静置保存 24 h 后取上清液,并将上清液用纱布过滤,滤液待用。其中

COD 为 1 300 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为 85 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 140 mg/L, Ca^{2+} 为 15 mg/L, Mg^{2+} 为 19 mg/L, pH 值为 8.1。

造纸白泥取自广宁县某造纸厂,为桉树木浆造纸碱回收的白泥。测得 pH 为 12.16,含水量为 78%,成分以 CaO 和 NaOH 为主,其中 CaO 的含量为 50% ~ 55%,MgO 的含量为 2.5% ~ 3%。在 105℃ 下烘干至恒重,研磨后过 100 目筛备用。

粉煤灰选自广东某发电厂,是以煤为燃料,从烟道气体中捕下来的细灰,是燃煤电厂排出的主要固体废弃物。测得 pH 为 11.05,含水量为 28%,其中 CaO 的含量为 20% ~ 25%,MgO 的含量为 1% ~ 1.5%。在 105℃ 下烘干至恒重,研磨后过 100 目筛备用。

1.2 实验装置

本实验采用的装置为流化床结晶絮凝反应器 (crystallizing and flocculating reactor, CFR)。装置由有机玻璃制成,分为进水与进样区、结晶絮凝反应柱、出水与回流区、曝气机、恒流泵等主要部分,容积约为 3 L 左右,有效容积 2.7 L。其主要结构见图 1。

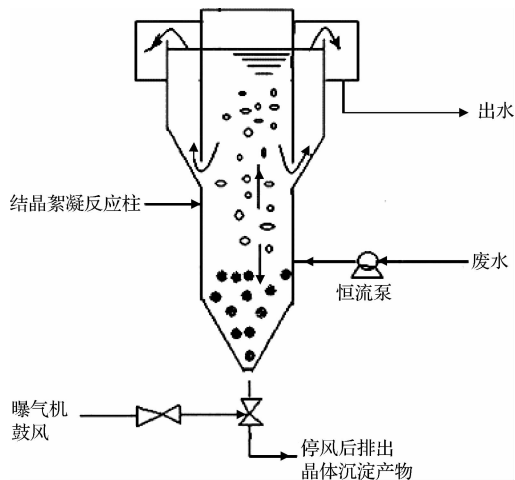


图 1 结晶絮凝反应器(CFR)结构图

Fig. 1 Structure of crystallizing and flocculating reactor(CFR)

反应器是根据传统的磷回收结晶反应器改进而成,废水通过恒流泵控制流速从反应柱中下部泵入,以微孔曝气头曝气,玻璃转子流量计调节曝气强度实现吹脱 CO_2 与搅拌。添加剂通过人工从反应柱顶部投入柱内,定时在出水口取样分析,底部设有开口收集沉淀产物。

1.3 实验方法

1.3.1 造纸白泥和粉煤灰的添加对污泥消化液中氮磷回收的影响实验

实验采用连续进水方式,即在反应器中加入

2.7 L 消化液后连续进出水。整个实验过程中曝气强度控制为 1 L/min, HRT 固定为 27 h, 即流量 Q 为 0.1 L/h, 造纸白泥和粉煤灰的添加量都分别为 0、2 和 4 g/(L·h), 即启动后以每 1 h 投加 1 次的间隔投加方式向反应柱中补充相应量的添加剂, 反应时间为 12 h, 当装置注入 2.7 L 消化液后开始曝气和计时, 并在反应进行的 0、0.5、2、5、8 和 12 h 取样, 消化液的 pH 值用 pH 计实时监测。

1.3.2 不同 HRT 对添加造纸白泥的消化液中氮磷回收的影响实验

整个实验过程中造纸白泥添加量固定为 4 g/(L·h), 即启动后以每 1 h 投加 1 次的间隔投加方式向反应柱中补充 10.8 g 的造纸白泥, 共投加 12 次。曝气强度控制为 1 L/min, HRT 分别为 5.4、9 和 27 h, 即流量 Q 分别控制为 0.5、0.3 和 0.1 L/h, 反应时间为 12 h, 装置注入 2.7 L 消化液后开始曝气和计时, 并在反应进行的 0、0.5、2、5、8 和 12 h 取样, 消化液的 pH 值用 pH 计实时监测。

1.4 测定项目及方法

取样后迅速用 0.45 μm 的滤膜过滤, 并立即向滤液中加入 2 μL (6 mol/L) 的 HCl, 使结晶反应停止。水样留待分析测定 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量以及 COD。

各指标的测定均按照相应的国家标准或行业标准进行。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 用钼酸铵分光光度法; $\text{NH}_3\text{-N}$ 用纳氏试剂比色法; COD 用重铬酸钾法; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 用原子吸收分光光度法。

2 结果与讨论

2.1 曝气过程中消化液 pH 的变化

如图 2 所示, 消化液 pH 都是随着曝气时间的延长而不断升高, 在反应进行的前 5 h 内, pH 值上升较快, 之后则变化较为缓慢。仅用曝气方式处理, 消化液 pH 在 12 h 后可达到 8.52, 而添加造纸白泥和粉煤灰后, 消化液 pH 值上升速度变快, 幅度变大。当造纸白泥添加量为 4 g/(L·h) 时, pH 在 2 h 后就达到 9.1, 经过 12 h 后可达到 10.19, 而当粉煤灰添加量为 4 g/(L·h) 时, 经过 12 h 后 pH 达到 9.63。从图还可以看出, 造纸白泥的添加对消化液 pH 的提升效果明显好于粉煤灰, 主要原因为白泥的碱性强于粉煤灰, 更有利于调节 pH。仅采用曝气方式提高消化液的 pH, 虽然可节约药剂的用量, 且不需另设搅拌装置, 但提升 pH 的范围有限, 且所需的

HRT 较长, 所耗的动力较多。因此, 若将曝气和投加碱性添加剂 2 种方式相结合来调节溶液 pH, 既可以缩短反应所需的 HRT, 又可以提高 pH 的上升速度和幅度。

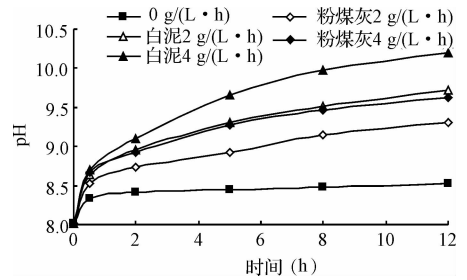


图 2 pH 随曝气时间的变化

Fig. 2 Variations of pH with aeration time

溶液 pH 条件决定了组成 MAP 的各种离子在水中达到平衡时的存在形态和活度。pH 过高, Mg^{2+} 和 OH^- 易结合生成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 沉淀, 在强碱条件下 ($\text{pH} > 11$) 还将产生更难溶于水的 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{pH} > 10$, 氨气部分溢出, $\text{pH} > 11$ 时, 大部分 NH_4^+ 转化为氨气溢出, 无法沉淀去除^[12]。大多数文献在研究污水中的磷用鸟粪石方法去除时, 采用的 pH 范围为 8.0 ~ 10.7^[13,14]。另外, 白泥和粉煤灰中还含有一定的 Ca^{2+} , 陈瑶等^[15] 研究发现 pH 为 8 时即有磷酸钙沉淀反应发生, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 开始下降。上述各处理的 pH 值基本保持在 8 ~ 10 之间, 比较适合鸟粪石和磷酸钙沉淀的形成, 因此, 可以认为沉淀的主要成分为鸟粪石和磷酸钙。同时, 实际运行中控制 pH 过高不但增加药剂成本, 还会对后续生物处理或出水造成影响, 因此一般考虑控制 pH 为 8 ~ 10。

2.2 曝气过程中消化液 COD 去除率的变化

从图 3 可看出, 经过添加造纸白泥和粉煤灰后 COD 去除率可达到 27% ~ 34%, 与只用曝气法处理

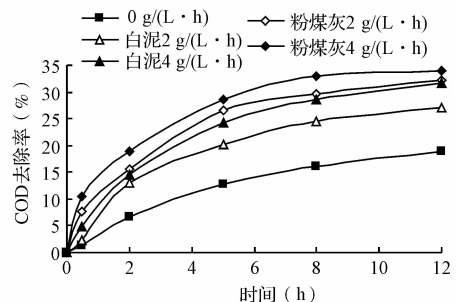


图 3 COD 去除率随曝气时间的变化

Fig. 3 Variations of COD removal rate with aeration time

(去除率为19%)相比效果要好,已有研究表明,在鸟粪石的晶体形成过程中产生的絮体能吸附部分有机物^[16],而白泥和粉煤灰本身也有一定的吸附性能,所以对COD的去除效果好于仅用曝气方式处理。从图还可以看出,粉煤灰的处理效果比造纸白泥的要好,主要原因可能为粉煤灰的吸附能力强于造纸白泥,在环境保护上主要应用的是粉煤灰的吸附性能,吴少林等^[17]将PAC与粉煤灰按2:5的投加比混合复制成一种新型复合混凝吸附剂处理皮蛋废水,在投加量为5 g/L, pH为6.5左右,搅拌时间约为14 min,处理温度为25℃常温的条件下能够对废水中的COD及BOD₅得到较为理想处理效果。

采用曝气和投加添加剂的联合处理方法主要目的为提升消化液pH和增加溶液中Ca²⁺与Mg²⁺含量来强化对氮磷的回收效果,同时也去除了部分COD,可以为后续处理有机污染物减轻负担。

2.3 曝气过程中消化液PO₄³⁻-P和NH₃-N回收率的变化

从图4和图5可看出,添加造纸白泥和粉煤灰可明显提高PO₄³⁻-P和NH₃-N回收率,而且都是随着添加量的增加而提高,在反应开始的前5 h内,PO₄³⁻-P和NH₃-N回收率较大,随后慢慢减缓,最后基本上趋于稳定。当造纸白泥添加量为4 g/(L·h),曝气12 h后,PO₄³⁻-P和NH₃-N回收率分别达到64%和45%;而当粉煤灰添加量为4 g/(L·h),曝气12 h后,PO₄³⁻-P和NH₃-N回收率可分别达到46%和41%;而仅用曝气方式处理,12 h后,PO₄³⁻-P和NH₃-N回收率分别仅为20%和18%。由于污泥厌氧消化液中含有丰富的PO₄³⁻和NH₄⁺,但Ca²⁺和Mg²⁺含量较低,本实验使用的污泥消化液中Mg²⁺:PO₄³⁻仅为0.25:1,严重抑制了消化液中氮磷的回收,要想提高氮磷回收率,需要补充一定量的Mg²⁺,一般要求Mg²⁺:PO₄³⁻在1.3:1左右^[13]。已有研究表明当pH从8升至10时,HPO₄²⁻、PO₄³⁻在磷酸根的四中形态分布比例中增加至99%以上^[18],更有利于鸟粪石的形成,使得氮磷回收率大幅度提高。

从图4和图5可知,添加造纸白泥和粉煤灰可以显著提高厌氧消化液中氮磷回收率,其原因主要包括两方面:一方面是造纸白泥和粉煤灰均为碱性物质,把它们引入到厌氧消化液中有助于调节pH、缩短反应所需的HRT;另一方面是造纸白泥和粉煤灰引入的Ca²⁺、Mg²⁺等离子可保证消化液中的

PO₄³⁻-P和NH₃-N最大程度地形成鸟粪石和磷酸钙沉淀而被回收。此外,有部分NH₃-N会因为pH的上升和曝气的搅动作用而转化为NH₃溢出。从图还可以看出,造纸白泥对污泥消化液中氮磷的回收效果比粉煤灰要好,原因主要包括两方面,一为白泥的碱性比粉煤灰强,对pH的调节效果更好;二为白泥中Ca²⁺和Mg²⁺含量大于粉煤灰,从而提高了氮磷回收率。也有研究表明,粉煤灰的吸附性能可以明显提高其对氮磷的回收效果,如姜应和等^[19]曾研究粉煤灰碎砖颗粒的除磷效果,郑越等^[20]也曾研究粉煤灰对工业废水中氨氮的吸附性能,吸附效果都十分明显。但本实验中粉煤灰对氮磷的吸附效果并不理想,主要原因可能为本实验采用连续进样方式,流量较大会影响粉煤灰的吸附效果,同时,实验进行过程中一直在曝气搅动而缺乏静置过程,也会使吸附在粉煤灰上的氮磷容易发生解吸,重新回到消化液中。

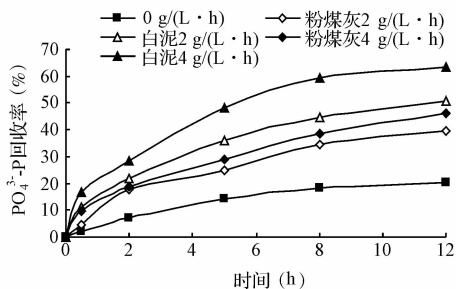


图4 PO₄³⁻-P回收率随曝气时间的变化

Fig. 4 Variations of PO₄³⁻-P recovery rate with aeration time

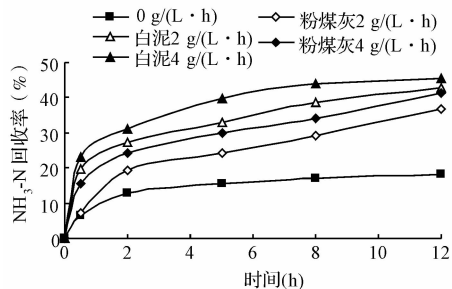


图5 NH₃-N回收率随曝气时间的变化

Fig. 5 Variations of NH₃-N recovery rate with aeration time

2.4 不同HRT对消化液中pH的影响

图6显示的是当造纸白泥添加量为4 g/(L·h), HRT分别为5.4、9和27 h时,消化液中pH的

变化曲线。从图可以明显看出,HRT 越大则 pH 提升速度越快,幅度越大,经过 12 h,HRT 为 5.4、9 和 27 h 的 pH 分别达到 9.78、9.89 和 10.19。李亮等^[21]曾研究曝气在沉淀法回收沼气发酵液氮磷中的作用,得到的结果与本实验基本一致。增大 HRT 既可以使消化液中的 CO_2 被吹脱得更充分,又可以使造纸白泥的作用效果更充分,从而使 pH 上升更快,上升幅度更大。

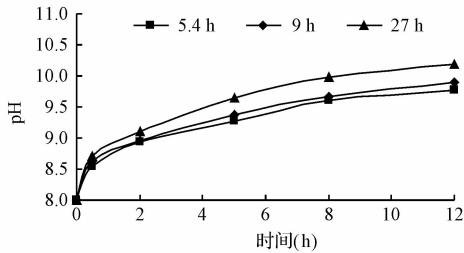


图 6 不同 HRT 条件下 pH 的变化

Fig. 6 Variations of pH at different HRTs

2.5 不同 HRT 对消化液中 PO_4^{3-} -P 和 NH_3 -N 回收率的影响

图 7 和图 8 显示的是当造纸白泥添加量为 $4 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{h})$, HRTs 分别为 5.4、9 和 27 h 时,消化液中 PO_4^{3-} -P 和 NH_3 -N 回收率的变化曲线。从图可以看出,各曲线的变化趋势基本一致, PO_4^{3-} -P 和 NH_3 -N 回收率都是随着 HRT 的增大而提高。经过 12 h 后 HRTs 分别为 5.4、9 和 27 h 的 PO_4^{3-} -P 回收率分别

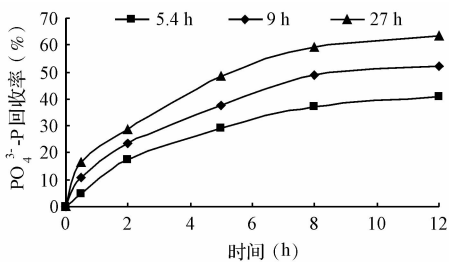


图 7 不同 HRTs 条件下 PO_4^{3-} -P 回收率的变化

Fig. 7 Variations of PO_4^{3-} -P recovery rate at different HRTs

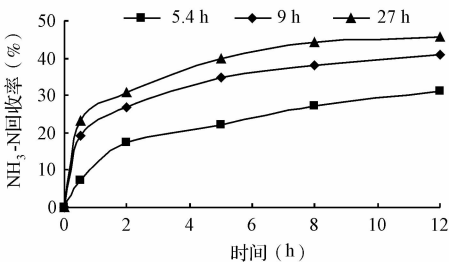


图 8 不同 HRTs 条件下 NH_3 -N 回收率的变化

Fig. 8 Variations of NH_3 -N recovery rate at different HRTs

达到 41%、52% 和 64%, 而 NH_3 -N 回收率分别为 31%、41% 和 46%。可见,HRT 越大,氮磷的回收效果就越好,但运行成本会越大。因此,在工程应用上要充分考虑 HRT,以最小的运行成本,实现最大的氮磷回收效果。

3 结论

(1) 造纸白泥和粉煤灰都为碱性废弃物,可以显著地提高消化液 pH,而 pH 对鸟粪石的形成起着至关重要的作用。当造纸白泥添加量为 $4 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 时,pH 在 2 h 后就可上升到 9.1,12 h 后达到 10.19;当粉煤灰添加量为 $4 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 时,12 h 后 pH 达到 9.63,而仅用曝气方式处理,12 h 后,pH 仅为 8.52。

(2) 把造纸白泥和粉煤灰引入到污泥厌氧消化液氮磷回收当中,对氮磷的回收有明显的效果。当造纸白泥添加量为 $4 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{h})$,曝气 12 h 后, PO_4^{3-} -P 和 NH_3 -N 回收率分别达到 64% 和 45%;当粉煤灰添加量为 $4 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{h})$,曝气 12 h 后, PO_4^{3-} -P 和 NH_3 -N 回收率分别达到 46% 和 41%;而仅用曝气方式处理,12 h 后, PO_4^{3-} -P 和 NH_3 -N 回收率分别只有 20% 和 18%。可见,添加白泥和粉煤灰来提高污泥消化液中氮磷回收率有一定的效果,并且,造纸白泥和粉煤灰都是工业废弃物,将它们应用到污水处理当中不但可以做到“以废治废”,而且减少处理成本,生成的沉淀物还是一种较好的缓释肥料。

(3) HRT 越大,pH 提升幅度就越大,氮磷的回收效果就越好。经过 12 h,HRTs 为 5.4、9 和 27 h 的 pH 分别达到 9.78、9.89 和 10.19,此时 PO_4^{3-} -P 回收率分别为 41%、52% 和 64%, NH_3 -N 回收率分别为 31%、41% 和 46%。

参考文献

- [1] 李博,杨持,林鹏,等. 生态学. 北京:高等教育出版社,2000. 251-252
- [2] 刘颐华. 我国与世界磷资源及开发利用现状. 磷肥与复肥,2005,22(5):12-15
Liu Y. H. Phosphorus resources at home & abroad, and the current situation of their exploitation & utilization. Phosphate & Compound Fertilizer,2005,22(5):12-15(in Chinese)
- [3] Doyle J. D.,Parsons S. A. Struvite formation, control and recovery. Water Res.,2002,36(16):3925-3940
- [4] 高永青,彭永臻,张晶宇,等. pH 和元素摩尔比对污泥酸化液沉淀法脱氮除磷的影响. 环境工程学报,2011,5

- (2):241-245
Gao Y. Q. , Peng Y. Z. , Zhang J. Y. , et al. Effect of pH and elementmol ratio on nitrogen and phosphorus removal in sludge fermentation liquors by precipitation method. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2011**, 5(2):241-245 (in Chinese)
- [5] 周荣敏,雷延峰,闫越,等. MAP法沉淀回收装置的运行条件优化研究. *环境工程学报*, **2010**, 4(5):1047-1051
Zhou R. M. , Lei Y. F. , Yan Y. , et al. Operating conditions optimization of a precipitation recovery device by magnesium ammonium phosphate process. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2010**, 4(5):1047-1051 (in Chinese)
- [6] 林亲铁,刘国光,尹光彩,等. 磷酸铵镁法回收污泥浓缩液中氮磷的影响因素研究. *环境工程学报*, **2010**, 4(9):2029-2032
Lin Q. T. , Liu G. G. , Yin G. C. , et al. Nitrogen and phosphorus recovery via magnesium ammonium phosphate sedimentation from sludge concentrated liquor. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2010**, 4(9):2029-2032 (in Chinese)
- [7] Shu L. , Schneider P. , Jegatheesan V. , et al. An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant. *Bioresource Technology*, **2006**, 97(17):2211-2216
- [8] 段金明. 曝气辅助海水化学沉淀法去除污泥脱水液中的氮、磷. *中国给水排水*, **2009**, 25(23):25-28
Duan J. M. Removal of nitrogen and phosphorus from sludge dehydration liquor by chemical precipitation process with seawater addition and aeration. *China Water & Waste Water*, **2009**, 25(23):25-28 (in Chinese)
- [9] Chimenos J. M. , Fernández A. I. , Villalba G. , et al. Removal of ammonium and phosphates from wastewater resulting from the process of cochineal extraction using MgO-containing by-product. *Water Res.*, **2003**, 37(7):1601-1607
- [10] Lee S. I. , Weon S. Y. , Lee C. W. , et al. Removal of nitrogen and phosphate from wastewater by addition of bitern. *Chemosphere*, **2003**, 51(4):265-271
- [11] Quintana M. , Colmenarejo M. F. , Barrera J. , et al. Removal of phosphorus through struvite precipitation using a by-product of magnesium oxide production (BMP): Effect of the mode of BMP preparation. *Chemical Engineering Journal*, **2008**, 136(2-3):204-209
- [12] 董滨,段妮娜,何群彪,等. 鸟粪石结晶法处理猪场污水的研究现状及发展趋势. *水处理技术*, **2009**, 35(8):5-8
Dong B. , Duan N. N. , He Q. B. , et al. Status and development of struvite crystallization for swing wastewater treatment. *Technology of Water Treatment*, **2009**, 35(8):5-8 (in Chinese)
- [13] Jaffer Y. , Clark T. A. , Pearce P. , et al. Potential phosphorus recovery by struvite formation. *Water Res.*, **2002**, 36(7):1834-1842
- [14] Stratful I. , Scrimshaw M. D. , Lester J. N. Conditions influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate. *Water Res.*, **2001**, 35(17):4191-4199
- [15] 陈瑶,李小明,曾光明,等. 以磷酸钙盐的形式从污水处理厂回收磷的研究. *环境科学与管理*, **2006**, 31(4):110-112
Chen Y. , Li X. M. , Zeng G. M. , et al. Study on phosphorus recovery as calcium phosphate from wastewater treatment plant. *Environmental Science and Management*, **2006**, 31(4):110-112 (in Chinese)
- [16] 佟娟,陈银广. 剩余污泥水解酸化液磷去除的影响因素研究. *环境工程学报*, **2007**, 1(4):1-5
Tong J. , Chen Y. G. Factors influencing phosphorus removal from centrifugate of acidified excess activated sludge. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2007**, 1(4):1-5 (in Chinese)
- [17] 吴少林,李海珠,马明. 新型复合混凝吸附药剂对无铅皮蛋废水的处理. *环境工程学报*, **2011**, 5(2):369-372
Wu S. L. , Li H. Z. , Ma M. , et al. Treatment of preserved egg wastewater by a novel composite coagulant. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2011**, 5(2):369-372 (in Chinese)
- [18] Bhuiyan M. Iqbal H. , Mavinic D. S. , Beckie R. D. Nucleation and growth kinetics of struvite in a fluidized bed reactor. *J. Cryst Growth*, **2008**, 310(6):1187-1194
- [19] 姜应和,柳君侠. 粉煤灰砖颗粒除磷实验研究. *环境工程学报*, **2011**, 5(7):1532-1537
Jiang Y. H. , Liu J. X. , Experimental study on phosphorus removal by fly ash brickbat particle. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2011**, 5(7):1532-1537 (in Chinese)
- [20] 郑越,刘方,吴永贵. 粉煤灰对工业废水中氨氮的吸附性能研究. *环境科学与技术*, **2011**, 34(1):4-7
Zheng Y. , Liu F. , Wu Y. G. Ammonia nitrogen adsorption on coal fly ash. *Environmental Science & Technology*, **2011**, 34(1):4-7 (in Chinese)
- [21] 李亮,王德汉,邹璇,等. 曝气在沉淀法回收沼气发酵液氮磷中的作用. *农业工程学报*, **2010**, 26(1):313-318
Li L. , Wang D. H. , Zou X. , et al. Effect of aeration on crystallization technology for nitrogen and phosphorus recovery from biogas fermentative liquid. *Transactions of the CSAE*, **2010**, 26(1):313-318 (in Chinese)