

鸟粪石-絮凝强化工艺处理鸡粪发酵废水

张亚雷¹, 杨鸿瑞², 周雪飞³, 朱洪光²

(1. 同济大学 污染控制与资源化国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 现代农业科学与工程研究院
生物质能源研究中心, 上海 200092; 3. 同济大学 环境学院长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以鸡粪厌氧消化液为对象, 研究鸟粪石法回收氮磷的工艺条件。结果表明, 反应时间 30 min, 搅拌转速 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 加药前调节 pH 值至 9.0, 镁氮磷物质的量比 1:1:0.8 条件下, 氨氮去除率为 71%, 总磷去除率为 59%, 化学需氧量(COD)去除率为 32%。反应后的上清液 pH 值在 6~7 之间, 适宜投加絮凝剂进一步絮凝强化沉淀。聚合氯化铝(PAC)投加量为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 氨氮、总磷、COD 的总去除率为 74.6%、66.8%、68.9%。有效提高了废水的可生化性。

关键词: 鸡粪发酵废水; 鸟粪石; 絮凝强化; 氮磷回收

中图分类号: X713

文献标识码: A

Treatment of Chicken Manure Fermentation Wastewater by Struvite-flocculation Enhancement Technology

ZHANG Yalei¹, YANG Hongrui², ZHOU Xuefei³, ZHU Hongguang²

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Modern Agricultural Science and Engineering Research Institute, Bio-energy Research Center, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Yangtze Water Environment of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper focuses on the recovery of ammonium and phosphate through struvite from anaerobic digestion wastewater of chicken waste. The optimum conditions were discussed too. The results show that during a reaction time of 30 min and a mixed speed of $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, the ammonium, phosphate and chemical oxygen demand (COD) are removed by 71%, 59% and 32%, respectively at initial pH 9.0 and a molar ratio of $\text{Mg} : \text{N} : \text{P} = 1 : 1 : 0.8$. In addition, the pH of

the supernatant after the reaction is between 6 and 7, so the further flocculation and sedimentation by dosing $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PAC can strengthen the pollutant removal effect. The final removal rate of ammonium, phosphate and COD of the supernatant are 74.6%, 66.8%, 68.9% respectively after the flocculation, improving the biodegradability of the effluent and recycling nitrogen and phosphorus resources effectively.

Key words: chicken manure fermentation wastewater; struvite; flocculation enhancement; nitrogen and phosphorus recovery

厌氧发酵处理工艺长期以来在畜禽粪便处理中得到广泛应用。厌氧发酵工艺能够在一定程度上消化有机物质和部分氮磷营养物, 但是其出水有机质和 N、P 营养物质的高污染问题仍然非常严重。更突出的问题是, 发酵液中 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的比例非常不协调, 后续直接生化处理效果并不理想。Li 和 Zhao 等发现高氨氮浓度会在很大程度上降低传统活性污泥法的处理能力^[1]。刘战广研究发现在 SS 和 COD 浓度很高时, 由于溶解性化学需氧量与氨氮浓度的比值 $\text{SCOD}/\text{NH}_3\text{-N}$ 较低, 发酵液进一步厌氧处理也受到限制^[2]。为了使发酵液能够进行生物强化处理, 物化法脱氮除磷和可溶性有机物补加是两种备选解决方案。从环境经济综合分析, 物化方法进行氮磷脱除, 不仅可以有效解决发酵液后续达标处理的 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 比例不均衡问题, 而且可以实现氮磷资源的回收。

综合分析物化法脱氮除磷各种途径, 鸟粪石-絮凝强化工艺是一条比较有潜力的途径。鸟粪石法脱氮除磷的基本原理是利用溶液中 Mg^{2+} , NH_4^+ , PO_4^{3-}

收稿日期: 2010-11-15

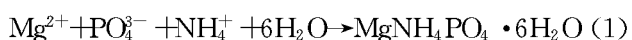
基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2008BAD4B05; 2008BAD4B04)

第一作者: 张亚雷(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为水处理理论与技术。E-mail: zhangyalei2003@163.com

通讯作者: 周雪飞(1971—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为污水处理理论与技术、城市污水厂数学模拟与智能控制等。

E-mail: zhouxuefei@tongji.edu.cn

离子的质量浓度积大于溶度积常数 K_{sp} 时,会自发生成鸟粪石并形成沉淀,实现 NH_4^+ 以及 PO_4^{3-} 同时去除^[3]. 反应式为



鸟粪石是一种优质的氮磷缓释肥^[4],其含有 N 为 5.71%,含 P (以 P_2O_5 计)为 28.92%,含 Mg (以 MgO 计)为 16.43%,且对重金属的表面吸附作用小,安全可靠^[5],很好实现了 N、P 营养物质的回收与再利用. 然而,由于很多细小的鸟粪石颗粒随出水流出,造成出水 SS 含量增加,并且鸟粪石工艺对有机质的去除效果不显著. 辅以絮凝强化工艺,通过投加絮凝剂絮凝沉淀,降低出水 SS 和有机颗粒量,强化有机质去除效果.

闽敏等人^[6]利用鸟粪石法处理猪粪水,认为 $n(\text{Mg}^{2+}) : n(\text{NH}_4^+) : n(\text{PO}_4^{3-})$ 为 1.2 : 1 : 1.02 时,氮磷去除率最好,李芙蓉等^[7]研究表明, $n(\text{Mg}^{2+}) : n(\text{NH}_4^+) : n(\text{PO}_4^{3-})$ 为 1 : 1 : 0.8 时效果最好. Suzuki 等人^[8]研究了猪粪废水的氮磷脱除效果及工艺条件. S Uludag-Demirer 等^[9]研究了鸟粪石法对奶牛粪肥厌氧发酵液的强化除氨工艺效果. 此外,还有许多针对鸟粪石法对厌氧消化污泥及上清液氮磷回收的研究^[10-13]. 但是目前关于鸡粪沼气发酵液的鸟粪石-絮凝强化工艺的研究仍未见报道. 实际上,鸡粪和其他畜禽粪便性质差别很大,最典型的是鸡粪发酵液不仅有机质和氨氮含量高,而且 SS、Ca 和碱度都很高. 本文针对鸡粪沼气发酵液的特性,以上海浦东阿强养鸡场厌氧发酵工程为依托,研究鸟粪石-絮凝强化法用于鸡粪发酵液中氮磷回收的可行性及工艺条件研究.

1 实验材料和方法

1.1 实验原水

本实验水样取自上海市南汇区沼气工程鸡场发酵池沼液. pH 值在 8 左右, COD 质量浓度 6 000~10 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮质量浓度在 3 000~4 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷质量浓度在 400~500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. SS 质量浓度含量高达 20 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,并有谷壳等难降解的大颗粒,影响沼液流态,不利于鸟粪石反应过程的搅拌. 为此,利用 60 目筛子进行沼液筛分预处理,过筛后沼液流态能够满足反应搅拌要求.

1.2 实验方法

以 500 ml 烧杯为反应槽,以可调速实验室六联搅拌机(JJ—4A,常州国华仪器有限公司)作为反应

搅拌器. 室温下,取 250 ml 水样置于 500 ml 烧杯中,以 10% NaOH 溶液调节 pH 值,投加 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 为沉淀剂. 设计了 5 组单因素实验探索鸟粪石沉淀法的最佳因素条件. 实验前根据原水中的氮磷含量计算所需的投药量,先调节 pH 值,记录用碱量,依次加入药剂,置于六联搅拌机搅拌,开始计时反应,然后静止沉淀 30 min,并记录沉淀达到稳定界面的时间. 沉淀结束,取上清液测定 COD、氨氮、总磷浓度和 pH 值.

对于进一步研究絮凝对氮磷的强化去除效果的研究,取鸟粪石沉淀反应上清液 50 ml,进行投加 PAC 絮凝剂进行絮凝实验,并进一步测试絮凝后上清液的 COD、氨氮、总磷浓度和 pH 值.

1.3 指标测试及分析方法

实验中 COD、氨氮、总磷浓度和 pH 值的测定方法均采用国家环保总局标准测定方法. 即, COD 采用快速密闭分光光度法,氨氮采用纳式试剂比色法,总磷采用钼酸铵比色法, pH 用玻璃电极法.

2 实验结果与讨论

2.1 反应时间对鸟粪石反应影响

原水过筛, pH 值定在 9.5, 镁氮磷的物质的量比控制在 1 : 1 : 0.8, 搅拌强度为 100 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 进行实验. 实验结果如图 1~2 所示.

图 1 显示,氨氮、总磷和 COD 去除率受反应时间影响都非常小,反应时间不是影响鸟粪石的重要因素. 这与 Stratful 等人^[14]的研究结果相似. 反应时间 30 min 时,氨氮、总磷和 COD 去除率都能够达到最好状态,其中氨氮去除率达到 75.5%,总磷去除率达到 67%, COD 去除率达到 25%. 随着反应时间延长,反应效果有恶化趋势. 75 min 时,氨氮去除率降低到 73%, COD 去除率降低到 23%. COD 的去除主要是鸟粪石沉淀过程中网捕和拦截污水中有机颗粒的结果, COD 的去除率降低,沉淀的沉淀性能降低.

图 2 显示结晶晶体沉降时间随反应时间的变化. 停止搅拌,沉淀物达到稳定界面的时间为沉降时间. 晶体沉淀性很好, 13~18 min 内均能够很好沉降,但是在一定范围内随反应时间延长,对晶体沉降反倒不利,反应时间为 45 min 和 75 min 时,沉淀时间分别为 18 min 和 17 min,都大于反应时间 30 min 时的沉淀时间 13 min. 反应时间不宜过长,否则破坏了鸟粪石的沉淀体系,降低沉淀性能,这与蒋京东等的研究结果类似^[15].

因此,综合考虑鸟粪石反应时间确定在 30 min 比较理想。

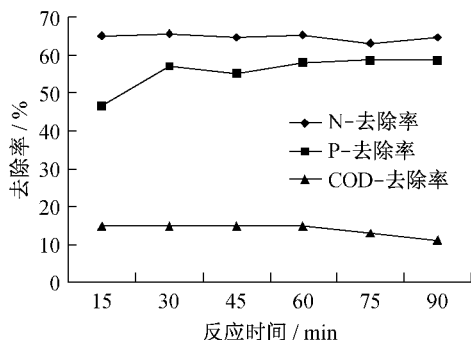


图 1 反应时间对氨氮、总磷及 COD 去除的影响

Fig. 1 The influence of reaction time on ammonium, total phosphate and COD removal

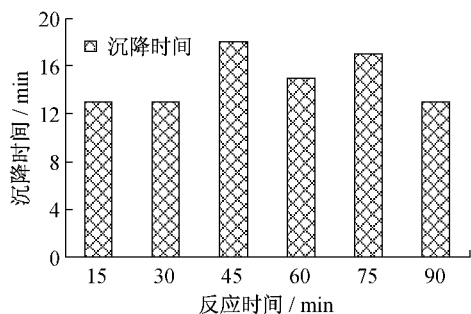


图 2 反应时间对结晶物沉降性影响

Fig. 2 The influence of reaction time on crystal's setting performance

2.2 搅拌强度对鸟粪石反应影响

搅拌强度对 COD 去除的影响,以及对结晶晶体沉淀特性的影响与不同反应时间下的反应结果相近。鸟粪石沉淀过程中,混合能影响它的结晶作用^[16]。混合能即溶液中参加反应的离子的混合速度和混合程度,通过搅拌强度和混合时间来控制^[16]。提供的混合能越大,缩短了鸟粪石的诱导时间,加速了晶核形成,促进了晶体生长。但是混合能不能过大,混合能越大,一定的混合时间下,需要的搅拌强度越大,而过大的搅拌强度容易造成氨的挥发,并且打碎晶体,破坏沉淀体系,造成氮磷去除率下降,能量浪费。

实验以原水过筛, pH 值定在 9.5, 镁氮磷的物质的量比控制在 1:1:0.8, 反应时间 30 min, 沉淀 30 min。实验结果如图 3 所示。不同搅拌强度对 COD 去除的影响与不同反应时间下的反应结果相近。

图 3 显示搅拌强度对氨氮去除率的影响不大, 在 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \sim 300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 范围内, 氨氮的去除率都在 77% 左右。其中搅拌强度为 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$

时, 氨氮的去除率最大达到 77.8%。搅拌强度对磷的去除影响非常明显。去除率随搅拌强度的增大持续增加, 余磷量由 $326.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $121 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 磷去除率从 30% 上升到 73% 左右。但是, 试验中搅拌强度超过 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 反应会有明显氨味, 这说明存在氨挥发问题。氨挥发会影响鸟粪石沉淀纯度, 同时会引发新的大气污染。转速 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 余磷质量浓度 $254 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 可通过加入药剂及 pH 值的调节进一步降低。

因此, 综合考虑认为搅拌强度设置为 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 最佳。

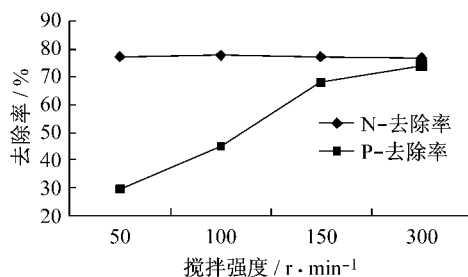


图 3 搅拌强度对氨氮及总磷去除的影响

Fig. 3 The influence of mixing speed on ammonium and total phosphate removal

2.3 pH 值调节对鸟粪石反应影响

实验以鸡粪发酵池原水过筛, 镁氮磷的物质的量比控制在 1:1:0.8, 搅拌强度 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 反应时间 30 min, 沉淀 30 min。实验结果如图 4~5 所示。不同 pH 调节对 COD 去除的影响与不同反应时间下的反应结果相近。pH 值影响主要体现在影响组成鸟粪石的各种离子在溶液中的形态和活度, 而只有当鸟粪石沉淀所需的各种离子的活度积超过相应的溶度积, 沉淀才会发生^[3]。

图 4 显示, 氨氮去除率随 pH 值的升高变化幅度不大, 起伏较大, 并在 9 处出现峰值达到 79.8%。但是 pH 值由 9.5 升至 10 时, 氨氮的去除率略有下降。pH 值进一步由 10 升至 10.5 时, 氨氮的去除率大幅增加到 82.8%, 并伴有浓重的氨味, 可见氨去除是通过挥发实现。磷的去除率随 pH 值的升高变化较大。pH 值为 9 时, 磷的去除率达到 59.1%。pH 值由 9.5 至 10 时, 磷的去除率由 60% 升至 70%。pH 值由 10 升至 10.5 时, 磷的去除率变化不明显。

图 5 显示, 反应前 pH 值在 9.5 以内, 反应后的 pH 值在 6~7 之间; 若 pH 值高于 9.5 时, 反应后的 pH 值升高, 最高接近 9, 不利于后续生物处理。

综合考虑, pH 值调节为 9.0 应当比较适合。

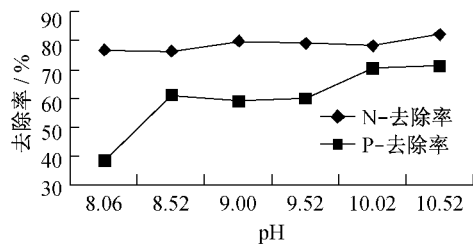


图4 pH值对氨氮及总磷去除的影响

Fig.4 The influence of pH on ammonium and total phosphate removal

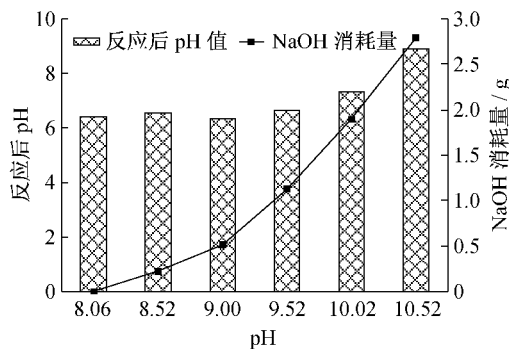


图5 初始 pH 值对反应后 pH 值及用碱量的影响

Fig.5 The influence of initial pH on pH after the reaction and alkali consumption

2.4 镁投加量对鸟粪石反应影响

实验室以鸡粪发酵池原水过筛, pH 定为 9.0, 氮磷物质的量比 1 : 0.8, 搅拌强度 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 反应时间 30 min, 沉淀 30 min. 实验结果如图 6 所示. 不同镁投加量对 COD 去除的影响与不同反应时间下的反应结果相近. 镁投加量直接影响鸟粪石平衡反应的进程, 镁投加量增加, 反应向右进行生成鸟粪石, 但是镁投加量过大, 会使出水硬度增加, 药剂成本增加.

图 6 显示镁投加量对氨氮的去除率影响不大, 物质的量比在 0.5 : 1 ~ 1.5 : 1 范围内, 氨氮去除率均在 60% ~ 74% 左右. 在镁氮物质的量比为 1 : 1 时, 氨氮去除率达到 73.3%. 镁投加量继续增加, 氨氮的去除率增加不明显. 随着镁氮物质的量比的增加, 总磷去除率显著提高, 当镁氮物质的量比在 1 : 1 时, 总磷的去除率为 59.2%, 余磷量为 $189.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 镁氮物质的量比增加, 磷的去除率继续增加, 并且可观察到沉淀中含有相当数量的白色细小颗粒.

氯化镁是一种价格比较昂贵的镁源, 结合药剂成本考虑, 镁氮物质的量比在 1 : 1 较合适.

2.5 磷投加量对鸟粪石反应影响

实验过程中, 以鸡粪发酵池原水过筛为对象, pH 值为 9.0, 控制镁氮物质的量比为 1 : 1, 搅拌强

度 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 反应 30 min, 沉淀 30 min. 实验结果如图 7 所示. 磷的投加量增加可以提高氮的去除率, 但是磷的投加量过多, 会造成出水磷浓度增加, 同样造成严重的污染.

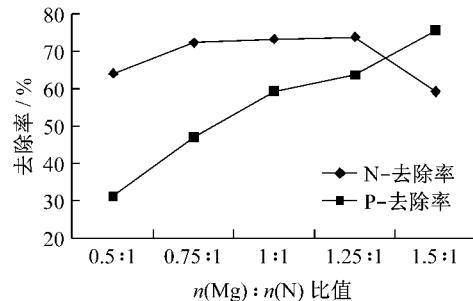


图6 镁氮物质的量比对氨氮及总磷去除的影响

Fig.6 The influence of Mg and N ratio on ammonium and total phosphate removal

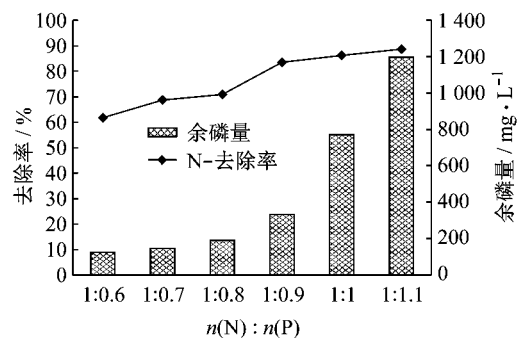


图7 氮磷物质的量比对氨氮及总磷去除的影响

Fig.7 The influence of N and P ratio on ammonium and total phosphate removal

图 7 显示磷投加量对氨氮的去除率影响显著, 氮磷物质的量比为 1 : 0.6 ~ 1 : 1.1 之间时, 氨氮去除率由 61.7% 增加到 88.6%. 氮磷物质的量比为 1 : 0.8 时, 氨氮的去除率可以达到 71%. 磷投加量对出水总磷浓度的影响. 随着磷投加量的增加, 出水总磷浓度大幅度增加. 当氮磷物质的量比由 1 : 0.8 增加至 1 : 0.9 时, 余磷量由 $189.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 大幅增至 $330.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 接近进水总磷浓度. 磷的去除较氨氮的去除难度更大, 且容易在后续厌氧工艺富集, 给处理带来更大的麻烦, 应尽量减少磷的投加.

不同磷投加量对 COD 去除的影响与不同反应时间下的反应结果也相近.

综合考虑, 氮磷物质的量比为 1 : 0.8 适合.

2.6 絮凝沉淀的强化脱氮除磷效果

鸟粪石工艺在实际应用过程中, 存在细小颗粒随出水流失的现象, 造成出水氮磷浓度增加. 本文探究了在鸟粪石工艺之前投加 PAC 絮凝剂絮凝, 效果

非常不明显.但是,对鸟粪石工艺出水上清液进行 PAC 絮凝沉淀,沉淀效果非常好.图 8 为不同 PAC 投加量条件下,鸟粪石工艺出水絮凝后,氨氮,总磷, COD 的总去除率. pH 值 9.0, 镁氮磷物质的量比 1 : 1 : 0.8, 反应时间 30 min, 搅拌强度 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下进行鸟粪石反应, 取出水投加 PAC 絮凝.

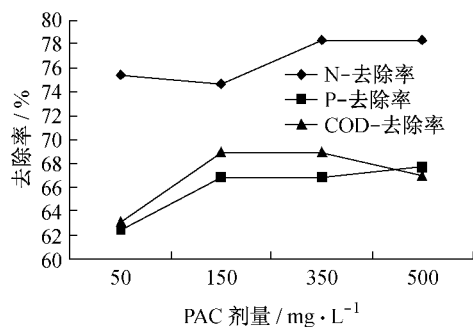


图 8 絮凝作用对氨氮、总磷及 COD 去除的影响

Fig.8 The influence of flocculation on ammonium, total phosphate and COD removal

图 8 显示 PAC 投加量在质量浓度 $50 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 氨氮的去除率在 $74\% \sim 79\%$ 之间, 变化幅度不大. PAC 投加量在质量浓度 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 氨氮去除率为 74.6% . PAC 投加量增加, 氨氮去除率维持在 78.3% 基本不变. 相对鸟粪石工艺后, 氨氮 71% 的去除率, 絮凝强化工艺后, 氨氮去除率提高了 $3\% \sim 5\%$, 提高幅度不大. 絮凝强化工艺将细小的鸟粪石颗粒沉淀, 一定程度地提高了氨氮的去除率. PAC 投加量对总磷的影响. PAC 投加量在质量浓度 $150 \sim 350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 磷去除率基本维持在 66.8% 不变, PAC 投加量增至质量浓度 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 磷去除率略微增加至 67.7% 左右. 相对鸟粪石工艺后, 总磷 59% 的去除率, 絮凝强化工艺将总磷去除率提高了 $3.5\% \sim 8.7\%$, 较大地提高了总磷的去除率.

PAC 投加量的增加, 对 COD 去除率的影响比较明显. PAC 投加量由质量浓度 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, COD 去除率由 63.1% 增加至 68.9% . 继续增加 PAC 投加量, COD 的去除率基本保持不变. 相对鸟粪石工艺后, COD 32% 的去除率, 絮凝强化工艺将 COD 的去除率提高了 $31\% \sim 37\%$, 极大地提高了 COD 的去除效果. 絮凝强化不仅进一步将细小的鸟粪石颗粒沉淀, 解决了随出水流失的问题, 同时解决了高悬浮物和高 COD 的问题.

絮凝强化效果的改变, 可能是鸟粪石沉淀过程中网捕了一些胶体物质和 SS 形成共沉淀, 破坏了鸡粪发酵沼液的胶体体系, 在一定程度上对沼液进行了调理.

3 结论

(1) 利用鸟粪石法去除鸡场发酵废水中的氮磷污染物, 在 30 min 反应时间, $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 搅拌强度, 预先调节 pH 值为 9.0 条件下, 按照镁氮磷物质的量比 1 : 1 : 0.8 投加 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 能够达到较好的反应结果. 这一条件下, 氨氮去除率为 71% , 总磷去除率为 59% , COD 去除率为 32% .

(2) 鸟粪石反应后, 对其出水进行絮凝强化, 能够达到非常理想的氮磷强化去除效果, 更显著的效益还体现在对悬浮物和有机质的去除上. 在 PAC 投加量 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 对鸟粪石工艺出水进行絮凝强化, 氨氮、总磷、COD 的总去除率分别为 74.6% 、 66.8% 、 68.9% .

以上两点进一步说明, 鸟粪石法结合絮凝强化在回收沼液中的氮磷资源的同时, 能够很好地优化沼液后续生化处理条件.

参考文献:

- [1] LI X Z, ZHAO Q L. Inhibition of microbial activity of activated sludge by ammonia in leachate[J]. Environment International, 1999, 25(8):961.
- [2] 刘战广. 畜禽废水 CSTR 厌氧消化液的 IC 反应器强化处理及 ADMI 模拟[D]. 上海: 同济大学环境科学与工程学院, 2010. LIU Zhanguang. IC reactor enhanced treatment and ADMI simulation for CSTR anaerobic digested effluent from poultry wastewater [D]. Shanghai: Tongji University. College of Environmental Science and Engineering, 2010.
- [3] Doyle J D, Parsons S A. Struvite formation, control and recovery[J]. Water Research, 2002, 36(16):3925.
- [4] 陈轶, 员建, 苑宏英. 鸟粪石沉淀法回收污泥处理构筑物中的氮磷的研究进展[J]. 四川环境, 2008, 27(5):1001. CHEN Yi, YUAN Jian, YUAN Hongying. Research advance in nitrogen and phosphorus recovery with struvite-precipitation method in sludge treatment structures [J]. Sichuan Environment, 2008, 27(5): 1001.
- [5] 曾之平, 李玉, 李喜红. 新型复合肥料—磷酸氢镁生成条件的研究[J]. 河南化工, 1995, 12:8. ZENG Zhiping, LI Yu, LI Xihong. New compound fertilizer study on magnesium ammonium phosphate generated conditions [J]. Henan Chemical Industry of Chinese, 1995, 12:8.
- [6] 闵敏, 黄种买. 化学沉淀法去除养猪场废水中氨氮的试验研究[J]. 化学与生物工程, 2005(5):27. MIN Min, HUANG Zhongmai. Ammonia nitrogen removing in piggery wastewater by chemical precipitation[J]. Chemistry & Bioengineering of Chinese, 2005(5):27.
- [7] 李芙蓉, 徐君. MAP 法处理高浓度氨氮废水的试验研究[J]. 工

- 业安全与环保,2006,32(2):32.
- LI Furong, XU Jun. Experimental research on the treatment for high concentration of ammonia nitrogen wastewater by MAP [J]. Industrial Safety and Environmental Protection of Chinese,2006,32(2):32.
- [8] K Suzuki, Yasuo Tanaka, Takashi Osada, et al. Removal of phosphate, magnesium and calcium from swine wastewater through crystallization enhanced by aeration [J]. Water Research, 2002,36:2991.
- [9] S Uludag-Demirer, G N Demirer, C Frear, et al. Anaerobic digestion of dairy manure with enhanced ammonia removal[J]. Journal of Environmental Management, 2008,86:193.
- [10] N Marti, A Bouzas, A Seco, et al. Struvite precipitation assessment in anaerobic digestion process [J]. Chemical Engineering Journal,2008, 141:67.
- [11] Kenan Güney, Alexander Weidener, Jörg Krampe. Phosphorous recovery from digested swage sludge as MAP by the help of metal ion separation[J]. Water Research,2008, 42: 4692.
- [12] Mustafa Türker, Iperk Celen. Removal of ammonia as struvite from anaerobic digester effluents and recycling of magnesium and phosphate[J]. Bioresource Technology, 2007, 98:1529.
- [13] N O Nelson, R L Mikkelsen, D L Hesterberg. Struvite precipitation in anaerobic swine lagoon liquid: effect of pH and Mg:P ratio and determination of rate constant[J]. Bioresource Technology, 2003,89:229.
- [14] Stratful I, Scrimshaw M D, Lester J N. Conditions influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate [J]. Water Res, 2001,35(17):4191.
- [15] 蒋京东,徐远,马三剑,等. 鸟粪石结晶沉淀法处理氨氮废水 [J]. 水处理技术,2008,34:1000.
- JANG Jingdong, XU Yuan, MA Sanjian, et al. Experimental study of treatment of ammonia-nitrogen wastewater by struvite precipitation [J]. Technology of water treatment of Chinese, 2008,34:1000.
- [16] Kim D, Kim J, Ryu H D, et al. Effect of mixing on spontaneous struvite precipitation from semiconductor wastewater[J]. Bioresource Technology, 2009, 100:74.