

# pH 和元素摩尔比对污泥酸化液沉淀法 脱氮除磷的影响

高永青 彭永臻\* 张晶宇 王淑莹 巩有奎

(北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

**摘 要** 针对剩余污泥水解酸化产生大量多糖、蛋白质和 VFAs 碳源的同时会有较高浓度的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  溶出的问题, 考察了 pH 值和元素摩尔比对以沉淀法同时去除  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的影响。结果表明, 最佳 pH 为 9.0 当 pH 升高到 10.0 时  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率略有下降, 在特定摩尔比范围内摩尔比对沉淀形成的影响大于 pH 值的影响; 化学沉淀法应用于剩余污泥酸化液脱氮除磷的最适宜镁、磷、氮摩尔比为 1.2:0.8:1 此时  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的去除率分别达到 50% 和 93% 以上, VFAs 碳源损失率 < 8%。

**关键词** pH 摩尔比 脱氮除磷 沉淀 剩余污泥酸化液

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2011)02-0241-05

## Effect of pH and element mol ratio on nitrogen and phosphorus removal in sludge fermentation liquors by precipitation method

Gao Yongqing Peng Yongzhen Zhang Jingyu Wang Shuying Gong Youkui

(Key Laboratory of Beijing for Water Environmental Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** Excess sludge will release abundant of carbohydrates, proteins, VFAs and unneglectable amount of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  during fermentation procedure. The effects of pH and element mol ratio were considered in a precipitation experiment for  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  removal. Results indicated that the optimal control pH was 9.0 and  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  removal efficiency decreased as pH increasing to 10.0. Within specific element mol ratio range, the effect of mol ratio on  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  removal was more significant than that of pH. It also validated that the appropriate applicable Mg:P:N mol ratio was 1.2:0.8:1. Under conditions with optimal parameters,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  removal efficiency in sludge fermentation liquors were above 50% and 93%, respectively, and the loss rate of VFAs C-source was less than 8%.

**Key words** pH; mol ratio; nitrogen and phosphorus removal; precipitation; excess sludge fermentation liquors

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<sup>[1]</sup>。城市污水厂产生的剩余污泥在经过厌氧水解酸化处理后可以产生大量的多糖、蛋白质和挥发性有机酸 (VFAs) 碳源, 它们可作为污水厂生物营养物去除 (BNR) 系统的补充碳源。水解酸化过程中污泥絮体结构被破坏, 微生物细胞破裂, 胞内物质流出。在厌氧菌作用下这些物质首先被转化为多糖、蛋白质等, 之后在  $\alpha$ -糖苷酶、蛋白酶等酶类作用下进一步转化为单糖、氨基酸和长链脂肪酸等, 并最终通过不同的生物途径转化为乙酸、丙酸、丁酸等 VFAs 形式, 同时释放出一定量的  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  和

$\text{NH}_4^+-\text{N}$ 。如果直接利用剩余污泥水解酸化液作为传统生物法处理工艺的补充碳源, 则必然会增加构筑物的氮、磷负荷, 有碍于强化脱氮除磷效果的实现。因此, 有必要在利用酸化液之前将其中的  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  回收, 减少后续 BNR 系统负荷。与生物

基金项目: 国家“十一五”重大科技专项课题 (2008ZX07209-003); 北京市高校人才强教深化计划高层次人才资助项目 (PHR20090502)

收稿日期: 2009-10-24 修订日期: 2009-11-16

作者简介: 高永青 (1982~), 女, 博士, 主要研究方向: 水污染控制及污泥减量化。

E-mail: wai2008\_2001\_20@mails.bjtu.edu.cn

脱氮除磷法相比, 沉淀法是相对简单、快速的方法<sup>[2]</sup>, 并且回收的磷可用以补充日益枯竭的磷矿资源<sup>[3]</sup>。

国内外有很多研究者关注磷酸铵镁 (MAP) 沉淀法回收污水或工业废水中的氮磷<sup>[4-8]</sup>。通常认为沉淀的形成与 pH 值、温度、饱和度和其他离子浓度 (如钙、镁等) 有关<sup>[9-14]</sup>。Parson 等<sup>[15]</sup> 和 Stratful 等<sup>[16]</sup> 对 MAP 沉淀中形成的晶体形态及纯度进行了研究。有研究指出 MAP 沉淀反应受时间影响很小<sup>[10 16-17]</sup>, 同时对废水中的总有机碳 (TOC) 去除作用较小<sup>[8 18]</sup>。谭婧等<sup>[19]</sup> 采用人工配水厌氧上清液发现 pH 升高到 8.5~9.0 时, MAP 法除磷率可达 95%。但是, MAP 沉淀法回收磷的最佳投药摩尔比和最佳 pH 值却众说不一<sup>[11 19-21]</sup>。

本文着重考察了投药顺序、投药摩尔比和 pH 值对沉淀形成及 N、P 去除效果的影响, 及最佳参数控制下实际剩余污泥酸化液沉淀处理过程中 TOC 和 VFAs 的损失率。

1 材料与方法

1.1 实验材料

剩余污泥水解酸化液取自本实验室内剩余污泥水解酸化柱, 其中剩余污泥来自实验室内 A/O 反应器。水解酸化柱所产生的剩余污泥水解酸化液主要参数长期稳定。本研究中实验装置为体积 1.5 L 的 SBR, 采用磁力搅拌器调节转速 (80 r/min)。实验分别用 1 mol/L 的 NaOH 溶液和 1 mol/L 的 HCl 溶液调节反应 pH 值, 用 0.01 mol/L 的 MgSO<sub>4</sub> 溶液和 0.01 mol/L 的 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 溶液调节 Mg:P:N 摩尔比。实验反应时间均为 15 min。

1.2 实验方法

1.2.1 最佳 pH 和摩尔比范围的确定

将 MgSO<sub>4</sub> · 6H<sub>2</sub>O、NH<sub>4</sub>Cl 和 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 溶于水中配制成如表 1 所示的不同 Mg:P:N 摩尔比溶液, 并将溶液调为 pH = 9.0 和 10.0。

表 1 实验 pH 值和元素摩尔比  
Table 1 pH value and element mol ratio in the experiment

| pH   | Mg:P:N 摩尔比 |    |    |    |    |    |
|------|------------|----|----|----|----|----|
|      | E          | F  | I  | S  | E  | I  |
| 9.0  | A1         | B1 | C1 | D1 | E1 | F1 |
| 10.0 | A2         | B2 | C2 | D2 | E2 | F2 |

1.2.2 剩余污泥水解酸化液实验

根据配水实验结果在反应装置中加入 300 mL 剩余污泥水解酸化液, 将 Mg:P:N 摩尔比分别调为 1.5:0.8:1 和 1.2:0.8:1, 分别在 pH = 9.0 和 pH = 10.0 时进行实验。

1.3 分析方法

PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P: 钼锑抗分光光度法; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: 纳氏试剂法; 蛋白质: Folin-试剂法; 多糖: 苯酚-硫酸法; pH: WTW-340i pH 分析仪; TOC、TN: MultiTOC/TN 3100 (Jena 德国); VFA: 气相色谱分析仪 (Agilent 6890N, 美国)。

2 结果与分析

2.1 pH 调节顺序对沉淀形成及 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率的影响

在 Mg:P:N 摩尔比为 1:1:1 情况下考察了 MgSO<sub>4</sub> · 6H<sub>2</sub>O、NH<sub>4</sub>Cl 和 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3 种试剂投加顺序和 pH 调节顺序对沉淀形成的影响。实验结果如图 1 所示, 将 MgSO<sub>4</sub> · 6H<sub>2</sub>O、NH<sub>4</sub>Cl 和 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 依次溶于水, 然后调节 pH 为 9.0 (顺序 1), 最终 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率分别为 39.9% 和 92%。当先将 NH<sub>4</sub>Cl 和 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 溶于水, 并调节 pH 为 9.0 最后投加 MgSO<sub>4</sub> · 6H<sub>2</sub>O (顺序 2) 时, 最终 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率为 36.5% 和 88.5%。这说明 pH 调节顺序和药剂投加顺序对沉淀法回收氮、磷影响较大。

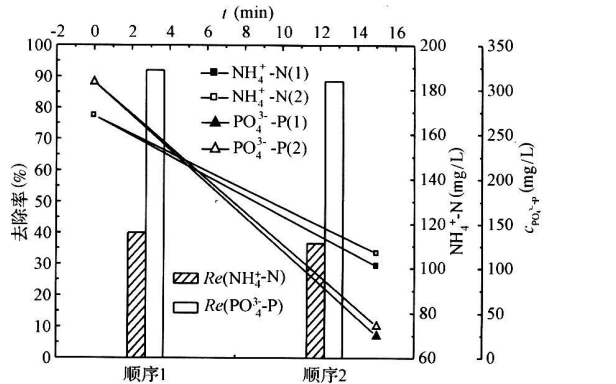


图 1 药剂投加顺序及 pH 调节顺序对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率的影响  
Fig. 1 Effect of chemical addition sequence and pH adjusting sequence on NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P removal efficiency

Booker等<sup>[22]</sup>和 Buchanan等<sup>[23]</sup>认为 MAP形成的 pH 范围在 8.0~10.0 之间,本实验中沉淀生成的临界 pH 为 8.6。MgSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O、NH<sub>4</sub>Cl 和 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3 种水溶液均呈弱酸性,采用顺序 (1) 进行混合后溶液 pH 为 4.6 左右,3 种物质同时以离子状态存在较多。当 pH 高于 8.6 时,消耗 OH<sup>-</sup> 产生沉淀。当 pH 最终恒定在 9.0 时,OH<sup>-</sup> 不断得到补充,因此有利于沉淀的形成。而当采用顺序 (2) 进行投加时,混合溶液中只有 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 离子存在,并且 MgSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O 加入后会消耗部分 OH<sup>-</sup>,减少了沉淀生成过程中 OH<sup>-</sup> 的补充,因此影响了沉淀的最终生成量。

2.2 摩尔比和 pH 值对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除的影响

根据上述结果,采用顺序 (1) 考察了表 1 所示的 6 种摩尔比和 2 个 pH 水平 (9.0、10.0) 下的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 回收情况。形成磷酸铵镁的 Mg:P:N 摩尔比理论值是 1:1:1。然而有 4 种磷酸镁盐是以沉淀状态存在的<sup>[24]</sup>,所以 Mg:P:N 摩尔比的实际值往往偏大。如图 2 和图 3 所示,pH 调为 9.0、10.0 时,C 摩尔比 (1.5:1.2:1) 所对应的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率最高分别为 96.7% 和 93.4%,其次是

F 摩尔比 (1.2:0.8:1),去除率分别为 73.6% 和 60.4%。这说明 Mg:N 及 P:N 值越高越有利于以沉淀形式去除 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N。在 Shin 和 Lee<sup>[10]</sup> 的配水实验中,Mg:P:N 摩尔比为 1:1:1 时随着 pH 升高到 10.5,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率可提高到 83%。但是,本实验中提高 pH 值对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除并没有贡献,反而影响了 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除 (图 3)。

由图 2(c)、图 2(d) 和图 3 可知,在 pH 值为 9.0 和 10.0 时,C (1.5:1.2:1) 和 D (1.5:0.8:1) 摩尔比对应的 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率最大,约为 95%~98%,E 所对应的 Mg:P:N 值均最大,但除磷效率却不高。当 pH 由 9.0 升高到 10.0 时,B、C、D 摩尔比条件下的 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率略微增加,其他摩尔比条件下 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率均随 pH 值升高反而降低 (图 3)。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率普遍随 pH 值升高而降低。这是由于产生沉淀的临界 pH 值为 8.6 所以将 pH 由 9.0 提高到 10.0 对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的去除率贡献不大。综合考虑,C (1.5:1.2:1)、D (1.5:0.8:1) 和 F (1.2:0.8:1) 为较适宜的摩尔比条件。一定摩尔比范围内,pH 值对沉淀影响变小而摩尔比影响更加明显。

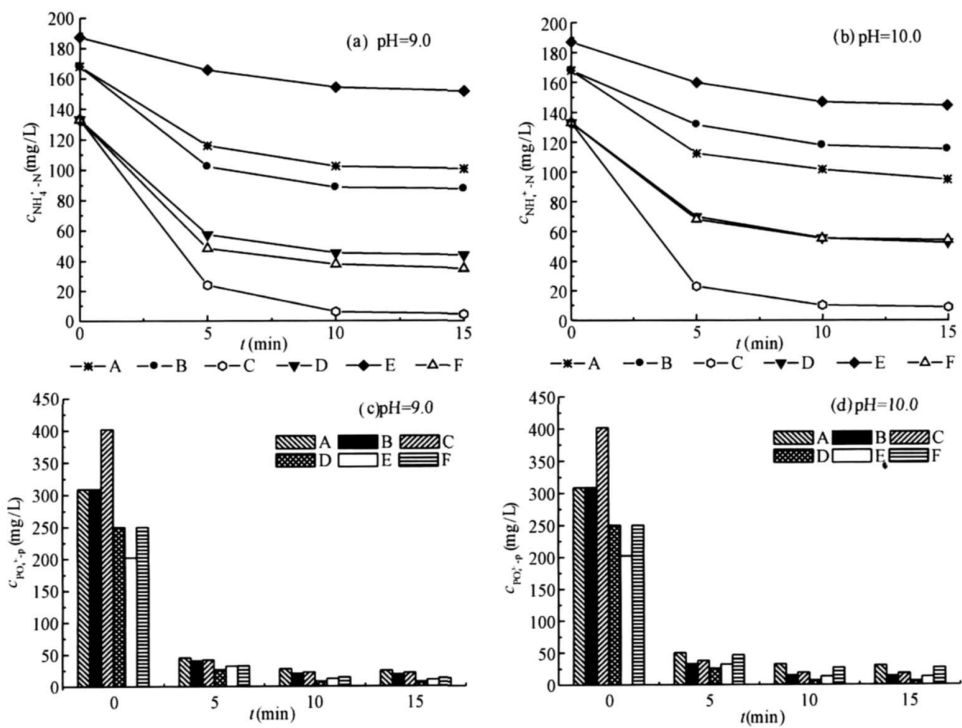


图 2 不同 pH 值和元素摩尔比条件下 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度变化

Fig 2 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P concentration variety under different pH and element molar ratios

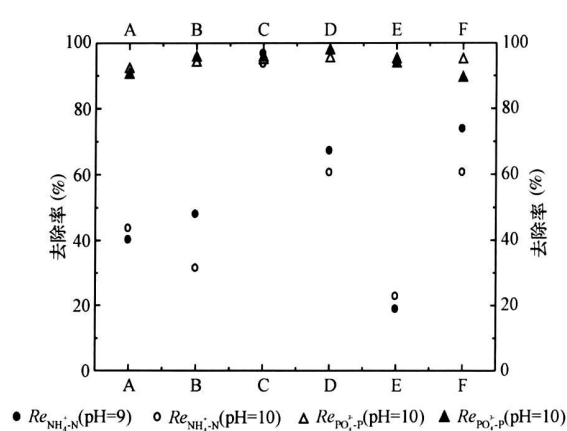


图 3 不同 pH 和摩尔比条件下的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率

Fig. 3  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  removal efficiency for synthetic wastewater under different pH and element molar ratios

2.3 摩尔比和 pH 值对剩余污泥酸化液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率的影响

实际污泥酸化液中 N:P 摩尔比很大, 约为 10:1 (表 2), 因此需要投加镁和适量的磷以达到适合铵镁磷沉淀形成的元素摩尔比。如图 4 所示, 通过在

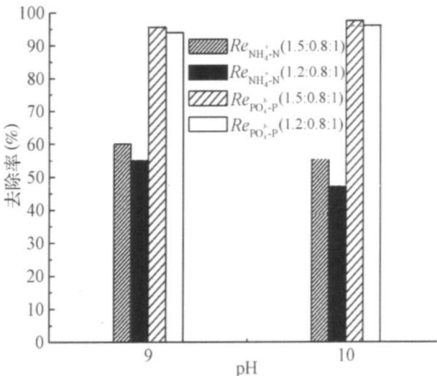


图 4 pH 及摩尔比对污泥酸化液脱氮除磷的影响

Fig. 4 Influence of pH and element mol ratio on nitrogen and phosphorus removal in sludge fermentation liquors

pH 为 9.0 和 10.0 情况下考察 Mg:P:N 摩尔比为 1.5:0.8:1 和 1.2:0.8:1 时  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除情况, 发现当 pH 由 9.0 升高到 10.0 时, 2 种摩尔比下  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率下降了 5% ~ 10% 左右, 但去除率都在 50% 左右,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率均升高了 2% 左右, 并且去除率都高于 93%。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率远低于  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率, 主要是因为磷酸铵镁化学反应式中,  $\text{NH}_3$  形成沉淀的速率比  $\text{NH}_4^+$  慢, 而随着 pH 的升高,  $\text{NH}_4^+$  却很容易被转化为  $\text{NH}_3$ <sup>[8 14]</sup>, 从而影响了  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率。

有研究发现剩余污泥酸化液在 Mg:P:N 摩尔比为 1.8:1:13 pH 为 10.0 情况下  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率低于 20%,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率为 92.5%<sup>[18]</sup>, 而 Mg:P:N 摩尔比为 1.8:1:16, pH 为 10.41 情况下  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率可达到 75.7%,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率为 83.2%<sup>[21]</sup>。Güney 等<sup>[9]</sup> 以污泥焚烧后的消化液为样品, 调节 pH 为 8.5 Mg:P:N 摩尔比为 1.5:1:1.2 得到的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率高于 63%。在养猪废水中按 1.3:1 的 Mg:P 摩尔比投加 MgO 并调节 pH 为 8.5 时,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率为 96%,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率仅有 7% 左右<sup>[8]</sup>。这说明随着废水水质特性的改变, 即使均为剩余污泥酸化液, 影响铵镁磷沉淀形成的 pH 值和 Mg:P:N 摩尔比也会有所差别<sup>[13-14]</sup>。

沉淀前后剩余污泥酸化液中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度变化如表 2 所示。经沉淀后,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度在 15 mg/L 以下,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度低于 66 mg/L, 对后续生物处理单元已经不会造成冲击负荷。无论 pH 为 9.0 还是 pH 为 10.0 摩尔比为 1.5:0.8:1 时剩余污泥酸化液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除率都要高于摩尔比为 1.2:0.8:1 时, 说明提高 Mg:N 比和 Mg:P 比更有利于去除氮、磷<sup>[14]</sup>, 这也使得本研究中氮、磷去除率高于文献值。结果证明沉淀法可以去除剩余污泥水解酸化液中 50% 以上的氮和 93% 以上的磷, 并且有机碳 (TOC) 的损失率 < 8% (表 2)。Karakashev 等<sup>[8]</sup> 发现形成磷酸铵镁沉淀时化学需氧量 (COD)

表 2 沉淀前后污泥水解酸化液组分  
Table 2 Component of sludge fermentation liquors before and after precipitation

| 参数               | VFAs<br>(mg COD/L) | $\text{NH}_4^+\text{-N}$<br>(mg/L) | $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$<br>(mg/L) | 蛋白质<br>(mg COD/L) | 多糖<br>(mg COD/L) | TOC<br>(mg C/L) | pH  |
|------------------|--------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|-----|
| 原污泥酸化液           | 300.1              | 146.2                              | 27.1                                  | 181.7             | 48.1             | 260.1           | 7.8 |
| 1.5:0.8:1 摩尔比沉淀后 | 276.1              | 58.5                               | 11.8                                  | 165.8             | 40.5             | 239.3           | 9.0 |
| 1.2:0.8:1 摩尔比沉淀后 | 285.5              | 65.8                               | 15.0                                  | 174.6             | 43.8             | 247.1           | 9.1 |

有轻微减少, 佟娟等<sup>[18]</sup>也发现沉淀使 COD 减少了约 5.8%。考虑到投药及 pH 值调节所需费用, 在实际应用中建议采用 pH 值为 9.0, Mg:P:N 摩尔比为 1.2:0.8:1。

### 3 结 论

在 pH = 9.0~10.0 条件下考察了 6 种摩尔比对沉淀法去除剩余污泥酸化液中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  及  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的影响, 得出了最佳 pH 及最适宜的 Mg:P:N 元素摩尔比。

(1) 沉淀生成的临界 pH 值为 8.6 当 pH 值由 9.0 升高到 10.0 时, 对  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率没有明显贡献, 甚至  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率会略微减小。

(2) 适合剩余污泥水解酸化液的最佳 pH 为 9.0, Mg:P:N 摩尔比为 1.2:0.8:1。此时  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率高于 50%,  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  去除率高于 93%, 并且沉淀形成对剩余污泥水解酸化液中有机物所造成的损失不足 8%。

(3) 剩余污泥水解酸化液经铵镁磷沉淀后可有效去除  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ , 从而不会对后续生物处理设施造成冲击负荷, 有利于生物处理设施利用污泥酸化液作为补充碳源。

### 参 考 文 献

- [1] Doyle J. D., Parsons S. A. Struvite formation, control and recovery. *Water Research*, **2002**, 36(16): 3925-3940
- [2] Yoshino M., Yao M., Tsuno H., *et al*. Removal and recovery of phosphate and ammonium as struvite from supernatant in anaerobic digestion. *Water Sci Technol*, **2003**, 48(1): 171-178
- [3] Saktaywin W. Advanced sewage treatment process with excess sludge reduction and phosphorus recovery. *Water Res*, **2005**, 39(5): 902-910
- [4] 陈轶, 员建, 苑宏英. 鸟粪石沉淀法回收污泥处理构筑物中氮磷的研究进展. *四川环境*, **2008**, 27(5): 89-93
- [5] 张杰, 王印忠, 曹相生, 等. 污泥脱水滤液水质对以鸟粪石形式回收磷的影响. *北京工业大学学报*, **2008**, 34(10): 1084-1088
- [6] 黄颖, 林金清, 李洪临. 鸟粪石法回收废水中磷的沉淀物的组成和晶形. *环境科学学报*, **2009**, 29(2): 353-359
- [7] 陈瑶, 李小明, 曾光明, 等. 污水磷回收中磷酸盐沉淀法的影响因素及应用. *工业水处理*, **2006**, 26(7): 10-14
- [8] Karakashev D., Schmitt J. E., Angelidaki I. Innovative process scheme for removal of organic matter, phosphorus and nitrogen from pig manure. *Water Research*, **2008**, 42(15): 4083-4090
- [9] Güney K., Weidener A., Krampe J. Phosphorus recovery from digested sewage sludge as MAP by the help of metal ion separation. *Water Research*, **2008**, 42(18): 4692-4698
- [10] Shin H. S., Lee S. M. Removal of nutrients in wastewater by using magnesium salts. *Environ Technol*, **1998**, 19(3): 283-290
- [11] Battistoni P., Pavan P., Prisciandaro M., *et al*. Struvite crystallization: A feasible and reliable way to fix phosphorus in anaerobic supernatants. *Water Research*, **1999**, 34(11): 3033-3041
- [12] 周荣敏, 雷延峰. 基于 BP 模型的磷酸铵镁法除磷模拟研究. *环境工程学报*, **2009**, 3(9): 1692-1696
- [13] Pastor L., Marti N., Bouzas A., *et al*. Sewage sludge management for phosphorus recovery as struvite in EBPR wastewater treatment plants. *Bioresource Technology*, **2008**, 99(11): 4817-4824
- [14] Pastor L., Mangin D., Ferrer J., *et al*. Struvite formation from supernatants of an anaerobic digestion pilot plant. *Bioresource Technology*, **2010**, 101(1): 118-125
- [15] Parson S. A., Wall E., Doyle J. D., *et al*. Assessing the potential for recovery of struvite from digested sludge liquors. *Environ Technol*, **2001**, 22(11): 1279-1286
- [16] Stratfull I., Scrimshaw M. D., Lester J. N. Conditions influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate. *Water Research*, **2001**, 35(17): 4191-4199
- [17] Lee S. I., Weon S. Y., Lee C. W., *et al*. Removal of nitrogen and phosphate from wastewater by addition of bittern. *Chemosphere*, **2003**, 51(4): 265-271
- [18] 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
- [19] 谭婧, 张涛, 梁睿, 等. 磷酸铵镁和磷酸钙法处理厌氧上清液的比较. *给水排水*, **2008**, 34(S1): 140-144
- [20] 潘玉婷, 左剑恶. 磷酸铵镁法回收污泥脱水液中磷的研究. *中国沼气*, **2008**, 26(4): 11-15
- [21] Tong J., Chen Y. Recovery of nitrogen and phosphorus from alkaline fermentation liquid of waste activated sludge and application of the fermentation liquid to promote biological municipal wastewater treatment. *Water Research*, **2009**, 43(12): 2969-2976
- [22] Booker N. A., Priestley A. J., Fraser I. H. Struvite formation in wastewater treatment plants: Opportunities for nutrient recovery. *Environmental Technology*, **1999**, 20(7): 777-782
- [23] Buchanan J. R., Mote C. R., Robinson R. B. Thermodynamics of struvite formation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **1994**, 37(2): 617-621
- [24] Marti N., Bouzas A., Seco A., *et al*. Struvite precipitation assessment in anaerobic digestion processes. *Chemical Engineering Journal*, **2008**, 141(1-3): 67-74