

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.07.016

鸟粪石结晶法回收污泥高级厌氧消化沼液中的磷

郭逸群¹, 丁燕燕^{1,2}, 于鸿宇¹, 戴晓虎¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院 水污染控制与资源绿色循环全国重点实验室, 上海 200092; 2. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 从沼液中结晶鸟粪石(MAP)是回收磷的有效途径。针对污泥高温热水解-高含固厌氧消化沼液氮磷比(物质的量之比)高的特性,通过单因素实验和 Box-Behnken Design(BBD)响应曲面实验,以磷回收率为响应值,对pH、镁磷比、反应时间、搅拌速度等条件进行优化,确定MAP结晶法回收沼液中磷的最佳条件。响应曲面分析显示,当氮磷比高达29时,最佳反应条件为:pH=8.8、镁磷比=1.36、搅拌速度=292 r/min、反应时间=10 min,磷回收率高达99%以上。当pH=9.0、镁磷比=1.0、搅拌速度=300 r/min、反应时间=20 min时,鸟粪石的纯度最高,达到98.04%。随着镁磷比的升高,鸟粪石的纯度降低。氨氮浓度是影响MAP结晶法的关键因素,虽然MAP结晶法高效回收磷需要过量氨氮,但当氨氮浓度达到一定阈值后,磷回收率趋于稳定,且接近100%。因此,针对氮磷比过高的含固厌氧消化沼液可以投加磷源,进一步实现氮的同步回收。

关键词: 污泥高级厌氧消化沼液; 磷回收; 鸟粪石; 氨氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)07-0106-07

Struvite Crystallization for Phosphorus Recovery from Slurry of Advanced Anaerobic Digestion of Sewage Sludge

GUO Yiqun¹, DING Yanyan^{1,2}, YU Hongyu¹, DAI Xiaohu¹

(1. State Key Laboratory of Water Pollution Control and Green Resource Recycling, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: Crystallization of struvite (magnesium ammonium phosphate, MAP) from slurry is an effective method for phosphorus recovery. This study investigated the optimization of MAP crystallization conditions in slurry with a high nitrogen-to-phosphorus (N/P) molar ratio, resulting from thermal hydrolysis combined with high-solid anaerobic digestion. Through single-factor experiments and Box-Behnken Design (BBD) response surface methodology, the phosphorus recovery rate was used as the response variable to optimize reaction parameters, including pH, magnesium-to-phosphorus (Mg/P) molar ratio, reaction time, and stirring speed. The results indicated that under optimal conditions—pH of 8.8, Mg/P molar ratio of 1.36, stirring speed of 292 r/min, and reaction time of 10 minutes—the phosphorus recovery rate exceeded 99%, even when the N/P molar ratio was as high as 29. Furthermore, at pH of 9.0, Mg/P molar ratio of 1.0, stirring speed of 300 r/min, and reaction time of 20 minutes, the purity of MAP

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(52131002)

通信作者: 丁燕燕 E-mail: yding@mail.usts.edu.cn

crystals reached a maximum of 98.04%. Increasing the Mg/P molar ratio beyond this point led to a decrease in MAP purity. Ammonia nitrogen concentration was identified as a critical factor influencing MAP crystallization. While an excess of ammonia nitrogen was required for efficient phosphorus recovery, the phosphorus recovery efficiency stabilized and approached 100% once the ammonia nitrogen concentration surpassed a certain threshold. Therefore, for slurry with an excessively high N/P molar ratio, adding a phosphorus source can facilitate the simultaneous recovery of nitrogen.

Keywords: advanced anaerobic digestion slurry of sludge; recovery of phosphorus; struvite; ammonia nitrogen

污泥厌氧消化沼液中含有丰富的磷资源,其直接排放和不合理利用会造成水体严重污染,导致水体富营养化^[1-2]。对沼液中的磷进行回收不仅可以有效解决水体富营养化的问题,还能够实现磷资源的可持续发展。当前,从沼液中回收磷的方法主要包括吸附法和化学沉淀法等^[3]。其中,鸟粪石(磷酸铵镁,MAP)结晶法因其较高的磷回收效率、较低的运行成本以及较好的环境友好性,逐渐成为磷回收领域的研究热点。MAP结晶法主要是在一定条件下,通过向废水中投加镁源和磷源,调节反应体系中离子的物质的量之比,使 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 生成 $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$,实现磷的固定^[4]。而且,其产物可作为农业缓释磷肥使用,符合资源循环利用的可持续发展需求^[5]。目前相关研究通过调控pH、离子浓度和温度等参数,能够将磷回收率提高到90%以上^[6-8]。MAP结晶法在常规厌氧消化沼液的磷回收中已表现出较好的回收效果和经济性,成为当前磷回收领域中的重要方向。

近年来,随着污泥处理处置工艺的不断发展,高温热水解与高含固厌氧消化联合技术逐渐应用于实际工程中^[9]。该技术通过高温热水解预处理,改善污泥的可降解性和生物可利用性,随后通过高含固厌氧消化进一步增强污泥中有机物的降解能力,从而显著提升污泥的资源化利用效率与稳定性,目前已在我国长沙、北京、合肥、镇江等多个城市得到示范应用。与传统厌氧消化污泥沼液相比,高温热水解-高含固厌氧消化沼液中的氨氮浓度增加了1倍以上(约2 000 mg/L)。这一变化可能会干扰沼液中鸟粪石的结晶行为,进而影响磷的回收效率及结晶产物质量。因此,如何在该条件下进一步优化反应参数、降低成本并提高磷回收率,仍是当前领域亟待解决的关键问题。

基于此,本研究针对高温热水解-高含固厌氧消化这一特殊类型沼液中的磷回收过程进行深入分析,重点优化鸟粪石结晶法的关键参数,旨在提高磷的回收效率、降低成本并改善结晶产物质量。本研究还探讨了氨氮浓度对鸟粪石结晶反应的影响,揭示高氨氮环境下鸟粪石结晶的机理,以期为高温热水解-高含固厌氧消化沼液中的磷回收提供理论依据和技术支持。

1 材料与amp;方法

1.1 高含固沼液特性和实验用水

实验用沼液取自西安市某污水处理厂,使用前将沼液保存在4℃冰箱中。利用真空抽滤装置,通过0.45 μm滤膜对沼液进行抽滤,对抽滤后得到的液体进行水质分析,发现沼液pH为8.2,氨氮浓度高达1 957 mg/L, PO_4^{3-} -P浓度为149 mg/L,N/P(物质的量之比,下同)为29;其他金属离子浓度如下: Mg^{2+} 为4.20 mg/L、 K^+ 为276.55 mg/L、 Fe^{3+} 为4.85 mg/L、 Al^{3+} 为0.85 mg/L。

鉴于实际沼液成分复杂,实验全程采用模拟沼液,以 $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ 为磷源、 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 为镁源、 NH_4Cl 为氮源进行配制。模拟沼液的 PO_4^{3-} -P浓度为149 mg/L、 NH_4^+ -N浓度为1 957 mg/L,控制实验体系的Mg/P值(物质的量之比,下同)。

1.2 实验仪器与试剂

实验仪器:六联机械搅拌器、酶标仪、台式pH计、干燥箱、电子分析天平;实验试剂: $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ 、 NH_4Cl 、 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 、NaOH、抗坏血酸、HCl、 H_2SO_4 、酒石酸钾钠、纳氏试剂,均为分析纯,购自国药集团。

1.3 实验设计

影响鸟粪石结晶的主要因素有反应时间、搅拌速度、镁磷比和pH,因此,首先在室温条件下针对以

上4个因素设置4组实验来考察其对沼液中磷回收率的影响,确定各个因素的优化区间,为后续响应面设计提供依据。其中,pH设为7.0、8.0、9.0、10.0、11.0、12.0;镁磷比设为1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0;反应时间设为5、10、15、20、25、30 min,搅拌速度设为100、200、300、400、500、600 r/min。实验时,改变其中一个因素,保持其他因素不变(Mg/P为1.0、反应时间为20 min、搅拌速度为200 r/min、pH为9.0)。具体操作如下:在六联机械搅拌器上,按实验要求设置搅拌时间和转速,然后静置30 min;采用0.45 μm滤膜过滤上清液,测定PO₄³⁻-P浓度;利用滤斗对反应所得沉淀物进行过滤,然后将其在40℃下烘干,进行定性及定量分析。

经单因素实验优化确定基本参数后,采用Box-Behnken Design(简称BBD)进行实验设计,并利用Design-Expert软件进行回归分析,确定鸟粪石结晶法回收沼液中磷的最优条件。

1.4 分析项目及方法

pH采用pH计测定,氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定,PO₄³⁻-P采用钼锑抗分光光度法测定,Mg²⁺采用湿法消解后ICP-OES测定。

磷回收率定义为鸟粪石沉淀回收的磷酸盐占沼液中磷酸盐总量的比例,计算方法如下:

$$R = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为磷回收率,%; c_1 为反应前沼液中的磷酸盐浓度,mg/L; c_2 为反应后上清液中的磷酸盐浓度,mg/L。

鸟粪石纯度:对实验中得到的沉淀在40℃下烘干48 h,然后进行X射线衍射(XRD)分析,并与纯鸟粪石进行对比,鸟粪石纯度的计算方法如式(2)所示。

$$\rho = \frac{C_x \times V \times M_{\text{MAP}}}{M_x \times m_p} \times 100\% \quad (2)$$

式中: C_x 为沉淀溶解后测得的NH₄⁺-N浓度,mg/L; V 为定容的体积,L; M_x 为N的摩尔质量,g/mol; M_{MAP} 为鸟粪石的摩尔质量,g/mol; m_p 为沉淀的取样质量,g。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 pH对磷回收的影响

pH是影响MAP结晶沉淀反应的重要因素之

一。升高pH可以缩短MAP的结晶诱导期,提高MAP的结晶效率^[10]。根据MAP结晶沉淀法反应原理,当溶液中H⁺浓度过高时,不利于体系中MAP沉淀的产生,MAP结晶沉淀反应一般在碱性条件下才能进行。当pH<7.0时,一般不会有MAP沉淀产生;但当pH过高时,MAP的纯度和含量会降低,沉淀中会出现其他杂质,如Mg(OH)₂和Mg₃(PO₄)₂,不利于MAP的回收^[11]。因此本研究考察了pH在7.0~12.0范围时上清液中PO₄³⁻-P浓度的变化情况,并计算磷回收率,结果如图1所示。可以看出,当pH在7.0~9.0范围时,上清液中的PO₄³⁻-P浓度逐渐降低,磷回收率逐渐升高;当pH在8.0~11.0范围时,磷回收率保持在80%以上;但是当pH从11.0升高到12.0时,上清液中的PO₄³⁻-P浓度急剧升高,磷回收率从85%迅速下降到42%。综上所述,反应体系的最佳pH为9.0,此时上清液中的PO₄³⁻-P浓度仅为17 mg/L,磷回收率接近90%。Huang等^[12]在对养殖废水的研究中发现,当pH>10.0时,即使沉淀量还在继续增加,但是沉淀能力降低。

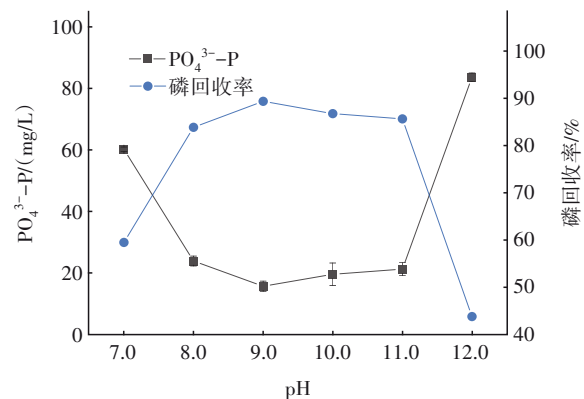


图1 pH对磷回收效果的影响

Fig.1 Effect of pH on recovery efficiency of phosphorus

2.1.2 Mg/P对磷回收的影响

对于MAP沉淀反应来说,理论上Mg²⁺:PO₄³⁻:NH₄⁺=1:1:1时,可以生成MAP沉淀。但在实际情况中,沼液的成分往往很复杂,为了达到更好的除磷效果,镁源和氮源需要过量。因此,在pH为9.0、搅拌速度为200 r/min、搅拌时间为20 min的条件下,通过改变Mg/P值考察其对磷回收效果的影响,结果如图2所示。当Mg/P值为1.0~1.8时,随着Mg/P值的增大,上清液中PO₄³⁻-P的浓度逐渐下降,磷回收率逐渐增大;当Mg/P值为1.8时,磷回收率达到最大,为99%;当Mg/P值继续增大时,磷回收率下降。

添加过多的镁源会增加药剂成本,同时也会导致其他副反应的发生,例如生成 $Mg_3(PO_4)_2$,不利于鸟粪石结晶,因此综合考虑各项因素,确定最佳镁磷比为1.2。

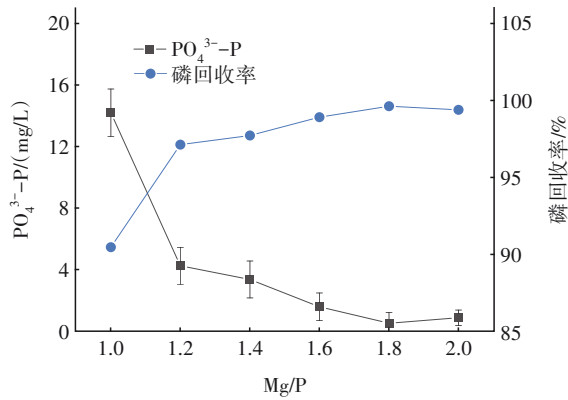


图2 Mg/P对 $PO_4^{3-}-P$ 回收效果的影响

Fig.2 Effect of Mg/P ratio on recovery efficiency of phosphorus

2.1.3 反应时间和搅拌速度对磷回收的影响

在pH为9.0、Mg/P为1.2、搅拌速度为200 r/min的条件下,改变反应时间,探究其对磷回收效果的影响。结果显示,当反应时间在5~30 min范围变化时,上清液中的 $PO_4^{3-}-P$ 浓度在2.93~4.89 mg/L之间波动,磷回收率在96.72%~98.03%之间波动,表明反应时间对磷回收率的影响较小。有研究表明,当反应时间超过20 min时,磷回收率有所下降。如果反应时间过长,可能会对已经生成的鸟粪石沉淀产生破坏,影响鸟粪石的沉淀性能^[13-14]。因此,确定最佳反应时间为20 min。

另外,在pH为9.0、Mg/P值为1.2、反应时间为20 min的条件下,改变搅拌速度,探究其对磷回收效果的影响。结果显示,当搅拌速度在100~600 r/min范围变化时,上清液中的 $PO_4^{3-}-P$ 浓度在3.38~4.80 mg/L之间波动,磷回收率在96.42%~97.73%之间波动,表明搅拌速度对磷回收率的影响不显著。在本实验中,当搅拌速度为300 r/min时,磷回收率最高。

2.2 BBD结果与分析

2.2.1 BBD实验设计与结果

采用Design-Expert软件,以磷回收率为响应值,对pH、Mg/P、反应时间、搅拌速度进行BBD分析实验,采用四因素三水平的响应曲面分析方法,共进行29组实验,因素与水平设计以及具体结果如表

1所示。

表1 BBD分析因素、水平及实验结果

Tab.1 Analytical factors, levels and experimental results of BBD

实验号	A: pH	B: Mg/P	C: 搅拌速度/(r/min)	D: 搅拌时间/min	Y: 磷回收率/%
1	9.0	1.2	400	10	98.21
2	10.0	1.2	300	10	98.81
3	9.0	1.4	400	20	98.81
4	9.0	1.0	400	20	88.31
5	9.0	1.0	200	20	89.44
6	8.0	1.2	300	10	96.72
7	10.0	1.4	300	20	98.81
8	8.0	1.2	300	30	95.76
9	9.0	1.4	300	30	99.64
10	8.0	1.0	300	20	82.82
11	9.0	1.2	300	20	97.20
12	10.0	1.0	300	20	85.68
13	9.0	1.4	300	10	99.28
14	9.0	1.4	200	20	99.28
15	9.0	1.2	300	20	97.02
16	9.0	1.0	300	30	89.38
17	8.0	1.4	300	20	98.93
18	9.0	1.0	300	10	90.04
19	9.0	1.2	200	30	96.42
20	9.0	1.2	300	20	97.08
21	8.0	1.2	200	20	93.38
22	9.0	1.2	200	10	98.21
23	10.0	1.2	400	20	94.75
24	9.0	1.2	400	30	94.51
25	9.0	1.2	300	20	96.54
26	10.0	1.2	300	30	95.88
27	10.0	1.2	200	20	95.88
28	9.0	1.2	300	20	95.35
29	8.0	1.2	400	20	94.57

2.2.2 BBD实验回归方程与方差分析

通过对磷回收率的实验数据进行处理,得到以pH、Mg/P、反应时间、搅拌速度为变量的多元二次回归方程如下:

$$Y = -234.864 + 35.723A + 237.077B + 0.069C - 0.071D - 3.728AB - 0.0058AC - 0.049AD + 0.008BC + 0.127BD - 0.00048CD - 1.549A^2 - 74.89B^2 - 0.000033C^2 + 0.0106D^2 \quad (3)$$

方差分析结果显示,本实验模型的F值为21.38, $P < 0.0001$,说明实验模型的显著性极高,预

测结果和实际结果的拟合性较好。失拟项的 P 值为 0.089 8, 失拟项不显著, 实验得到的回归方程模拟情况较好, 可以通过此模型对磷回收率进行分析和预测。一次项中 Mg/P 的 F 值为 397.65, $P < 0.000 1$, 表明 Mg/P 对于磷回收率有显著性影响。 pH 、 Mg/P 、搅拌速度、反应时间对磷回收率影响的 F 值分别为 4.86、397.65、0.997 6、7.78, 由此可见 4 个因素对磷回收率的影响大小顺序为 $Mg/P > 反应时间 > pH > 搅拌速度$ 。4 个因素两两之间对应的 P 值分别为 0.298 4、0.413 7、0.487 7、0.815 6、0.719 3、0.500 7, 说明这些因素发生改变时的交互作用较小。

2.2.3 BBD 实验的响应曲面分析

图 3 为 pH 、 Mg/P 、搅拌速度、反应时间 4 个因素对沼液中磷回收率的响应曲面分析结果。根据 3D 曲面的坡度变化可以看出, 4 个因素对响应结果的影响大小为 $Mg/P > 反应时间 > pH > 搅拌速度$, 与方差分析结果相同。利用 BBD 响应曲面分析法得到最佳反应条件如下: pH 为 8.8, Mg/P 为 1.36, 搅拌速度为 292 r/min, 反应时间为 10 min。在此条件下, 通过 MAP 结晶沉淀法回收沼液中的磷具有较好的效果。对最佳反应条件进行实验验证, 结果显示, 对沼液中磷的回收率高达 99% 以上。

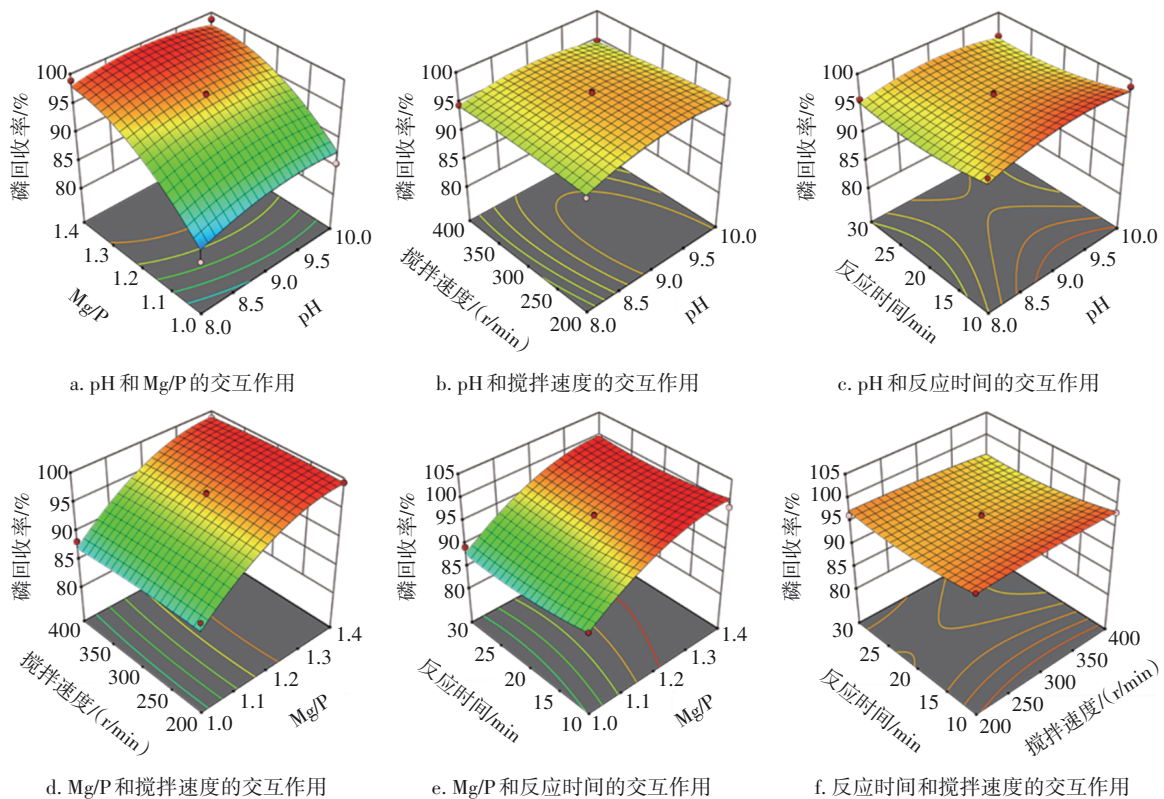


图 3 各个因素之间的交互作用对磷回收率影响的三维响应曲面

Fig.3 3D response surfaces of impact of various factors interaction on phosphorus recovery rate

2.3 鸟粪石纯度分析

对最佳反应条件下得到的沉淀物进行 XRD 分析, 并与纯鸟粪石晶体的 XRD 谱图进行对比, 结果如图 4 所示。可以看出, 实验制得的沉淀物衍射峰出现的位置与纯鸟粪石晶体的基本相同, 说明在最佳条件下得到的沉淀物中鸟粪石的纯度较高, 主要成分是六水合磷酸铵镁晶体。

为了定量表征鸟粪石纯度, 对沉淀物中的 N 含量进行测定, 结果见表 2。在 $Mg/P=1.2$ 条件下, 当

pH 为 9.0、10.0、11.0 时, 沉淀物中的鸟粪石纯度均在 90% 以上, 其中当 $pH=9.0$ 时鸟粪石纯度最高; 当 $pH=12.0$ 时, 鸟粪石纯度仅为 10.57%, 说明此时沉淀物的主要成分不是磷酸铵镁晶体。 pH 过高会使沉淀物中的杂质过多, 鸟粪石纯度较低, 不利于鸟粪石晶体的回收。在 $pH=9.0$ 的条件下, 当 $Mg/P=1.0$ 时, 鸟粪石纯度最高, 高达 98.04%; 随着 Mg/P 的增加, 鸟粪石的纯度逐渐降低。

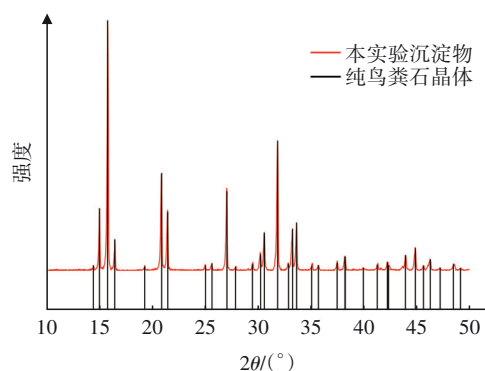


图4 最优条件下的沉淀物XRD衍射图

Fig.4 XRD image of precipitate under optimal conditions

表2 不同实验条件下鸟粪石的纯度

Tab.2 Purity of struvite under different conditions

pH	Mg/P	沉淀物中N含量/%	鸟粪石纯度/%
9.0	1.0	5.602	98.04
9.0	1.2	5.365	93.89
9.0	1.4	5.297	92.70
9.0	1.6	5.223	91.41
10.0	1.2	5.297	92.70
11.0	1.2	5.223	91.41
12.0	1.2	0.604	10.57

2.4 氨氮浓度对MAP结晶沉淀法的影响

在利用MAP结晶沉淀法回收沼液中磷的过程中,由于沼液中的氨氮含量较高,因此仅需额外添加镁源进行沼液中磷的回收。但氨氮浓度会影响沉淀中鸟粪石的纯度^[15],因此需探究磷回收率是否与氨氮浓度有关。由于沼液成分较为复杂,故利用配制的模拟沼液进行氨氮浓度影响的实验,设置氨氮浓度分别为67(N/P=1.0)、200、400、800、1200、1600、2000 mg/L,结果如图5所示。

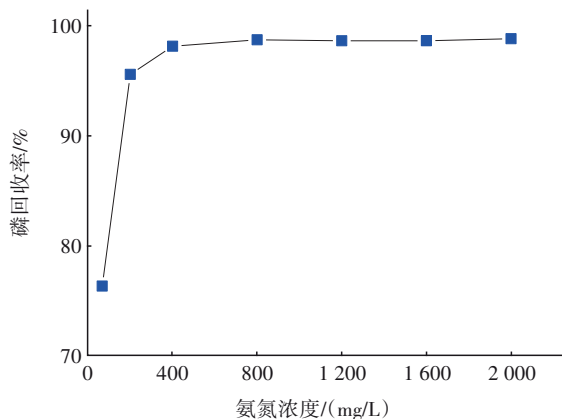


图5 氨氮浓度对磷回收率的影响

Fig.5 Effect of ammonia nitrogen concentration on phosphorus removal rate

由图5可知,当氨氮浓度低于400 mg/L时,随着氨氮浓度的增大,磷回收率逐渐提高;当氨氮浓度超过400 mg/L后,磷回收率保持稳定。当氨氮浓度为67 mg/L(N/P=1.0)时,体系中的磷并没有很大程度上得到回收。因此要想最大限度地回收体系中的磷,氨氮浓度必须过量,表明高含固厌氧消化沼液可以作为富磷溶液中磷回收的氮源。

3 结论

① 通过单因素实验初步优化鸟粪石结晶法回收沼液中磷的工艺参数,得到最佳参数如下:pH为9.0、镁磷比为1.2、反应时间为20 min、搅拌速度为300 r/min。之后通过响应面回归分析,得到沼液中磷回收的最优条件如下:pH为8.8、镁磷比为1.36、搅拌速度为292 r/min、反应时间为10 min,在此条件下,磷回收率高达99%以上。

② XRD分析结果显示,所得沉淀物是鸟粪石,而且在最优工艺条件下,鸟粪石纯度可达到90%以上,具有实际应用价值。

③ 模拟沼液实验结果表明,鸟粪石结晶法回收磷需要过量氨氮;当氨氮浓度达到400 mg/L后,磷回收率趋于稳定并接近100%。因此,对于氮磷比过高的高含固厌氧消化沼液,可以投加磷源实现氮的同步回收。

参考文献:

- [1] PING Q, LU X, LI Y, et al. Effect of complexing agents on phosphorus release from chemical-enhanced phosphorus removal sludge during anaerobic fermentation [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 301: 122745.
- [2] DENG S, LIU J, YANG X, et al. Release of phosphorus through pretreatment of waste activated sludge differs essentially from that of carbon and nitrogen resources: comparative analysis across four wastewater treatment facilities [J]. *Bioresource Technology*, 2024, 396: 130423.
- [3] PENG F, HE W, GU R, et al. Enhancing phosphorus release and recovery from waste activated sludge by citric acid treatment and cyclic extraction [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 501: 157461.
- [4] WU S, ZOU S, LIANG G, et al. Enhancing recovery of magnesium as struvite from landfill leachate by pretreatment of calcium with simultaneous reduction of

- liquid volume via forward osmosis [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 137-146.
- [5] UYSAL A, DEMIR S, SAYILGAN E, et al. Optimization of struvite fertilizer formation from baker's yeast wastewater: growth and nutrition of maize and tomato plants [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(5): 3264-3274.
- [6] LI B, BOIARKINA I, YU W, et al. Phosphorous recovery through struvite crystallization: challenges for future design [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 1244-1256.
- [7] NAGESHWARI K, BALASUBRAMANIAN P. Evolution of struvite research and the way forward in resource recovery of phosphates through scientometric analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 357: 131737.
- [8] LI B, HUANG H M, BOIARKINA I, et al. Phosphorus recovery through struvite crystallisation: recent developments in the understanding of operational factors [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 248: 109254.
- [9] XU Y, GONG H, DAI X. High-solid anaerobic digestion of sewage sludge: achievements and perspectives [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2020, 15(4): 71.
- [10] 刘志, 邱立平, 王嘉斌, 等. pH对磷酸铵镁结晶介稳区、诱导期和反应速率的影响 [J]. *环境工程学报*, 2015, 9(1): 89-94.
- LIU Z, QIU L P, WANG J B, et al. Influence of pH on crystallization metastable zone, induction period and crystallization rate of magnesium ammonium phosphate [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(1): 89-94 (in Chinese).
- [11] WANG Y, QIU L P, HU M F. Magnesium ammonium phosphate crystallization: a possible way for recovery of phosphorus from wastewater [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 392(3): 032032.
- [12] HUANG H, ZHANG D, LI J, et al. Phosphate recovery from swine wastewater using plant ash in chemical crystallization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 168: 338-345.
- [13] 白晓凤, 李子富, 闫园园, 等. 吹脱与鸟粪石沉淀组合工艺处理中温厌氧发酵沼液研究 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 218-225.
- BAI X F, LI Z F, YAN Y Y, et al. Treatment of liquid digestate by stripping combined with struvite precipitation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 218-225 (in Chinese).
- [14] 王晓颖. 磷酸铵镁沉淀法与SBR工艺协同处理高含磷检修废水的研究 [J]. *精细石油化工*, 2020, 37(2): 59-63.
- WANG X Y. Study on treatment of high phosphorus wastewater by magnesium ammonium phosphate precipitation method and SBR process [J]. *Speciality Petrochemicals*, 2020, 37(2): 59-63 (in Chinese).
- [15] 张荣新, 刘祎, 傅金祥, 等. 鸟粪石沉淀法处理高浓度氮磷废水研究进展 [J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(8): 1175-1183.
- ZHANG R X, LIU Y, FU J X, et al. Research progress on the treatment of high concentration nitrogen and phosphorus wastewater by struvite precipitation method [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2024, 46(8): 1175-1183 (in Chinese).

作者简介: 郭逸群(1997—), 男, 山东聊城人, 博士研究生, 主要研究方向为污泥污染控制与资源化利用。

E-mail: guoyiqun@tongji.edu.cn

收稿日期: 2025-03-12

修回日期: 2025-03-30

(编辑: 刘贵春)