农业环境科学学报 2011,30(4):768-773
Journal of Agro-Environment Science

添加造纸白泥对猪场废水厌氧消化液中氮磷回收的影响

冯文谦[1]，黎文威[2]，王德汉[1*]，李　东[3]，孙永明[3]

（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.惠州市环保局固体废物管理站，广东 惠州 516001；3.中国科学院广州能源研究所，广州 510640）

摘　要：以造纸废弃物白泥作为 pH 调节剂，利用 MAP 沉淀法回收厌氧消化液中的氮磷，并采用曝气的方式提高消化液 pH 值和造纸白泥的溶解性，研究了造纸白泥的添加量和曝气时间对厌氧消化液中氮、磷回收效果的影响，并考察了曝气过程中 pH、COD、PO_4^{3-}-P、NH_3-N、Mg^{2+}、Ca^{2+}的变化规律。结果表明：造纸白泥的添加量为 8 g·L^{-1}，曝气时间为 120 min 时，PO_4^{3-}-P 和 NH_3-N 的回收率分别达到 98%和 59%，出水的 PO_4^{3-}-P 和 NH_3-N 浓度分别为 0.98 mg·L^{-1} 和 60.66 mg·L^{-1}，均达到了《畜禽养殖业污染物排放标准》（GB18596—2001）的要求，同时，COD 的去除率为 45%。如果仅用曝气方式处理，120 min 后 PO_4^{3-}-P 和 NH_3-N 的回收率仅分别为 66%和 41%，均未达到排放标准要求。可见，与仅用曝气方式处理相比，添加造纸白泥协同曝气对厌氧消化液中氮磷的回收有明显的效果。

关键词：造纸白泥；猪场废水；厌氧消化液；氮磷回收

中图分类号：X793　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1672-2043(2011)04-0768-06

The Recovery of the Nitrogen and Phosphorus from Anaerobically Digested Effluent of Piggery Wastewater by White Paper Sludge Application

FENG Wen-qian[1], LI Wen-wei[2], WANG De-han[1*], LI Dong[3], SUN Yong-ming[3]

(1.Department of Environment Science & Engineering, College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2.Solid Waste Management Station, Environment Protection Bureau of Huizhou, Huizhou 516001, China; 3.Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The MAP precipitation process was used to recover nitrogen and phosphorus from anaerobically digested effluent of piggery wastewater. For the recovery process, white paper sludge (WPS) was used to adjust the pH values, what's more, the pH value of the effluent and the dissolution of the WPS increased by aeration. The effects on the nitrogen and phosphorus recovery efficiency by different WPS dosage and aeration time were studied, and the variation laws of pH values, COD concentration, PO_4^{3-}-P concentration, NH_3-N concentration, Mg^{2+} concentration and Ca^{2+} concentration in aerating were all measured. The experimental results showed when the dosage of WPS was 8 g·L^{-1}, and the aeration time was 120 min, the recovery efficiencies of PO_4^{3-}-P and NH_3-N were 98% and 59%, respectively, as well as the removal efficiencies of COD was 45%, and the effluent concentrations of PO_4^{3-}-P and NH_3-N were 0.98 mg·L^{-1} and 60.66 mg·L^{-1}, respectively, those in which were lower than the standards of *Discharge Standard of Pollutants for Livestock and Poultry Breeding* (GB 18596—2001). However, without WPS application, when the aeration time was 120 min, the recovery efficiencies of PO_4^{3-}-P and NH_3-N were only 66% and 41%, respectively, which were not meeting the standards. Therefore, it was important to recover the nitrogen and phosphorus from anaerobically digested effluent of piggery wastewater with WPS application.

Keywords: white paper sludge; piggery wastewater; anaerobically digested effluent; recovery of nitrogen and phosphorus

畜禽废水是一种富含 N、P 的高浓度有机废水[1]。近年来，畜禽养殖业发展迅速，规模不断扩大，随之而产生的畜禽废水所造成的环境问题也越来越突出。国内的发展经验证明利用厌氧消化技术处理畜禽废水，制取沼气，使废弃物减量化、资源化、无害化，可改善环境，实现经济的可持续发展，已成为畜禽废水处理不可或缺的重要单元之一[2-4]。但经过厌氧消化处理后，废液的污染物浓度特别是氮磷含量仍然较高，不能达标排放，需要进一步处理。

收稿日期：2010-10-08
基金项目：科技部"十一五"国家科技支撑计划重大项目（2008BADC4B04）；广东省科技计划项目（2008b030302044）
作者简介：冯文谦（1985—），男，广东清远人，硕士研究生，研究方向为废弃物资源化利用。E-mail：578920020@qq.com
* 通讯作者：王德汉　E-mail：dehanwang@scau.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

目前，从污水中回收磷的主要工艺是磷酸铵镁（Magnesium Ammonium Phosphate，MAP）结晶和磷酸钙（Calcium phosphates，CP）沉淀结晶工艺[5]。其中MAP结晶法往往具备同步实现对氮、磷的高效脱除和有效回收，因而倍受关注。李亮等[6]通过曝气回收沼气发酵液中的氮磷资源，结果表明磷回收率可达65%，氮回收率也有40%，并指出采用曝气处理仍需要进一步调节提高pH值以达到最高的磷回收率。但如果采用碱处理，成本较高，不利于规模化处理。

造纸厂碱回收的白泥是一种强碱性废弃物，含有少量的Ca^{2+}和Mg^{2+}，若将造纸白泥添加到猪场废水厌氧消化液中，则可以使PO_4^{3-}和NH_4^+在碱性条件下与Ca^{2+}和Mg^{2+}发生化学沉淀反应，形成磷酸铵镁和羟基磷酸钙（HAP）等沉淀物。国内外对添加造纸白泥的化学沉淀法回收氮、磷已有一些研究，并指出造纸白泥是一种废弃物，将它用于污水处理不但可以做到“以废治废”，而且处理费用低，生成的沉淀物还可以作为肥料，具有工程应用前景[7]。但利用造纸白泥协同曝气MAP沉淀法回收氮、磷的研究至今未见报道。

本文采用造纸白泥协同曝气MAP沉淀法回收猪场废水厌氧消化液中的氮、磷，考察了造纸白泥的不同添加量与曝气方式联合作用下消化液中的pH、PO_4^{3-}–P、NH_3–N、Mg^{2+}、Ca^{2+}、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

试验用水取自广州市近郊某大型养猪厂，以其废水经厌氧消化处理后的沼液为研究对象。处理前的消化液于4 ℃条件下密封静置保存24 h后取上清液待用。曝气处理前对其主要性质进行了测定，结果见表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。在105 ℃下烘干至恒重，研磨后过100目筛备用。测得pH值为12.16，含水量为78%，成分以碳酸钙和氢氧化钠为主（表2）。

表1　厌氧消化液主要性质

Table 1　Basic characteristics of the anaerobically digested effluent

指标	TP	PO_4^{3-}–P	NH_3–N	COD	BOD_5	Mg^{2+}	Ca^{2+}
数值/mg·L^{-1}	69.17	54.82	147.33	1 244.44	154.8	141.06	82.31

注：TP为总磷，COD为化学需氧量，BOD_5为5 d生化需氧量，pH值为7.16。

1.2　试验装置

试验装置如图1所示，反应器采用1 000 mL的烧杯，以黏砂块作为微孔曝气头曝气，玻璃转子流量计调节曝气强度实现吹脱CO_2与搅拌；溶液pH值采用pHS–25型精密pH计实时监控，并用移液管采样分析。

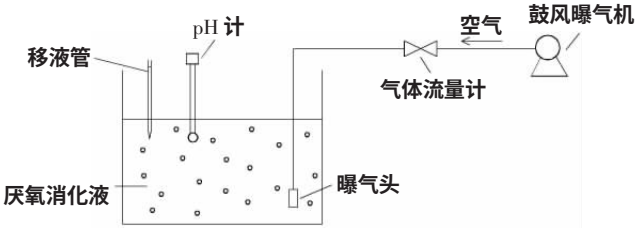

图1　MAP沉淀试验装置

Figure 1　Experimental setup of MAP precipitation process

1.3　试验方法

采用间歇进水方式，猪场废水厌氧消化液先经纱布过滤。取6个1 000 mL的烧杯，每个烧杯进500 mL消化液，曝气强度控制为1 L·min^{-1}，研究不同的造纸白泥添加量（0、2、5、8、11、15 g·L^{-1}）和曝气时间（5、15、30、60、120 min）条件下厌氧消化液中pH、PO_4^{3-}–P、NH_3–N、Mg^{2+}、Ca^{2+}、COD的变化规律。

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^{-1}）的HCl，使结晶反应停止。水样留待分析测定PO_4^{3-}–P、NH_3–N、Ca^{2+}、Mg^{2+}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。PO_4^{3-}–P用钼酸铵分光光度法；NH_3–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　结果与分析

2.1　添加造纸白泥协同曝气过程中消化液pH值的变化

如图2所示，消化液的pH值都是随着曝气时间的延长不断升高，在开始的30 min内，pH值上升较

表2　造纸白泥的主要化学成分

Table 2　Major characteristics of the white mud

化学成分	SiO_2/%	Al_2O_3/%	Fe_2O_3/%	CaO/%	MgO/%	As/mg·kg^{-1}	Cd/mg·kg^{-1}	Pb/mg·kg^{-1}	Hg/mg·kg^{-1}	Mo/mg·kg^{-1}	Ni/mg·kg^{-1}
含量	3.38	1.40	1.20	51.00	2.75	1.71	<0.50	≈0	<0.05	<0.10	3.30~71.0

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

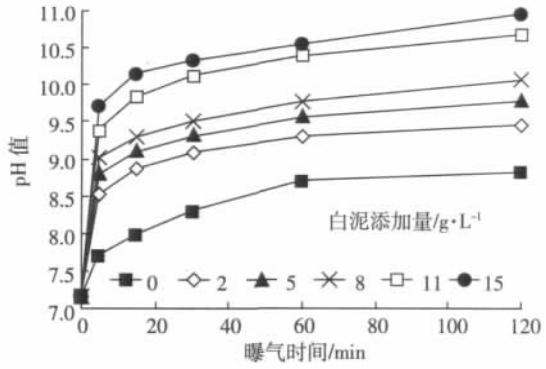

图 2 pH 值的变化

Figure 2 Variations of pH value

快，30 min 后趋于缓慢。添加造纸白泥协同曝气处理的消化液 pH 值明显比仅用曝气方式处理上升得快和高，而且 pH 值上升幅度都随着造纸白泥添加量的增加而增加。当白泥添加量为 11 g·L^{-1} 和 15 g·L^{-1} 时，pH 的上升幅度明显提高。不添加造纸白泥的消化液 pH 值提升到 8.5 以后，再继续提高 pH 值所需要的时间和动力比较多；添加造纸白泥后，pH 值在 30 min 即可以达到 9.0 以上，所用的时间也相对短，所耗的动力也相对少。

2.2 添加造纸白泥协同曝气过程中消化液 COD 的变化

从图 3 可看出，经过造纸白泥协同曝气方式处理后 COD 的去除率可达到 39%~45%，与只用曝气法处理（去除率为 38%）相比效果要好。当添加量为 8 g·L^{-1} 时效果最好，COD 的去除率达到 45%。

2.3 添加造纸白泥协同曝气过程中消化液 PO_4^{3-}–P、NH_3–N 含量的变化

从图 4 和图 5 可看出，添加造纸白泥可以明显提高 PO_4^{3-}–P 和 NH_3–N 的回收率，而且是随着添加量的增加而提高，最后回收率基本上趋于稳定。当白泥添加量为 8 g·L^{-1}，曝气时间为 120 min 时，PO_4^{3-}–P 和 NH_3–N 的回收率分别为 98%和 59%。如果只用曝气方式处理，120 min 后，PO_4^{3-}–P 和 NH_3–N 的回收率分别只有 66%和 41%。当添加量提高到 11 g·L^{-1} 和 15 g·L^{-1} 时，PO_4^{3-}–P 和 NH_3–N 的回收率并没有明显提高。

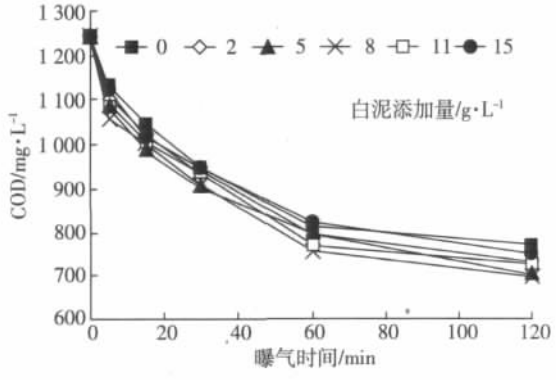

图 3 COD 的变化

Figure 3 Variations of COD

如图 6 和图 7 所示，白泥添加量为 8 g·L^{-1} 时，NH_3–N 和 PO_4^{3-}–P 的含量都是随着 pH 值升高而减少，pH 值的变化范围在 7~11 内，而且曝气 5 min，pH 即可达到 9.0 以上。NH_3–N 和 PO_4^{3-}–P 的回收率在开

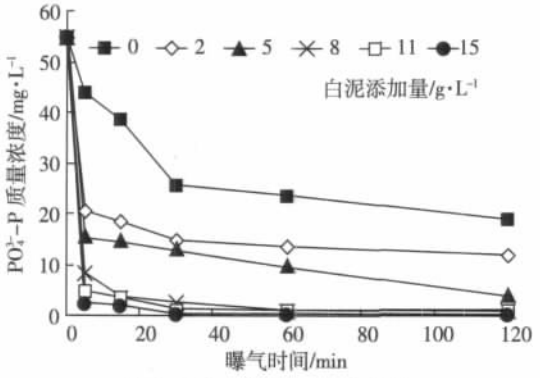

图 4 PO_4^{3-}–P 的质量浓度变化

Figure 4 Variations of PO_4^{3-}–P contents

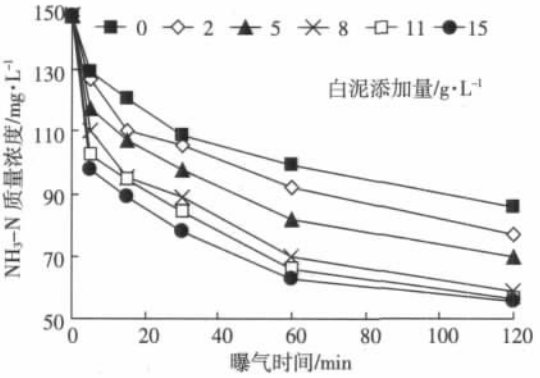

图 5 NH_3–N 的质量浓度变化

Figure 5 Variations of NH_4^+–N contents

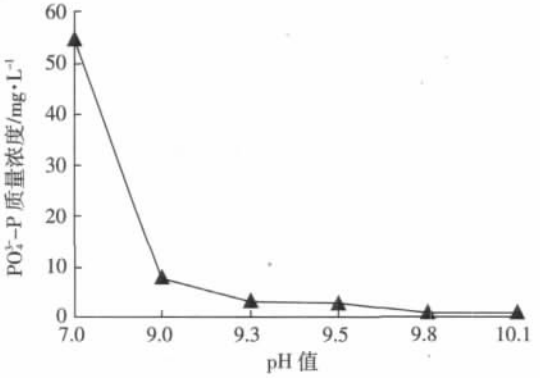

图 6 添加量为 8 g·L^{-1} 时不同 pH 值下 PO_4^{3-}–P 含量的变化

Figure 6 Variations of PO_4^{3-}–P at different pH values when the dosage is 8 g·L^{-1}

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

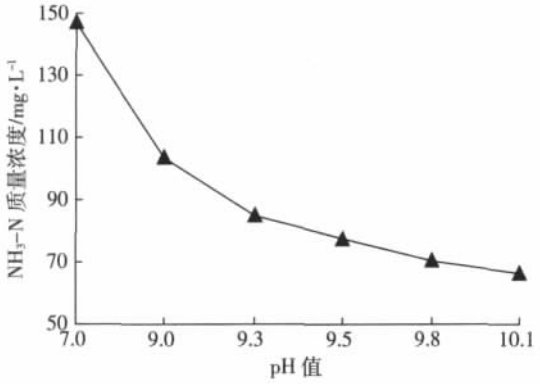

图 7 添加量为 8 g·L⁻¹ 时不同 pH 值下 NH_3–N 含量变化

Figure 7 Variations of NH_3–N at different pH values when the dosage is 8 g·L⁻¹

始 15 min 内有明显的下降,后趋于平缓。

2.4 添加造纸白泥协同曝气过程中消化液 Ca^{2+}和 Mg^{2+}含量的变化

如图 8 和图 9 可见,Ca^{2+}和 Mg^{2+}的存在会影响 MAP 沉淀的形成,具体表现为:Ca^{2+}和 Mg^{2+}的含量都随着造纸白泥添加量的增加和曝气时间的延长而不断减少。其中 Ca^{2+}的下降趋势有 3 个幅度,分别是添加量为 0 g·L⁻¹ 与 2 g·L⁻¹、5 g·L⁻¹ 与 8 g·L⁻¹ 以及 11 g·L⁻¹ 与 15 g·L⁻¹,反应 60 min 后都基本趋于平缓。而 Mg^{2+}因为形成 MAP 沉淀而减少,当白泥添加量为 11 g·L⁻¹ 与 15 g·L⁻¹ 时,Mg^{2+}的下降幅度明显大于其他处理。

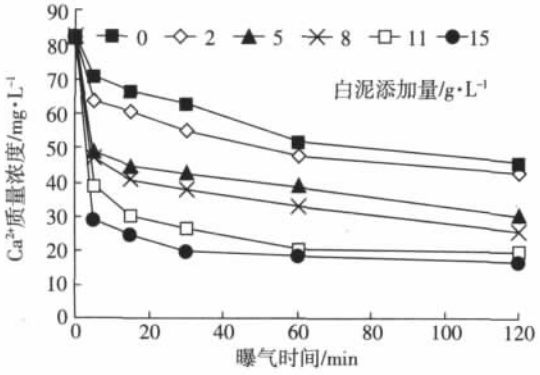

图 8 Ca^{2+}的质量浓度变化

Figure 8 Variations of Ca^{2+} contents

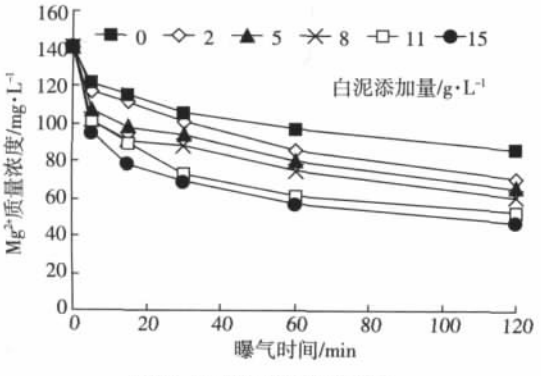

图 9 Mg^{2+}的质量浓度变化

Figure 9 Variations of Mg^{2+} contents

3 讨论

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 值过高,Mg^{2+}和 OH^-易结合生成 $Mg(OH)_2$ 沉淀,在强碱条件下(pH>11)还将产生更难溶于水的 $Mg_3(PO_4)_2$,pH>10,氨气部分溢出,pH>11 时,大部分 NH_4^+转化为氨气逸出,无法沉淀去除[8]。大量研究表明,MAP 沉淀去除和回收氨氮的最优 pH 值范围为 9.0~10.7[9],当 pH 值从 8.0 升至 10.0 时,HPO_4^{2-}、PO_4^{3-}在磷酸根的 4 种形态分布比例中增加至 99%以上,更有利于鸟粪石和磷酸钙沉淀的形成,使得对磷的去除率大幅度提高[10];但 pH 值大于 10.0 后,氨气已部分溢出。从图 2 可以看到白泥添加量为 11 g·L⁻¹ 和 15 g·L⁻¹ 时,pH 值在 15 min 已经达到 9.81 和 10.14,在 120 min 后几乎都上升到 11.0,此时大部分 NH_4^+转化为氨气逸出,不利于 NH_3–N 的回收,而且 pH 过高,Mg^{2+}也可以与 OH^-结合生成 $Mg(OH)_2$ 沉淀,所以添加量控制在 2~8 mg·L⁻¹,比较利于 MAP 沉淀法回收 NH_3–N 和 PO_4^{3-}–P。

猪场废水经过厌氧消化处理后 COD 为 1 244.44 mg·L⁻¹,还没有达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)的排放限值(COD≤400 mg·L⁻¹),需要进一步处理。如表 1 所示,该沼液的 BOD_5/COD 只有 0.12,而一般认为 BOD_5/COD 在 0.3 以上时才可以进行生化处理[11],可见该比例严重失调,因而猪场废水厌氧消化液不适宜生化处理。从图 3 可以看出,添加造纸白泥协同曝气 MAP 沉淀法在回收厌氧消化液中氮磷资源的同时,还可以去除一部分 COD,减轻了后续污水处理的有机负荷;而且,添加造纸白泥后 COD 的去除率比仅用曝气方式处理有所提高。但添加造纸白泥后溶液的 pH 值偏高,在后续处理时需要先调节 pH 值以适应微生物的生长。

从 MAP 的化学式 $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ 可以看出,理论上生成 MAP 各组分物质的量的比为 $n(Mg^{2+}):n(NH_3\text{–}N):n(PO_4^{3-}\text{–}P)=1:1:1$,根据化学反应平衡原理,增加任何一种反应物的量都会促进反应向正方向进行,如果提高 Mg^{2+}和 NH_3–N 的含量,则有利于 PO_4^{3-}–P 的去除和回收。Jaffer 等[12]通过提高 pH 值到

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

9.0 和增加镁剂量，使 97%磷作为 MAP 被结晶去除。彭剑峰等[13]采用磷酸铵镁(MAP)结晶法,研究序批式磷回收反应器(SPRR)从养猪废水厌氧消化液中回收营养元素的能力，结果发现在养猪废水中适量投加 Mg 盐能使 MAP 产量提高约 10.5%~11.6%。本实验所用的沼液 $n(Mg^{2+}):n(NH_3-N):n(PO_4^{3-}-P)=1:1:0.4$,过量的 Mg^{2+}或 NH_4^+都将促进反应向生成 MAP 的方向进行,从而降低残余磷浓度,提高磷的回收率。

从图 4 和图 5 可以看出，添加造纸白泥协同曝气处理与仅用曝气方式处理相比大大地提高了 NH_3-N 和 $PO_4^{3-}-P$ 的回收率,其原因主要有两个:一是消化液里已经含有一定量的 Mg^{2+}、NH_3-N 和 $PO_4^{3-}-P$,曝气使沼液的 pH 值提高到 8.5 后就会有大量 MAP 沉淀生成[14];二是造纸白泥有一定的碱度,而且含有少量的 Mg^{2+}和 Ca^{2+}，很大程度上加快了 MAP 沉淀的形成。

James 等[15]用化学平衡程序 MINTEQA2 来评价离子强度和化学形态对 MAP 形成的影响,结果表明,在 pH 值为 9.0 时 MAP 有最小溶解度,MAP 沉淀可以发生在 pH 值为 7~11 的范围内。由图 6 和图 7 可以推断,当添加量为 8 g·L^{-1} 时,该反应的 pH 范围比较有利于形成 MAP 产物。另外,如果造纸白泥添加量过多,造成 pH 值过高,会加快 NH_4^+转化为氨气溢出,Ca^{2+}更易于与 $PO_4^{3-}-P$ 结合生成磷酸钙沉淀,这都不利于 $PO_4^{3-}-P$ 和 NH_3-N 的 MAP 沉淀回收。

MAP 的形成也受 Ca^{2+}和 Mg^{2+}相对浓度的影响,当溶液体系形成磷酸钙时,MAP 的形成被抑制[16-19]。袁鹏等[8]采用 EDX 谱图对 Ca/Mg 的摩尔比改变前后的产品进行分析，随着 Ca^{2+}浓度的增加，沉淀产物中 Ca^{2+}含量逐渐增大,Mg^{2+}含量明显降低,并指出 Ca^{2+}的存在会提高磷的去除率，也会降低鸟粪石晶体的纯度,主要原因是 Ca^{2+}可以与 PO_4^{3-}形成磷酸钙沉淀从而影响 MAP 沉淀的形成。

陈瑶等[20]曾用磷酸盐沉淀法回收污水中的磷,指出随着溶液 pH 的升高,磷酸钙的溶解度越小,越易形成磷酸钙沉淀。从图 8 和图 9 可推断,当添加量为 11 g·L^{-1} 与 15 g·L^{-1} 时,pH 值明显高于其他处理,反应过程中 $PO_4^{3-}-P$ 更易于与 Ca^{2+}以磷酸钙的形式形成沉淀而被去除;Mg^{2+}的存在有利于形成 MAP 沉淀,但 pH 过高,Mg^{2+}和 OH^-易结合生成 $Mg(OH)_2$ 沉淀,当添加量为 11 g·L^{-1} 与 15 g·L^{-1} 时,pH 值明显高于其他处理,Mg^{2+}的下降幅度也明显大于其他处理，因为更多的 Mg^{2+}与 OH^-形成了 $Mg(OH)_2$ 沉淀。

4 结论

采用曝气方式处理猪场废水厌氧消化液，当 pH 值达到 8.5 后,如果还要继续提高 pH 值,则需要的时间和动力比较多，曝气 120 min 后,$PO_4^{3-}-P$ 和 NH_3-N 的回收率只有 66%和 41%,COD 的去除率为 38%,均未达到排放标准要求。

造纸白泥协同曝气处理厌氧消化液与仅用曝气方式处理相比,$PO_4^{3-}-P$ 和 NH_3-N 的回收效果十分明显。造纸白泥的添加量为 8 g·L^{-1} 时,曝气时间为 120 min,pH 值可以达到 10.07,$PO_4^{3-}-P$ 和 NH_3-N 的回收率分别为 98%和 59%,出水 $PO_4^{3-}-P$ 和 NH_3-N 浓度分别为 0.98 mg·L^{-1} 和 60.66 mg·L^{-1}，均达到了《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)的要求;同时,COD 的去除率也有 45%。其原因主要有两方面：一方面是造纸白泥含有 Al_2O_3、Fe_2O_3 及 MgO 等碱性物质,白泥的引入有助于调节 pH 值、缩短反应所需的水力停留时间；另一方面是白泥引入的 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Al^{3+}等离子可保证沼液中的 $PO_4^{3-}-P$ 和 NH_3-N 最大程度地形成沉淀而被去除。

造纸白泥添加量为 11 g·L^{-1} 和 15 g·L^{-1} 时,$PO_4^{3-}-P$ 和 NH_3-N 的回收率并没有提高多少，相反因添加量过多造成 pH 值过高，会加快 NH_4^+转化为氨气逸出；同时,Ca^{2+}易于与 $PO_4^{3-}-P$ 结合生成磷酸钙沉淀,Mg^{2+}易于与 OH^-结合生成 $Mg(OH)_2$ 沉淀,这些都不利于生产 MAP 沉淀,而且沉淀产物中剩余的白泥较多,不利于沉淀产物的回收利用。

参考文献：

[1] Matias B, Ariel A, Patrick G, et al. Developmentof environmentally superior treatment system to reeplace anaerobic swine lagoons in the USA[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98:3184-3194.

[2]中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2008.
China Agriculture Yearbook Editorial Board. China agriculture yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.

[3] C N Mulligan. An evaluation of the sustainability of the anaerobic digestion ofmanure [G]//Proceedings 10th World Congress A D, Montreal, Canada, 2004:11786-17891.

[4] 青 鹏, 李 清, 祝其丽, 等. 畜禽养殖废水厌氧消化和沼液好氧后处理关联特性研究[J]. 中国沼气, 2010, 28(4):15-17.
QING Peng, LI Qing, ZHU Qi-li, et al. Correlation characteristics between anaerobic digestion and aerobic post-treatment for treating wastewater on livestock farm[J]. *China Biogas*, 2010, 28(4):15-17.

[5] 袁 鹏, 宋永会, 袁 芳, 等. 磷酸铵镁结晶法去除和回收养猪废水中营养元素的实验研究[J].环境科学学报, 2007, 27(7):1127-1134.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

YUAN Peng, SONG Yong-hui, YUAN Fang, et al. Nutrient removal and recovery from swine wastewater by crystallization of magnesium ammonium phosphate[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27 (7) :1127-1134.

[6] 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[J]. **农业工程学报**, 2010, 26 (1) :313-318.
LI Liang, WANG De-han, ZOU Xuan, et al. Effect of aeration on crystallization technology for nitrogen and phosphorus recovery from biogas fermentative liquid[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26 (1) :313-318.

[7] 郭瑞霞, 易发成. 造纸白泥除磷特性研究[J]. **科学技术与工程**, 2008, 8 (22) :6162-6165.
GUO Rui-xia, YI Fa-cheng. Experimental study on phosphorus removal by white mud—wastes from paper mills[J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8 (22) :6162-6165.

[8] 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[J]. **水处理技术**, 2009, 35 (8) :5-8.
DONG Bin, DUAN Ni-na, HE Qun-biao, et al. Status and development of struvite crystallization for swing wastewater treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2009, 35 (8) :5-8.

[9] 邹安华, 孙体昌, 邢　奕, 等. pH 对 MAP 沉淀法去除废水中氨氮的影响[J]. **环境科学动态**, 2005 (4) :4-6.
ZOU An-hua, SUN Ti-chang, XING Yi, et al. Effect of pH to the removal of ammonium-nitrogen from wastewater by MAP[J]. *Environmental Science Trends*, 2005 (4) :4-6.

[10] Bhuiyan M I H, Mavinic D S, Beckie R D. Nucleation and growth kinetics of struvite in a fluidized bed reactor[J]. *J Cryst Growth*, 2008, 310 (6) :1187-1194.

[11] 郭文成, 吴群河. 用 BOD_5/COD_{Cr} 值评价污废水可生化性的可行性分析[J].**环境科学与技术**, 1998, 3 :39-41.
GUO Wen-cheng, WU Qun-he. Feasibility analysis of wastewater′s biodegradability by the ratio of BOD_5/COD_{Cr}[J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, 3 :39-41.

[12] Jaffer Y, Clark T A, Pearce P, et al. Potential phosphorus recovery by struvite formation[J]. *Water Res*, 2002, 36 :1834-1842.

[13] 彭剑峰, 宋永会, 袁　鹏, 等. SPRR 工艺回收养猪废水营养元素研究[J]. **农业环境科学学报**, 2007, 26 (6) :2173-2178.
PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, et al. Nutrients recovery by SPRR process from piggery wastewater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26 (6) :2173-2178.

[14] Stratful I, Scrimshaw M D, Lester J N. Conditions influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate[J]. *Wat Res*, 2001, 35 (17) :4191-4199.

[15] James D Doyle, Simon A Parsons. Struvite formation, control and recovery[J]. *Wat Res*, 2002, 36 :3925-3940.

[16] Aage H K, Anderson B L, Blom A, et al. The solubility of struvite[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 1997, 223 :213-215.

[17] Wild D, Kisliakova A, Siegrist H. P-fixation by Mg, Ca and zeolite A during stabilization of excess sludge from enhanced biological P removal[J]. *Water Sci Technol*, 1996, 30 :391-398.

[18] Momberg G A, Oellermann R A. The removal of phosphate by hydroxyapatite and struvite crystallisation in South Africa[J]. *Water Sci Technol*, 1992, 26 :987-996.

[19] Battistoni P, Fava G, Pavan P, et al. Phosphate removal in anaerobic liquors by struvite crystallisation without addition of chemicals :preliminary results[J]. *Water Res*, 1997, 31 :2925-2929.

[20] 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[J].**工业水处理**, 2006, 26 (7) :93-96.
CHEN Yao, LI Xiao-ming, ZENG Guang-ming, et al. Influencing factor of phosphate precipitation to the phosphorus recovery from wastewater and its application[J]. *Industrial Water Treatment*, 2006, 26 (7) :93-96.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net