

生态型一级强化絮凝预处理养猪废水的研究

王力, 陈冠仪, 郝林林, 邵维敏, 曾明, 王昶

引用本文:

王力, 陈冠仪, 郝林林, 邵维敏, 曾明, 王昶. 生态型一级强化絮凝预处理养猪废水的研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1575-1581.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1320>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蒙脱石矿物材料絮凝剂的制备、絮凝效果及机理研究

王昶, 胡文红, 张颖, 李丽, 曾明

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 780-787 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1492>

某规模化猪场废水中抗生素污染特征及生态风险评估

李盟军, 申健, 姚建武, 宁建凤, 王荣辉, 周凯军, 艾绍英

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 884-893 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1166>

不同化学生态型紫苏的镉耐性及镉富集能力研究

韩博伦, 肖清铁, 谢惠玲, 游武, 郑新宇, 林瑞余

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2106-2113 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0161>

养殖废水处理设施自动化智能化运营与管控

冯文谦, 史金才, 练植婵, 廖劲松, 廖新佛

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2355-2360 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1153>

不同植物组合人工湿地中磷去向特征研究

叶磊, 李希, 田日昌, 吴凤平, 孟岑, 夏梦华, 郭宁宁, 凡翔, 李裕元, 王辉

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2409-2419 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0761>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王力, 陈冠仪, 郝林林, 等. 生态型一级强化絮凝预处理养猪废水的研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1575–1581.

WANG L, CHEN G Y, HAO L L, et al. Pretreating swine wastewater using ecological primary enhanced flocculation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7): 1575–1581.



开放科学 OSID

生态型一级强化絮凝预处理养猪废水的研究

王力, 陈冠仪, 郝林林, 邵维敏, 曾明, 王昶*

(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘要:针对干湿分离集约化养猪废水污染物浓度高,生化处理难以达标排放的现状,使用生态型无生物毒性的蛭石无机矿物絮凝剂以及常规的阳离子助凝剂聚丙烯酰胺(C-PAM),以资源化为目的,进行一级强化絮凝预处理,降低后续生化处理的负荷,分别调查了蛭石絮凝剂以及蛭石絮凝剂与助凝剂C-PAM的协同效应,分析了一级强化絮凝预处理对浊度、化学需氧量(COD)、悬浮物(SS)、总磷和氨氮的去除率,以及对絮体的沉降速度和体积的影响。研究发现:蛭石絮凝剂对养猪废水具有很好的絮凝效果,在蛭石絮凝剂投加量为 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的情况下,废水的浊度和COD、SS、总磷、氨氮的浓度分别由原水的405 NTU和1 340、260、38.2、296.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,减少到73.4 NTU和611.7、60、2.5、284.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率分别为81.9%和54.4%、76.9%、93.3%、4.1%,大幅降低后续生化处理的负荷;蛭石絮凝剂 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和C-PAM $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 组合下,浊度和COD、SS、总磷、氨氮的浓度分别减少到19.2 NTU和454.5、34、5.5、267.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,二者协同作用下的总去除率分别高达95.3%和66.1%、86.9%、85.5%、9.9%,优于蛭石絮凝剂单独使用的效果,相对于单一使用 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 蛭石絮凝剂而言,去除率提高了24.6%和19.2%、26.9%、8.0%、6.2%,说明阳离子助凝剂C-PAM的投加有助于污染物的去除,两者具有很好的协同效应,不仅降低了蛭石絮凝剂用量,而且有效地降低了后续生化处理的负荷。上清液与絮凝沉积物的重金属分析结果表明,其均符合排放标准和农业用肥标准,沉积物可以作为堆肥的原料,实现资源化。与传统无机絮凝剂PAC絮凝效果相比,蛭石絮凝剂以及与C-PAM协同处理后的絮体的沉降速度更快,体积更小。因此,生态型一级强化絮凝预处理将会成为未来养猪废水无害化和资源化处理的重要途径之一。

关键词:养猪废水;生态型絮凝剂;蛭石絮凝剂;一级强化预处理

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)07-1575-07 doi:10.11654/jaes.2021-1320

Pretreating swine wastewater using ecological primary enhanced flocculation

WANG Li, CHEN Guanyi, HAO Linlin, SHAO Weimin, ZENG Ming, WANG Chang*

(College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Owing to the high concentration of pollutions in swine wastewater produced via dry-wet separation, the current volume of discharge is difficult to process with biochemical treatments. Therefore, primary enhanced flocculation pretreatments were conducted using both vermiculite as an ecological, non-toxic inorganic mineral flocculant and the conventional cationic coagulant C-PAM. This procedure aimed to reduce the load of subsequent biochemical treatments. The isolated effect of vermiculite flocculant alone and the synergistic effect of vermiculite flocculant combined with the coagulant C-PAM were investigated; changes in turbidity, COD, SS, ammonia nitrogen, total phosphorus, sedimentation velocity, and floc volume were analyzed after the flocculation pretreatment. Results showed that vermiculite had a good flocculation effect on swine wastewater. When the dosage of vermiculite flocculant alone was $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, the turbidity, COD, SS, total phosphorus and ammonia nitrogen of the swine wastewater were reduced from 405 NTU, 1 340 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 260 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 38.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and 296.4

收稿日期:2021-11-15 录用日期:2022-01-06

作者简介:王力(1997—),男,山西朔州人,硕士研究生,从事水污染控制技术研究。E-mail:1065216199@qq.com

*通信作者:王昶 E-mail:wangc88@163.com

基金项目:宁夏回族自治区科技厅资助项目(2019BBE02024)

Project supported: The Fund of Ningxia Science and Technology Department(2019BBE02024)

mg·L⁻¹ to 73.4 NTU, 611.7 mg·L⁻¹, 60 mg·L⁻¹, 2.5 mg·L⁻¹ and 284.4 mg·L⁻¹, respectively. Their removal efficiencies in wastewater reached 81.9%, 54.4%, 76.9%, 93.3%, and 4.1%, respectively, which greatly reduced the load for subsequent biochemical treatment. After primary pretreatment with 4 g·L⁻¹ of a vermiculite flocculant and 24 mg·L⁻¹ of C-PAM. Then the synergistic effect was studied, and turbidity, COD, SS, total phosphorus and ammonia nitrogen in the swine wastewater were 19.2 NTU, 454.5 mg·L⁻¹, 34 mg·L⁻¹, 5.5 mg·L⁻¹, and 267.1 mg·L⁻¹, respectively, with removal efficiencies of 95.3%, 66.1%, 86.9%, 85.5%, and 9.9%, respectively. These values were better than those of the vermiculite flocculant alone; compared with the latter, the removal rate via the synergetic treatment increased by 24.6%, 19.2%, 26.9%, 8.0%, and 6.2%. This indicated that the addition of C-PAM could help to remove pollutants and result in a good synergistic effect as it not only reduced the amount of vermiculite flocculant needed but also could be used as a raw material for composting with pig manure. Compared with the flocculation effect of traditional inorganic compounds, the load of the subsequent biochemical treatment was reduced effectively. The heavy metal concentration of the supernatant and flocculated sediment meet emissions and agricultural fertilizer standards. Additionally, the synergistic effect of vermiculite flocculant and C-PAM meant that the floc settling speed in the sediment flocculant PAC was faster and the volume was smaller. Therefore, ecological primary enhanced flocculation pretreatment will become an important method for the harmless and resourceful treatment of swine wastewater in the future.

Keywords: swine wastewater; ecological flocculant; vermiculite flocculant; primary enhanced pretreatment

中国是生猪出产第一大国,生猪产量占全球总产量的比例超过50%,近年来,随着环保要求越发严格,加之2018年非洲猪瘟疫情影响,我国生猪存栏量总体呈现下降趋势,市场的稳定供给受到影响,2019年加大了生猪饲养量,2020年生猪存栏量总体明显回升,达到了4.1亿头,而且还在不断发展。但是养猪废水仍然没有实现达标排放,环境污染的压力依然存在,不当排放将会导致地表水、地下水、农田生态系统以及空气环境的严重污染^[1-2]。养殖业污水污染物浓度高,达标排放处理技术难度大、成本高,以及处理设施维护不到位^[3],使得开发从无害化到资源化的生态型、低成本、易控制的集成技术尤为重要。目前规模较大的猪场废水处理主要采用还田模式、自然处理模式和工业化处理模式3种模式^[4],随着大型集约化养猪业的发展,工业化处理模式越来越重要,国内外的生化处理方法仍然是主流,其中资源化的UASB工艺既可以产生沼气,又可以降低后续生化处理负荷,但由于保温难度大、操作复杂、投资大等原因,难以推广应用^[5]。

如今干湿分离的养猪模式得到了广泛的推广应用,其大幅降低了原有养猪废水污染物的浓度,但由于尿液和冲猪圈后的废水仍然含有较多的有机污染物、氮和磷,若全部采用直接的生化方法处理达标排放,成本仍然很高,以至于养殖户难以实施。因此养猪废水可从源头通过絮凝等物理化学的方法去除废水中大部分的胶体、大分子有机污染物以及磷^[6],从而达到降低后续生化处理负荷,降低处理成本的目的,而且生态型絮凝后的沉积物还可以与猪粪一起作为堆肥的原料,变废为宝。目前所使用的预处理絮凝

剂主要是无机高分子聚合物——聚合氯化铝(PAC)或聚合氯化铁(PFS),这些絮凝剂具有生物毒性,因此絮凝沉降的大量沉积物难以资源化利用^[7];并且有研究表明PAC对活性污泥微生物有生物毒性,随着PAC在系统中的积累,系统内生物毒性增强^[8],对后续生化处理造成影响,所以传统的PAC和PFS絮凝剂未能得到推广应用。本研究团队开发了国内首创的无机矿物絮凝剂,其无生物毒性,且具有较好的絮凝效果,同时开展了絮凝剂的特性研究和应用性研究,为无机矿物絮凝剂的应用开辟了一个新的领域。

针对干湿分离集约化养猪废水污染物浓度高、生化处理难以达标排放的现状,使用生态型无生物毒性的蛭石无机矿物絮凝剂以及常规的阳离子聚丙烯酰胺(C-PAM),以资源化为目的,进行一级强化絮凝预处理,降低后续生化处理的负荷,分别调查蛭石絮凝剂以及蛭石絮凝剂与助凝剂C-PAM组合对养猪废水预处理的协同效应,上清液的浊度、化学需氧量(COD)、悬浮物(SS)、总磷和氨氮的去除率,絮体的沉降性能以及上清液和沉积物重金属分布情况,初步探讨了絮凝的机理,为今后实际应用以及后续生化预处理提供有价值的基础数据。

1 材料与方 法

1.1 实验原料、仪器及试剂

实验用的养猪废水取自天津市宁河区惠康种猪育种有限公司,该猪场属于干湿分离养猪场,养猪废水外观浑浊,浊度为405 NTU,电导率、盐度(Sal)和pH分别为4.03 mS·cm⁻¹、2.1 mg·L⁻¹和7.43,水质指标COD、生化需氧量(BOD)、SS、总磷和氨氮浓度分别为

1 340、650、260、38.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和296.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

实验用无机矿物蛭石制备絮凝剂的具体方法及其表征可参考文献[9-10]。无机矿物蛭石经粉碎,通过200目筛,获得直径小于74 μm 的粉体,然后进行酸改性,最后置于烘箱中105 $^{\circ}\text{C}$ 干燥12 h,直到恒质量,最后将烘干的固态絮凝剂置于粉碎机中研磨成粉末,从而制得粉末状絮凝剂。

本研究所用的主要化学药品:C-PAM(AR)、硫酸银(AR)、钼酸铵(AR)来自天津市光复精细化工研究所;硫酸汞(AR)、抗坏血酸(AR)、过硫酸钾(AR)来自MACKLIN公司;硫酸(GR)来自天津风船化学试剂科技有限公司。实验使用的主要仪器:六连同步混凝搅拌机JJ-4(金坛市城西瑞昌实验仪器厂)、便携式浊度仪(德国WTW公司)、激光粒度及Zeta电位分析仪(英国马尔文仪器有限公司)、原子吸收分光光度计(北京东西分析仪器有限公司)等。

1.2 实验方法

将250 mL养猪废水置于烧杯中,按照絮凝操作原理,快速搅拌(300 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)后,投加一定量的蛭石絮凝剂,继续搅拌2 min,然后调整转速(50 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)搅拌1 min,最后静置5 min。取液面下2 cm处的水样,按照《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)中各项水质指标的检测方法,使用相应的分析仪器,测定上清液的浊度和相关水质指标(COD、总磷、氨氮以及SS)。事先配制质量浓度为0.1%的阳离子助凝剂溶液(C-PAM),在蛭石絮凝剂快速搅拌即将结束时投加,然后减速至50 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,连续搅拌2 min后,静置5 min,取样分析同上。为了研究沉降速度,在絮凝搅拌结束后,迅速倒入250 mL的量筒,记录不同时间下沉积物的沉降高度。

2 结果与讨论

2.1 蛭石絮凝剂投加量对养猪废水中污染物去除效果的影响

不同蛭石絮凝剂投加量对养猪废水中污染物的去除效果见图1。由图1a可知,随着蛭石絮凝剂投加量的增加,浊度快速下降,然后缓慢减少,投加量为8 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,达到最低,为73.4 NTU,而后又有所增加。投加量超过8 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,Zeta电位由增加转变为减少,说明电中和平衡后,再投加过多的絮凝剂,本身絮凝剂中的微小粒子不仅会增加上清液的浊度,而且还会在盐度较高的体系里影响Zeta电位。这也说明蛭石絮凝剂并不是投加越多越好,而是存在最佳的投加

量。由图1b可知,上清液中的SS表现出与浊度同样的变化趋势,即随着蛭石投加量的增加SS浓度逐步降低,在蛭石投加量为8 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,达到最低,从原水的260.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到60.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,然后增加,与浊度增加相同,应该是投加量过度所致。上清液的COD随着蛭石投加量的增加,开始降低很快,然后逐步缓慢降低。由图1c可知,总磷和氨氮都随着蛭石投加量的增加而减少,相比之下,总磷减少显著,而氨氮减少甚微,这是由于蛭石絮凝剂经酸改性后,含有质量分

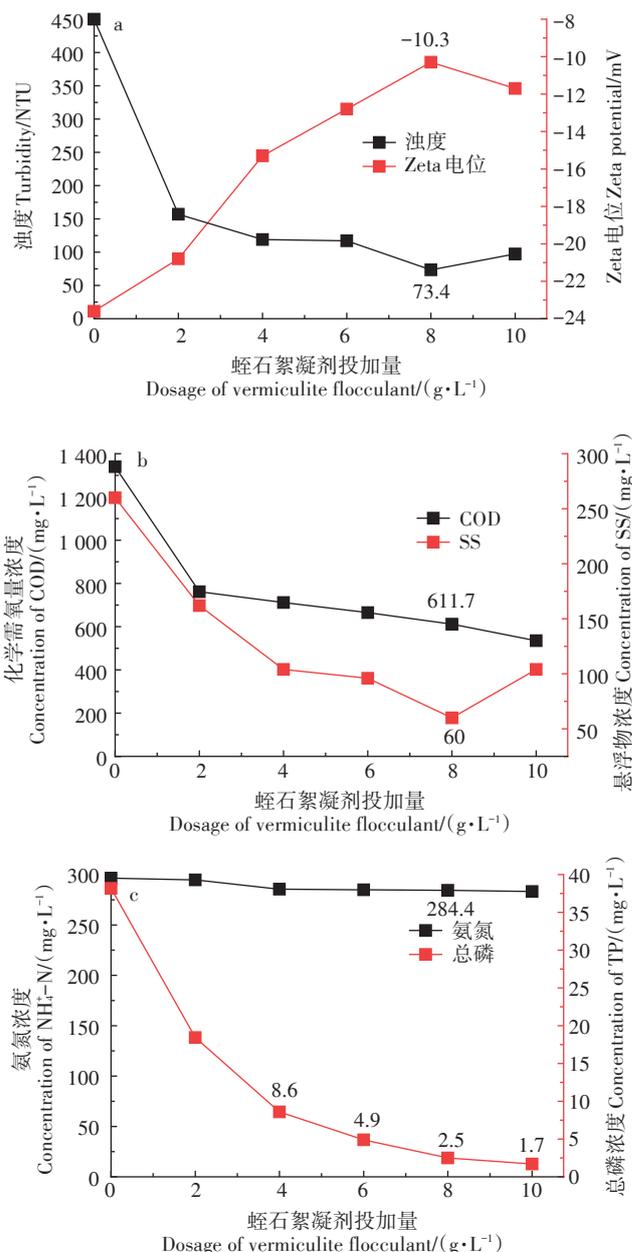


图1 不同蛭石絮凝剂投加量对养猪废水中污染物去除效果
Figure 1 Effects of different vermiculite flocculant dosages on the removal of pollutants in swine wastewater

数约为30%的可溶物,形成的Fe、Al、Ca等金属离子易与磷的化合物结合,形成难溶盐类等物质,而氨氮很难与酸改性的硫酸根离子形成难溶盐类等物质,这也是絮凝处理过程对氨氮去除效果较差的原因,也是絮凝剂的普遍规律。

由图1可知,蛭石絮凝剂最佳的投加量为 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,此时上清液的浊度和COD、氨氮、总磷、SS分别由原水的405 NTU和1 340、260、38.2、296.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降低到73.4 NTU和611.7、60、2.5、284.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率分别为81.9%和54.4%、76.9%、93.3%、4.0%。上清液的SS和总磷均已达标,COD也接近排放标准,去除的SS和COD相对来说都是难以降解的颗粒物、胶体以及大分子有机污染物,其去除有效地降低了后续生化处理的负荷。

2.2 蛭石絮凝剂和阳离子助凝剂C-PAM组合对养猪废水中污染物去除效果的影响

絮凝剂投加量为 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,上清液中的磷含量为 $8.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,接近排放标准($8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),其他水质指标也都能够快速下降到期望值,即使投加量再增加,各指标的变化也变得缓慢,所以,在此基础上借助于助凝剂C-PAM,对蛭石絮凝剂产生的絮体颗粒进行二次团聚,发挥团聚过程的吸附、网捕、卷扫等作用,尤其是相似相溶原理,提高对污染物的去除效率。

图2是蛭石絮凝剂为 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时不同C-PAM投加量对养猪废水中污染物去除效果。由图2a可知,随着C-PAM投加量的增加,上清液的浊度从只有蛭石絮凝剂絮凝后的119 NTU急剧下降,然后逐步平缓,当C-PAM投加量为 $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,上清液的浊度达到19.2 NTU,说明上清液中的胶体和大分子污染物得到了有效去除。从上清液的Zeta电位变化看到,C-PAM投加后,由于二次团聚,上清液中的大分子污染物以及颗粒物,尤其是胶体得到了有效去除。当C-PAM继续增加,上清液的浊度反而上升,说明多余而没有参与二次团聚的C-PAM溶解在上清液里,导致浊度增加,同时Zeta电位也继续增加。由图2b可知,上清液的COD和SS随C-PAM投加量的增加而减少,当C-PAM投加量为 $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,COD和SS分别降至 $454.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $34\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随C-PAM继续增加,SS仍然降低,但COD反而增加,可能是溶解态的C-PAM导致了COD的增加。这也说明C-PAM的投加量并不是越多越好,而是存在最佳的投加量。由图2c可知,随C-PAM投加量的增加上清液的总磷和氨氮也都有所下降,总磷下降相对明显,而氨氮下降极为有

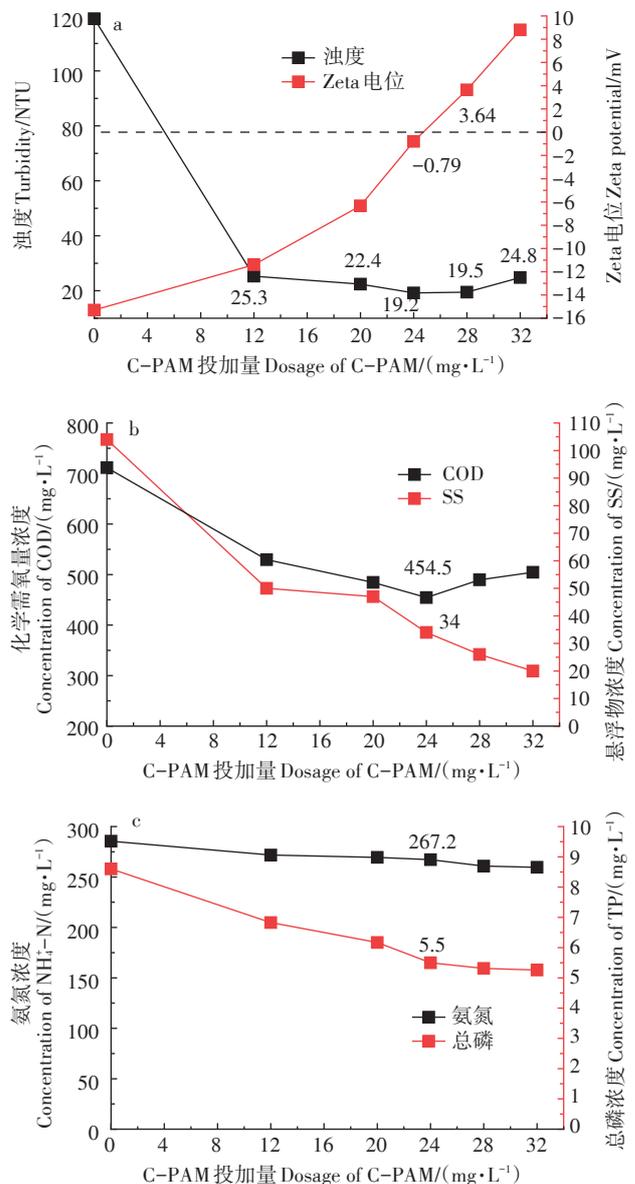


图2 蛭石絮凝剂为 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时不同助凝剂C-PAM投加量对养猪废水中污染物去除效果

Figure 2 Removal effects of different dosages of coagulant aid C-PAM on pollutants in swine wastewater when vermiculite flocculant is $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$

限,当C-PAM投加量为 $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,总磷下降到 $5.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明在蛭石絮凝剂金属离子和阳离子助凝剂C-PAM的作用下,废水中的磷得到了很好的去除,但阳离子氨氮难以与改性硫酸根离子结合成难溶的盐,所以絮凝过程对氨氮的去除率低,这既是絮凝工艺普遍存在的问题,也是今后进一步研究的一个重要课题。

在蛭石絮凝剂的基础上,协同阳离子絮凝剂C-

PAM对养猪废水进行一级强化絮凝处理,上清液的浊度和COD、SS、总磷、氨氮浓度在C-PAM最佳投加量为 $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时分别可以达到 19.2 NTU 和 454.5 、 34 、 5.5 、 $267.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总去除率分别达到 95.3% 、 66.1% 、 86.9% 、 85.5% 、 9.9% ,与只使用 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的蛭石絮凝剂的效果相比,分别提高了 24.6% 和 19.2% 、 26.9% 、 8.0% 、 6.2% ,说明阳离子助凝剂C-PAM的投加有助于污染物的进一步去除,具有很好的协同效应。如果与只使用 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 蛭石絮凝剂的效果相比,除总磷指标($5.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)高于单独使用($2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)之外,其他指标都更好,其中单独使用蛭石絮凝剂时COD为 $611.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,协同情况下为 $454.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明少量投加阳离子助凝剂C-PAM,不仅可以获得较好的去除率,而且可以大幅减少蛭石絮凝剂的投加量,使投加量从 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 减少到 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,显示出很好的协同效应。

图3是蛭石絮凝剂为 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,C-PAM不同投加量下絮凝效果的对比。由图3可知,随着C-PAM不

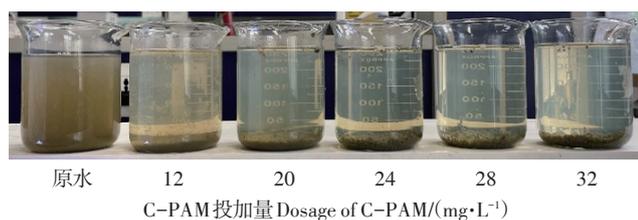


图3 蛭石絮凝剂为 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时助凝剂C-PAM不同投加量对养猪废水的絮凝效果

Figure 3 Flocculation effect of different dosages of coagulant aid C-PAM on pollutants in swine wastewater when vermiculite flocculant is $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$

断增加,上清液浊度越来越小,烧杯上的刻度越来越清晰,投加量超过 $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,上清液反而变得浑浊,这也证明了图2分析数据的变化规律。浊度由原水的 405 NTU 降低到 19.2 NTU ,废水由原来浑浊状态变得较为清澈,污染物转变为沉积物,很好地降低了后续生化处理的负荷。

对蛭石絮凝剂投加 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的情况进行调查发现,助凝剂C-PAM投加量增加到 $28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,上清液的浊度和COD、SS、总磷、氨氮浓度分别为 45.6 NTU 和 554.5 、 34 、 17.7 、 $267.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同样有较好的去除效果,但总磷含量远大于排放标准($8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),后续生化处理达标难度较大。进一步实验可知,蛭石投加量增加到 $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,C-PAM投加量的可调性更好,但蛭石使用量以及处理效果决定了预处理的成本,综合考虑的结果表明,蛭石絮凝剂 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和C-PAM $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的投加量下的经济性和性价比较好。

2.3 蛭石絮凝剂与C-PAM协同作用下上清液和沉积物中重金属分析

表1和表2分别为蛭石絮凝剂 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 与C-PAM $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 絮凝后上清液和沉积物中的重金属含量与国标对比。由表1可知,上清液中的重金属除了Fe和Mg外,As、Cd、Pd、Cr、Ni和Hg均未能检测出,而Mg和Fe在标准中并没有要求,说明该上清液的二次使用不会对环境造成重金属污染。由表2可知,沉积物没有检测到重金属As和Hg,但含有重金属Cd、Pd和Cr,其浓度分别为 0.177 、 $12.91\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $11.72\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远低于《有机肥料》(NY/T 525—2021),说明无生物毒性的蛭石絮凝剂与C-PAM协同作用下不仅有效

表1 蛭石絮凝剂 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和C-PAM $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 絮凝后上清液的重金属含量($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 1 Heavy metals content in supernatant after flocculation with vermiculite flocculant $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and C-PAM $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

项目 Item	As	Cd	Pd	Cr	Ni	Hg	Mg	Fe
上清液 ^a	—	—	—	—	—	—	0.25	0.19
标准 ^b	0.1	0.005	0.05	1.5	1.0	0.001	n.s.	n.s.

注:a为3个独立实验的平均值;b为《污水综合排放标准》(DB 12/356—2018)。

Note:a indicates average value of three independent experiments;b indicates the *Integrated Wastewater Discharge Standard*(DB 12/356—2018).

表2 蛭石絮凝剂 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和C-PAM $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 絮凝后沉积物的重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 Heavy metals content in sediment after flocculation with vermiculite flocculant $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and C-PAM $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

项目 Item	As	Cd	Pd	Cr	Hg
沉积物 ^a	—	0.177	12.91	11.72	—
标准 ^b	15	3	50	150	2

注:a表示3个独立实验的平均值;b表示《有机肥料》(NY/T 525—2021)限量指标。

Note:a indicates average value of three independent experiments;b indicates organic fertilizer limit index in China(NY/T 525—2021).

降低后续生化处理的负荷,而且沉积物还可以二次利用,作为堆肥的原料,实现资源化。

2.4 蛭石絮凝剂的絮凝效果与传统絮凝剂PAC的对比

图4是PAC与蛭石絮凝剂和C-PAM不同投加量下絮凝沉降速度和絮体体积对比。在六联絮凝搅拌装置上,按照絮凝实验设定的操作条件进行,试验结束后,再统一以 $75\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 搅拌6 s,然后将各样品分别倒入预先准备好的250 mL量筒中,开始计时,并在预设定的时间下分别拍照。由图4可知,蛭石絮凝剂与蛭石絮凝剂和阳离子助凝剂C-PAM协同相比,协同作用下的絮凝速度和沉降速度更快,这说明二次团聚的絮体更大,有利于沉降,且沉降后沉积物的体积较少,可以获得更多的上清液,有利于固液分离。这主要是因为无机矿物絮凝剂的颗粒物质量大、比重大,特别是在C-PAM的协同作用下,更易于絮凝和沉降。蛭石絮凝剂与传统的PAC相比,絮凝沉降速度远快于传统PAC,1 min时沉降就基本结束,而PAC此时才沉降一半,即使沉降稳定后,PAC的沉积物体积仍然远大于蛭石絮凝剂,这是因为PAC强化水解产生的大量絮体比重轻,十分松散,这也是PAC絮凝工艺与气浮工艺结合的原因。众所周知,传统的PAC具有生物毒性,大量使用后沉积物难以作为堆肥的原

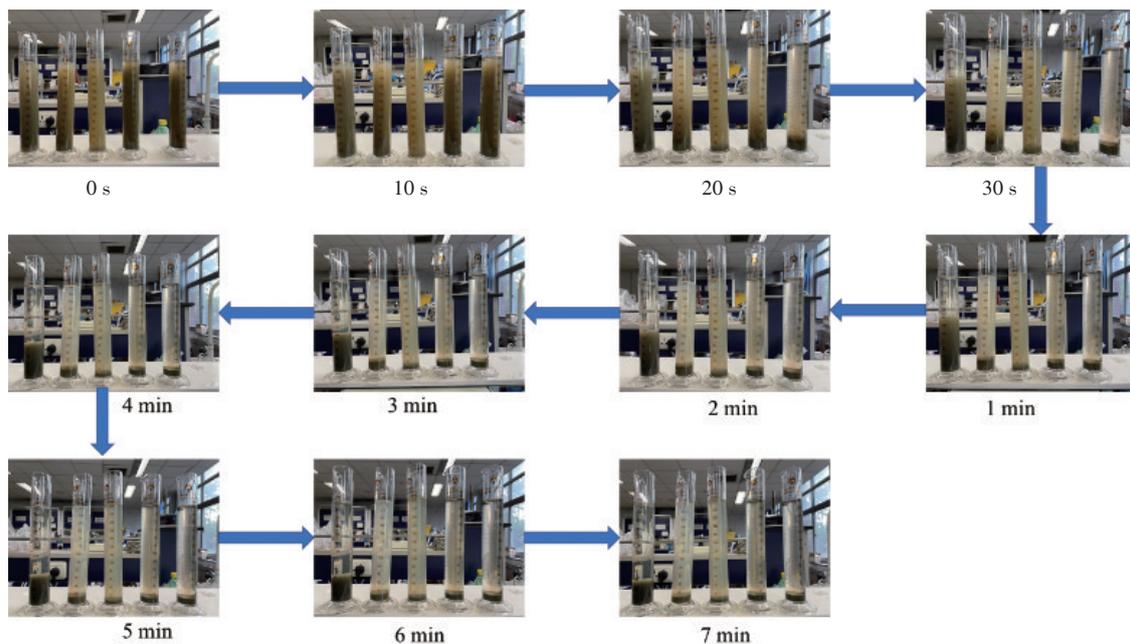
料,这也是养猪废水不使用PAC和PFS进行一级强化预处理的重要原因之一。相比之下,蛭石絮凝剂等无机矿物絮凝剂,经过具有检测资质单位进行的生物毒性检测,得到了实验论证(CMA:171000340362,报告No.6g-20 NYQT-WT296),属于无生物毒性的絮凝剂。分离后的上清液和沉积物都可根据需求进行二次利用,属于生态型的处理模式,有利于碳排放和碳中和的需求。

3 结论

(1)在蛭石絮凝剂最佳投加量为 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的情况下,废水中的浊度、COD、SS、总磷和氨氮的去除率分别为81.9%、54.4%、76.9%、93.3%和4.1%,大幅降低了后续生化处理的负荷。

(2)当蛭石絮凝剂 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和C-PAM $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,废水中的浊度、COD、SS、总磷和氨氮总去除率分别高达95.3%、66.1%、86.9%、85.5%和9.9%,优于 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 蛭石絮凝剂单独使用的效果,充分显现出助凝剂C-PAM的协同效应。

(3)协同效应具有较好的沉降性能,上清液和沉积物的重金属含量都远低于标准限值,沉积物可作为堆肥资源加以有效利用。



由左向右分别表示PAC $2.40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、蛭石絮凝剂 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、蛭石絮凝剂 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和C-PAM $28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、蛭石絮凝剂 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和C-PAM $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、蛭石絮凝剂 $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和C-PAM $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

图4 PAC与蛭石絮凝剂和C-PAM不同投加量下絮凝沉降速度和絮体体积对比

Figure 4 Comparison of settling velocity and floc volume in the flocculation process with different dosages of PAC and vermiculite flocculant, C-PAM

参考文献:

- [1] 陈永兴, 睦光华. 养猪废水处理技术研究进展[J]. 广东化工, 2016, 43(21): 126-127. CHEN Y X, SUI G H. Research progress on the processing technology of piggery wastewater[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2016, 43(21): 126-127.
- [2] 李耀宇. 猪场粪污厌氧发酵过程解析及沼液处理工艺研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2019. LI Y Y. Process analysis of anaerobic fermentation of swine manure and study of treatment process for its fermented liquid[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2019.
- [3] 何立红. 畜禽养殖废水处理技术应用及研究进展[J]. 节能与环保, 2021(6): 84-85. HE L H. Application and research progress of wastewater treatment technology for livestock and poultry breeding[J]. *Energy Conservation & Environmental Protection*, 2021(6): 84-85.
- [4] 贺晓晨. 规模化畜禽养殖废水处理技术探究[J]. 环境与发展, 2019, 31(9): 93. HE X S. Exploring large-scale livestock and poultry breeding wastewater treatment technology[J]. *Environment and Development*, 2019, 31(9): 93.
- [5] 张广伟, 王小红, 武荣芳. 浅析养殖废水中的UASB工艺[J]. 科技视界, 2015(33): 253. ZHANG G W, WANG X H, WU R F. Analysis on the UASB process in aquaculture wastewater[J]. *Science & Technology Vision*, 2015(33): 253.
- [6] 陆健刚. 絮凝沉淀预处理养猪废水影响因素研究[J]. 当代化工, 2020, 49(9): 1867-1870. LU J G. Study on the factors affecting pre-treatment efficiency of piggery wastewater by flocculation sedimentation[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 49(9): 1867-1870.
- [7] 王昶, 王耀琛, 马一鸣, 等. 酸改性蛭石连续化絮凝装置的设计与研究[J]. 天津科技大学学报, 2020, 35(3): 52-56. WANG C, WANG Y C, MA Y M, et al. Design and research of continuous flocculation device for acid modified vermiculite[J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2020, 35(3): 52-56.
- [8] 万俐, 席英伟, 王鸿斌. PAC对SBR系统中传质-反应过程的影响研究[J]. 四川环境, 2021, 40(4): 6-10. WAN L, XI Y W, WANG H B. Research on the influence of PAC on the mass transfer-reaction process in SBR system[J]. *Sichuan Environment*, 2021, 40(4): 6-10.
- [9] 王昶, 林鹏, 豆宝娟, 等. 黏土矿物为原料絮凝剂的制备及应用研究[J]. 天津科技大学学报, 2015, 30(1): 62-66. WANG C, LIN P, DOU B J, et al. Preparation and characteristics of flocculant with clay minerals as raw materials[J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2015, 30(1): 62-66.
- [10] 于金鹤. 改性蛭石絮凝剂在养殖废水处理中的应用[D]. 天津:天津科技大学, 2017. YU J H. Application of modified vermiculite flocculation in swine wastewater treatment[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2017.

(责任编辑:叶飞)