

论述与研究

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.001

农村生活污水强化膜混凝性能及其污泥资源化潜力

魏尚珩¹, 徐恒^{1,2}, 常风民², 胡明³, 李懿南¹, 王培京³,
王凯军²

(1. 中国矿业大学<北京> 化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学环境学院
环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 3. 北京市水科学技术研究院,
北京 100048)

摘要: 农村生活污水和污泥的就地处理与资源化利用近年来受到广泛关注,与生物法相比,强化膜混凝技术能快速捕获污水中的碳、磷资源,目前已在北京农村地区的生活污水处理中得到示范应用。为此,分析了强化膜混凝技术的示范应用效果,并以其产生的污泥为研究对象,考察了污泥中碳、磷的回收性能。结果表明,强化膜混凝一体化示范设备能在水力停留时间为60 min的条件下实现80%以上COD和TP的去除,并产生富含碳、磷且具有较好资源化潜力的污泥。酸碱预处理能有效强化污泥水解,尤其是碱性条件能促进污泥中有机物和磷酸盐的同步释放,最高浓度分别达到5 214.5 mg/L和122 mg/L。酸化发酵是实现有机物进一步转化利用的重要途径之一,当污泥初始pH调为11时,酸化发酵效果最优,酸化产物产量达到3 419.6 mg/L(以COD计),酸化率高达77.0%。“强化膜混凝+污泥酸碱预处理+酸化发酵”有望促进农村生活污水中碳、磷资源的回收,但其后续利用方式和潜在风险需作进一步研究。

关键词: 农村生活污水; 强化膜混凝; 污泥; 碳、磷回收; 酸碱预处理; 酸化发酵
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0001-07

Performance of Enhanced Membrane Coagulation for Rural Domestic Sewage Treatment and Its Sludge Resource Utilization Potential

WEI Shang-hui¹, XU Heng^{1,2}, CHANG Feng-min², HU Ming³, LI Yi-nan¹,
WANG Pei-jing³, WANG Kai-jun²

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining & Technology <Beijing>, Beijing 100083, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Beijing Water Science & Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: In recent years, the local treatment of rural domestic sewage and its sludge utilization has been widely concerned. Compared with biological processes, the enhanced membrane coagulation technology can rapidly capture carbon and phosphorus resources in sewage, and has been demonstrated in

基金项目: 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室开放基金资助项目(20K05ESPCT); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07102004-001); 国家自然科学基金资助项目(51908547)

通信作者: 徐恒 E-mail: xuheng@cumtb.edu.cn

domestic sewage treatment in rural areas of Beijing. Therefore, performance of the demonstration project based on enhanced membrane coagulation technology was analyzed, and the recovery of carbon and phosphorus from the membrane coagulation sludge was investigated. The enhanced membrane coagulation integrated device removed more than 80% of COD and TP when the hydraulic retention time was 60 min, and produced sludge rich in carbon and phosphorus with good resource utilization potential. Acid/base pretreatment effectively enhanced the hydrolysis of sludge, promoted the simultaneous release of organic matter and phosphate from the sludge (especially in alkaline condition), and their highest concentrations were 5 214.5 mg/L and 122 mg/L, respectively. Acidified fermentation is one of the important ways to realize further conversion and utilization of organic matter. When the initial pH of the sludge was adjusted to 11, the best acidification fermentation performance was obtained: the acidification product yield reached 3 419.6 mg/L, and the acidification rate was up to 77.0%. The combined technology of enhanced membrane coagulation, acid/base pretreatment of sludge and acidified fermentation is expected to promote the recovery of carbon and phosphorus resources from rural domestic sewage. However, the subsequent utilization method and potential risks need to be further investigated.

Key words: rural domestic sewage; enhanced membrane coagulation; sludge; carbon and phosphorus recovery; acid/base pretreatment; acidified fermentation

强化膜混凝技术采用混凝/吸附-膜过滤复合过程分离去除污水中的碳、氮、磷污染物,对污水的水量、水质和环境温度等条件具有良好的适应性,能保证稳定的出水水质;在同等COD去除效果条件下,只需要常规生物法10%左右的水力停留时间(HRT),极大地减少了设备尺寸和占地面积^[1-2]。依托该技术,目前京津冀地区已经建立多处农村生活污水处理示范工程。然而,如何实现膜混凝污泥的快速稳定化、碳和磷资源回收以及终端资源化处置是制约该技术进一步发展的关键问题之一。相关研究^[3-5]表明,若采用厌氧消化技术对其进行稳定化和资源化,微生物很难接触和降解包裹在混凝絮体中的有机物,有机物降解转化率较低,磷酸盐也很难与铝离子分离,磷酸盐释放率通常不到10%。因此,有必要寻求一种有效技术手段强化膜混凝污泥中有机物和磷酸盐的溶出释放,便于通过厌氧消化实现污泥稳定化和无害化,同时为后续污泥资源化利用提供条件。

酸碱预处理,即调节污泥pH,是加速污泥水解最广泛的预处理方法之一。Lin等^[5]对铝盐混凝强化处理形成的初沉污泥进行pH调节,有效破坏了污泥絮体中的HO—Al—P骨架,使污泥释放出大量的有机物和磷酸盐,促进了污泥水解和后续挥发性脂肪酸(VFAs)的生成。Yan等^[6]对含有铝盐混凝剂

的剩余污泥进行碱处理(pH=8~11),同步实现了VFAs的生成和磷酸盐的释放。从污泥中释放出的VFAs可进一步作为污水脱氮碳源或生物塑料合成原料^[7-8];磷酸盐则可通过形成蓝铁矿、鸟粪石等得以回收^[9-12]。目前尚未见针对膜混凝污泥强化水解酸化的相关报道。鉴于此,笔者以强化膜混凝示范工程为研究对象,考察其运行性能,尤其是其产生的膜混凝污泥性质;在此基础上,研究酸碱预处理条件下膜混凝污泥中有机物、磷酸盐的溶出和变化规律,并评价其就地就近资源化利用潜力。

1 材料与方法

1.1 强化膜混凝示范工程简介

该示范工程位于北京市通州区某村,采用强化膜混凝—人工湿地处理工艺,设计规模为200 m³/d,设计出水水质满足北京市地方标准《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 11/1612—2019)的二级A标准。研究期间,示范工程进水COD、TP和NH₄⁺-N分别为(235.9±105.9)、(3.9±0.5)、(35.5±6.1) mg/L。强化膜混凝设备占地15 m²,采用浸没式超滤膜组件,膜材质为PVDF,膜孔径为0.02 μm。设备运行过程包括过滤产水、停歇及脉冲曝气等步骤,每个周期持续11 min,其中,产水阶段时长9 min,恒定出水流量约为10.5 m³/h。每个运行周期内设置脉冲曝气的目的在于制造水力条

件,在膜表面形成侧流剪切力,从而缓解膜表面的污染物累积。大约每4 d通过排放膜混凝污泥和汽水反冲方式缓解膜污染,大约每3个月采用次氯酸钠溶液(1 000~3 000 mg/L)对膜组件进行浸泡清洗。膜池内混凝剂(聚合氯化铝)投加量为20~50 mg/L,吸附剂(粉末活性炭,木质/煤质混合,平均粒径为26.5 μm ,碘值>800 mg/g)投加量为0~20 mg/L,HRT为60 min。

1.2 膜混凝污泥强化水解酸化实验

本实验反应器为7个恒温厌氧发酵罐(35 $^{\circ}\text{C}$),编号为R1~R7,有效容积为2 L,其中R3为对照组(实验期间不调节pH)。实验过程分为强化水解阶段和酸化发酵阶段。强化水解阶段:在纯氮气吹脱条件下向所有发酵罐内装入2 L膜混凝污泥,采用4 mol/L盐酸将R1和R2中污泥初始pH分别调为2和4,采用4 mol/L NaOH溶液将R4~R7中污泥初始pH分别调为9、10、11和12;反应0.5 h后,取样测定污泥的SCOD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度。酸化发酵阶段:强化水解阶段结束后,即进入酸化发酵阶段,利用膜混凝污泥中原有微生物对水解生成的有机物进行酸化发酵,每天检测反应器中污泥的pH、SCOD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、乙醇、有机酸(乙酸、丙酸、丁酸、戊酸和乳酸等)的变化情况,实验结束后,测定反应器中气体组分以及污泥的总固体(TS)和挥发性固体(VS)含量。

1.3 分析项目与方法

pH:在线pH测定仪;COD、总氮、氨氮、总磷、磷酸盐、TS和VS:国家标准方法。

乙醇:采用气相色谱仪(Shimadzu GC-2010)测定,配有FID检测器和DB-FFAP熔融石英毛细管柱(30 m \times 0.25 mm \times 0.5 μm)。柱升温过程为70 $^{\circ}\text{C}$ 持续3 min,然后以10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至180 $^{\circ}\text{C}$,并保持4.5 min。进样口和检测器的温度分别为250 $^{\circ}\text{C}$ 和300 $^{\circ}\text{C}$ 。载气为氮气,通量为1.2 mL/min,进样量为1 μL ,分流比为10:1。

H_2 、 CH_4 、 N_2 和 CO_2 :采用气相色谱仪(Shimadzu GC-2014)测定,配有不锈钢填充柱(60/80目,Carfen-1000,Supelco)。

有机酸:采用配有210 nm紫外检测器的高效液相色谱仪(Shimadzu)对包括乙酸、丙酸、正丁酸、异丁酸、正戊酸和异戊酸在内的VFAs以及乳酸浓度进行测定^[13]。

酸化率采用酸化产物产量(以COD计)与SCOD

的比值表征。

2 结果与讨论

2.1 强化膜混凝示范工程运行效果

在示范工程中,虽然强化膜混凝设备的进水COD波动较大[(235.9 \pm 105.9) mg/L],但出水COD基本稳定在50 mg/L以下[(42.4 \pm 7.2) mg/L],去除率为82%;该设备对TP同样具有较好的去除效果,出水TP为(0.48 \pm 0.19) mg/L,去除率达到85%以上;但该设备对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除作用有限,去除率约为28%,去除途径主要是活性炭和膜表面泥饼层的吸附截留作用^[2,14]。

强化膜混凝设备产生的污泥性质如表1所示,COD和TP含量远高于文献报道的含铝盐混凝剂的初沉污泥^[5],因此,膜混凝污泥具有更大的碳、磷资源回收潜力。另外,膜混凝污泥的SCOD和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量非常低,这说明污泥中绝大部分的碳、磷是以悬浮态和胶体态形式存在,直接进行碳、磷回收利用存在一定难度。

表1 膜混凝污泥性质

Tab.1 Properties of sludge from enhanced membrane coagulation process

项 目	均值 \pm 标准差	本次实验值
pH	7.2 \pm 0.0	7.2
TS/(g \cdot L $^{-1}$)	25.4 \pm 0.9	26.0
VS/(g \cdot L $^{-1}$)	13.2 \pm 2.3	14.8
COD/(mg \cdot L $^{-1}$)	26 645.6 \pm 7 116.1	21 613.7
SCOD/(mg \cdot L $^{-1}$)	124.3 \pm 48.1	158.3
TP/(mg \cdot L $^{-1}$)	480.9 \pm 238.2	312.5
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1.2 \pm 0.4	0.9
$\text{NH}_4^+\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	62.9 \pm 40.4	91.5

2.2 强化水解效果

为考察酸碱预处理对膜混凝污泥水解性能的影响规律,测定不同初始pH条件下膜混凝污泥中有机物和磷酸盐的释放情况,结果见图1。膜混凝污泥中的有机物和磷酸盐主要被 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 AlPO_4 等铝化合物包裹,而 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 AlPO_4 在较低或较高的pH下会发生溶解,进而会促进有机物和磷酸盐的释放^[5]。对照组污泥初始pH为7.2,0.5 h后SCOD和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量与原泥基本一致,未发生明显水解。当污泥初始pH调至2时, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量从初始的0.9 mg/L增至105.8 mg/L,释放倍数达到117倍;此时SCOD为505.6 mg/L,有机物释放倍数仅为3倍。这

可能是因为污泥中蛋白质和多糖等物质在低pH下的溶解度较低,大多数蛋白质的等电点在3.5~6.5之间,此时的溶解度最低^[15-16],进而导致初始pH为2和4时的SCOD偏低。当污泥初始pH调至碱性条件时,有机物与磷酸盐出现同步释放的现象,且随着初始pH的升高,释放量显著增加。初始pH为9、10、11和12时的磷酸盐含量分别为10.3、30.5、61、122 mg/L,对应的SCOD分别为346.1、1 316.5、2 889和5 214.5 mg/L。以上实验结果表明,酸预处理能强化膜混凝污泥中磷酸盐的单独释放,而碱预处理能促进有机物和磷酸盐的同步释放。

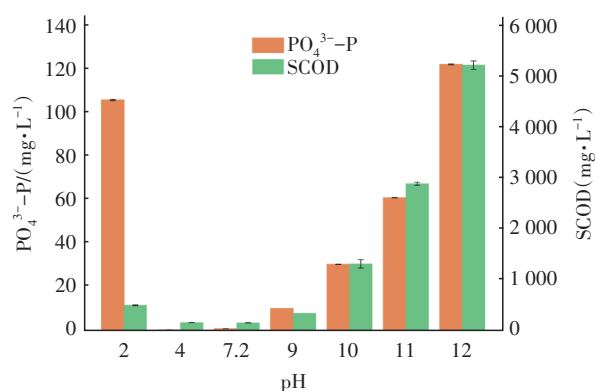


图1 不同初始pH条件下有机物与PO₄³⁻-P的释放情况

Fig.1 Release of organic matter and PO₄³⁻-P under different initial pH

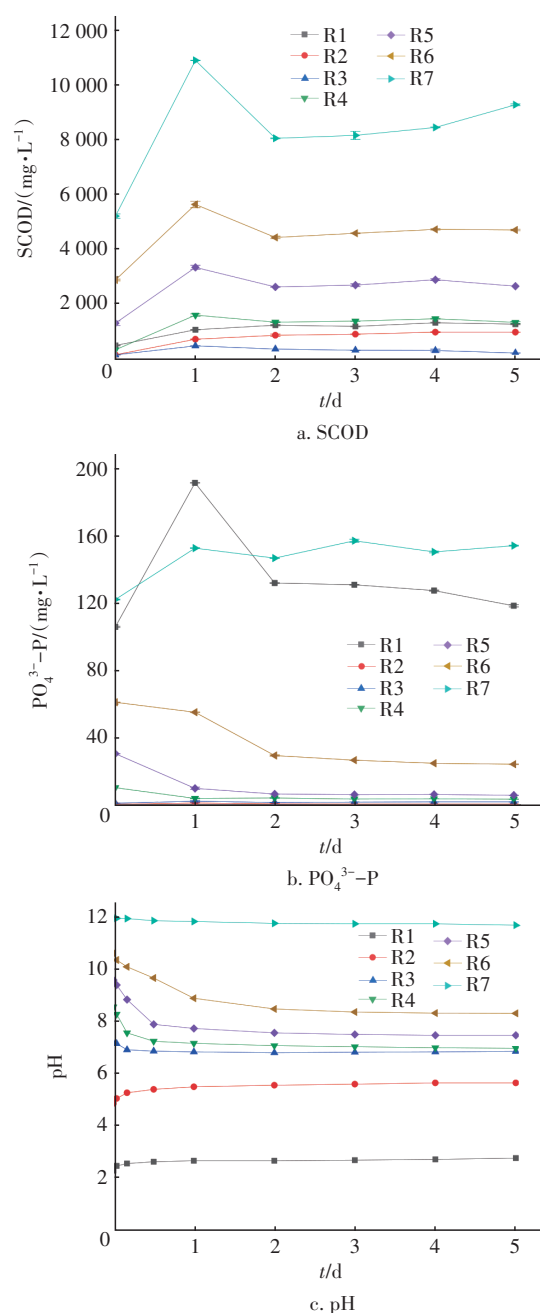
2.3 酸化发酵效果

2.3.1 酸化发酵性能

不同初始pH条件下膜混凝污泥的酸化发酵性能如图2所示,包括污泥的SCOD、PO₄³⁻-P和pH随发酵时间的变化情况,以及发酵结束后反应器内的气体组分。

从图2(a)可以看出,对照组反应器R3中的SCOD在发酵过程中一直处于最低值,碱预处理反应器(R4~R7)中的SCOD均高于酸预处理反应器(R1、R2)。碱预处理反应器中的SCOD均在第1天达到最大值,分别为1 610、3 348、5 641和10 885 mg/L,随后逐渐降低并趋于稳定。强化水解过程的持续作用是导致SCOD在第1天达到最大值的重要原因,随后微生物发酵作用逐步凸显出来,SCOD因转化为有机酸、CO₂、CH₄与H₂等物质而出现降低。2.3.2节会对发酵过程中有机酸产量和组成进行详细讨论,有机酸的产生以及发酵实验结束后检测到的气体组分[见图2(d)]证实了上述推测。酸化发

酵过程中产生的有机酸会作为碱度对污泥的pH起到缓冲作用,因而会导致酸预处理反应器的pH升高和碱预处理反应器的pH降低[见图2(c)],逐渐适合发酵微生物的生长。然而,这种缓冲作用对反应器R1(pH=2)和R7(pH=12)的影响非常有限,在第5天时这两个反应器中依然保持强酸或强碱环境[见图2(c)],这会对微生物尤其是产甲烷古菌的代谢活性产生抑制^[17]。因此,与其他反应器相比,发酵结束时反应器R1和R7中的甲烷含量最低[见图2(d)]。



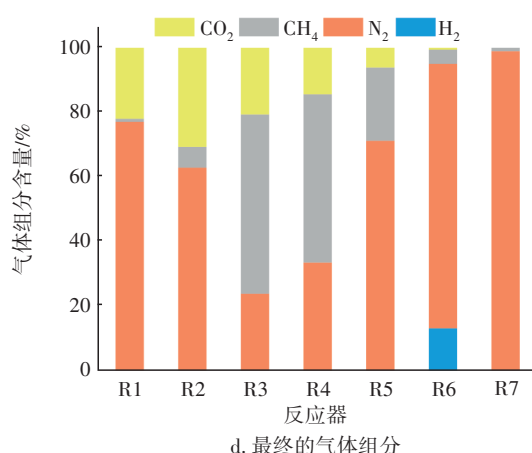


图2 各反应器中污泥SCOD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和pH的变化以及最终的气体组分

Fig.2 Change of SCOD, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and pH of sludge and final gas composition of each reactor

在酸化发酵阶段,反应器R2(pH=4)与R3(对照组)中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量一直维持在最低水平[见图2(b)]。反应器R1(pH=2)的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放效果十分显著,第1天即达到最大值191.3 mg/L,随后开始降低。反应器R4(pH=9)、R5(pH=10)、R6(pH=11)中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量呈逐渐下降趋势。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量下降的主要原因在于污泥pH的变化,使得原本溶出的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 重新生成不溶物。值得注意的是,反应器R1,尤其是R7,它们的pH在酸化发酵期间变化不大,因此反应器中污泥释放出的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 保持在较高水平,在第5天时分别达到118.3和154.0 mg/L。

2.3.2 酸化产物特性

不同初始pH条件下反应器的最大酸化产物产量以及达到最大产量所需的时间见图3。与对照组(R3)和酸预处理组(R1、R2)相比,碱预处理组(R4~R7)的酸化产物总量普遍较高,这与图2(a)的SCOD结果一致。反应器R6(pH=11)的酸化发酵效果最优,其酸化产物产量在第2天达到最大值3 419.6 mg/L,此时酸化率高达77.0%。

不同初始pH条件下反应器内酸化产物组成随发酵时间的变化见图4。反应器R2、R5和R6的最终酸化产物组成类似,但变化过程不尽相同。反应器R2和R6在发酵前期出现异丁酸累积现象,随后异丁酸占比开始降低,乙酸占比升高,这说明在发酵微生物的作用下,异丁酸开始向乙酸转化,最后各组分占比趋于稳定。反应器R5在发酵后期出现乙酸占比降低的现象,根据反应器中气体组分情况

[见图2(d)]可知,这可能是因为部分乙酸转化为甲烷所致^[13]。反应器R1和R3的酸化产物产量非常低(见图3),与其他反应器不同的是,最终酸化产物中乳酸占比较高。反应器R4中全程乙酸占比极低,结合反应器气体组分情况[见图2(d)]可知,反应器内的丙酸和丁酸不断向乙酸转化后,再次被产甲烷菌利用,而且丁酸比丙酸更容易转换为乙酸^[18],导致反应器R4的最终酸化产物中存在较高比例的丙酸。反应器R7在第3天开始出现正丁酸的大量累积,属于典型的丁酸型发酵过程,可以推断,高pH条件有利于丁酸型发酵的进行。

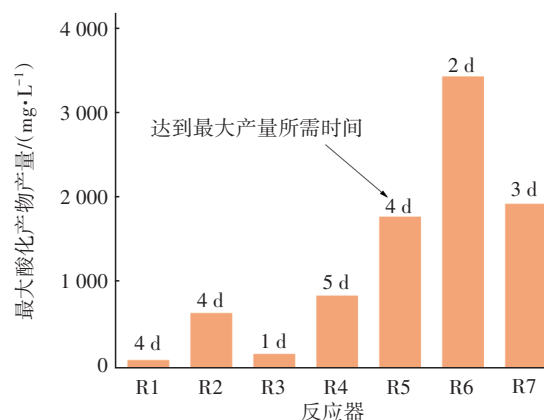


图3 各反应器的最大酸化产物产量

Fig.3 Maximum acidification product yield in each reactor

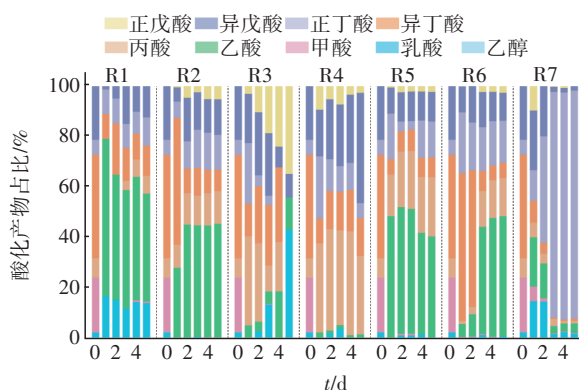


图4 各反应器的酸化产物特性

Fig.4 Acidification product characteristics of each reactor

2.4 膜混凝污泥资源化潜力分析

资源化处理是当前我国农村生活污水处理领域的一个重要技术导向,这里提到的资源化不仅包括“水”资源,还包括污水中的碳、氮、磷等资源^[19]。在以生物氧化为核心的传统生化工艺中,好氧曝气是导致污水处理行业高能耗和高碳排放的重要因

素之一。目前已经得到应用的化学强化一级沉淀技术以及本研究中的强化膜混凝技术都是能实现污水中碳、磷资源快速捕获的同类物化技术,为后续碳、磷资源的回收利用提供了良好的基础^[5,20]。强化膜混凝技术产生的污泥中COD和TP含量分别达到 $(26\ 645.6 \pm 7\ 116.1)$ 、 (480.9 ± 238.2) mg/L,是化学强化一级沉淀污泥的4倍左右^[5],具有更高的资源化潜力。

膜混凝污泥资源化既包括污泥中有机物和磷的回收利用,还包括污泥最终产品的利用。在有机物利用方面,本研究中,污泥释放的SCOD最高达到了10 885 mg/L(pH=12),最大酸化产物产量达到了3 419.6 mg/L(pH=11),不仅可以作为污水处理厂深度脱氮的反硝化替代碳源^[21],而且可以作为微生物甲烷化的原料,以沼气形式回收有机物资源。在磷回收方面,Bi等^[22]和Chen等^[23]采用磷酸铵镁法分别从碱预处理的剩余污泥和化学强化一级沉淀污泥中回收磷酸盐,本研究中的膜混凝污泥在初始pH为2和12时释放的磷酸盐含量分别为105.8和122 mg/L,明显高于上述文献中的磷酸盐含量,具有较好的磷回收潜力。在污泥最终产品利用方面,可首先利用厌氧消化技术对污泥进行稳定化处理,随后可就近就地用于农村园林绿化,补充土壤营养元素和改善土壤环境质量,但膜混凝污泥园林利用的适宜性和潜在风险需要作进一步研究。

3 结论

① 在农村生活污水处理示范工程中,强化膜混凝设备能在水力停留时间为60 min的条件下去除80%以上的COD和TP,出水COD低于50 mg/L,出水TP低于0.5 mg/L,产生的污泥中COD和TP的含量分别达到 $(26\ 645.6 \pm 7\ 116.1)$ mg/L和 (480.9 ± 238.2) mg/L,具有较好的资源化潜力。

② 酸预处理能强化膜混凝污泥中磷酸盐的释放,当污泥初始pH调为2时,在0.5 h内 PO_4^{3-} -P释放倍数达到117倍,而有机物释放倍数仅为3倍左右;碱预处理能促进有机物和磷酸盐的同步释放,当污泥初始pH调为12时,污泥水解后磷酸盐和SCOD含量分别可达到122.5和214.5 mg/L。

③ 酸碱预处理释放出的SCOD可进一步被污泥中的微生物转化,生成的有机酸导致污泥pH向中性方向变化,进而促进微生物酸化发酵过程,同

时使得溶出的磷酸盐重新生成不溶物;当污泥初始pH调为11时,酸化发酵效果最优,酸化产物产量在第2天达到最大值(3 419.6 mg/L),此时酸化率高达77.0%,最终发酵产物中乙酸比例约占50%。

④ 强化膜混凝技术能实现农村生活污水中碳源资源的快速捕集,形成的富碳磷污泥可在有机物和磷回收的基础上用于园林绿化,但其适宜性和潜在风险需作进一步评估。

参考文献:

- [1] GONG H, JIN Z, XU H, *et al.* Redesigning C and N mass flows for energy-neutral wastewater treatment by coagulation adsorption enhanced membrane (CAEM)-based pre-concentration process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 342: 304-309.
- [2] JIN Z, MENG F, GONG H, *et al.* Improved low-carbon-consuming fouling control in long-term membrane-based sewage pre-concentration: the role of enhanced coagulation process and air backflushing in sustainable sewage treatment [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 529: 252-262.
- [3] LI Y Y, LIN L, LI X Y. Chemically enhanced primary sedimentation and acidogenesis of organics in sludge for enhanced nitrogen removal in wastewater treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118705.
- [4] YANG H, LIU J, HU P, *et al.* Carbon source and phosphorus recovery from iron-enhanced primary sludge via anaerobic fermentation and sulfate reduction: performance and future application [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294: 122174.
- [5] LIN L, LI X Y. Effects of pH adjustment on the hydrolysis of Al-enhanced primary sedimentation sludge for volatile fatty acid production [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 346: 50-56.
- [6] YAN W, CHEN Y, SHEN N, *et al.* The influence of a stepwise pH increase on volatile fatty acids production and phosphorus release during Al-waste activated sludge fermentation [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320: 124276.
- [7] LIN L, TAM L H, XIA X, *et al.* Electro-fermentation of iron-enhanced primary sedimentation sludge in a two-chamber bioreactor for product separation and resource recovery [J]. *Water Research*, 2019, 157: 145-154.
- [8] XU J, LI X Y, GAN L H, *et al.* Fermentation liquor of

- CaO₂ treated chemically enhanced primary sedimentation (CEPS) sludge for bioplastic biosynthesis [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 547–555.
- [9] LI C Y, SHENG Y Q, XU H D. Phosphorus recovery from sludge by pH enhanced anaerobic fermentation and vivianite crystallization [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9: 104663.
- [10] 郝晓地, 周健, 王崇臣. 蓝铁矿形成于污泥厌氧消化系统的验证与分析[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(13): 7–13.
- HAO Xiaodi, ZHOU Jian, WANG Chongchen. Vivianite formed in anaerobic digestion of excess sludge: verification and analysis [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(13): 7–13 (in Chinese).
- [11] 郭五珍, 王宇珊, 叶挺进, 等. 动态中温厌氧消化液进行鸟粪石回收磷的试验研究[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(15): 57–61.
- GUO Wuzhen, WANG Yushan, YE Tingjin, *et al.* Recovery of phosphorus from dynamic mesophilic anaerobic digestion supernatant of sewage sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(15): 57–61 (in Chinese).
- [12] 徐志婧, 李瑶, 周爱朝, 等. 污泥热水解过程中磷的释放规律与影响因素[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(21): 24–30.
- XU Zhiqiang, LI Yao, ZHOU Aichao, *et al.* Phosphorus release and influencing factors analysis during sludge thermal hydrolysis [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(21): 24–30 (in Chinese).
- [13] JANKOWSKA E, CHWIALKOWSKA J, STODOLNY M, *et al.* Volatile fatty acids production during mixed culture fermentation—the impact of substrate complexity and pH [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 326: 901–910.
- [14] GONG H, JIN Z, XU H, *et al.* Enhanced membrane-based pre-concentration improves wastewater organic matter recovery: pilot-scale performance and membrane fouling [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 206: 307–314.
- [15] WU H Y, GAO J Y, YANG D H, *et al.* Alkaline fermentation of primary sludge for short-chain fatty acids accumulation and mechanism [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 160(1): 1–7.
- [16] PELEGRINE D H G, GASPARETTO C A. Whey proteins solubility as function of temperature and pH [J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2005, 38(1): 77–80.
- [17] WANG X, LI Y, LIU J, *et al.* Augmentation of protein-derived acetic acid production by heat-alkaline-induced changes in protein structure and conformation [J]. *Water Research*, 2016, 88: 595–603.
- [18] DEFEMUR Z, 李明凯, 孔鑫, 等. 厨余垃圾厌氧产酸与产甲烷反应器运行特征差异分析 [J]. *环境卫生工程*, 2020, 28(2): 59–65.
- DEFEMUR Z, LI Mingkai, KONG Xin, *et al.* Difference analysis on operating characteristics between anaerobic acid-producing and methanogenic reactors of kitchen waste [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2020, 28(2): 59–65 (in Chinese).
- [19] QU J H, WANG H C, WANG K J, *et al.* Municipal wastewater treatment in China: development history and future perspectives [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(6): 88.
- [20] MURUGESAN K, SELVAM A, WONG J W. Flocculation and dewaterability of chemically enhanced primary treatment sludge by bioaugmentation with filamentous fungi [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 168: 198–203.
- [21] KIM H, KIM J, SHIN S G, *et al.* Continuous fermentation of food waste leachate for the production of volatile fatty acids and potential as a denitrification carbon source [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 207: 440–445.
- [22] BI W, LI Y Y, HU Y Y. Recovery of phosphorus and nitrogen from alkaline hydrolysis supernatant of excess sludge by magnesium ammonium phosphate [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 166: 1–8.
- [23] CHEN Y, LIN H, YAN W, *et al.* Alkaline fermentation promotes organics and phosphorus recovery from polyaluminum chloride-enhanced primary sedimentation sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294: 122160.

作者简介: 魏尚琿(1998–), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制工程。

E-mail: 1092844242@qq.com

收稿日期: 2021-08-17

修回日期: 2021-09-28

(编辑: 刘贵春)