

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.15.018

# 生物吸附/A<sup>2</sup>O工艺特性及蛋白质源污泥增量研究

郑凯凯<sup>1</sup>, 支尧<sup>1</sup>, 王硕<sup>1,2,3</sup>, 张光生<sup>1,2,3</sup>, 李激<sup>1,2,3</sup>

(1. 江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 江苏 苏州 215009)

**摘要:** 为了回收活性污泥中的蛋白质,开展基于生物吸附/A<sup>2</sup>O组合工艺运行特性与蛋白质源污泥增量潜力研究。结果表明,由于生物吸附段对进水中残留无机颗粒物的截留与颗粒状有机物的吸附作用,导致后续A<sup>2</sup>O段缺少碳源,TN、TP等水质指标均出现了超标现象,污泥有机质含量及污泥量的增长幅度都较小,进水中氮的同化/异化仅为20%左右。为保证出水水质,同时促进污泥增量,将生物吸附段剩余污泥厌氧发酵产生的优质碳源投加到后续A<sup>2</sup>O中,改善了该生物段的整体碳源环境,显著提高了微生物活性,获得了高质量的出水水质,其中氨氮、TN和TP分别达到1.3和0.3 mg/L以下。污泥的有机质含量及污泥量增长显著,进水中氮的同化/异化达到50%左右,蛋白质含量从341.2 mg/gMLSS提高至406.3 mg/gMLSS,增长率为19.1%。元素分析结果表明,氮元素所占的质量比从接种污泥的4.96%提高至6.71%,进一步证实了污泥中蛋白质含量的显著增加。

**关键词:** 生物吸附; 氮的同化/异化; 污泥有机质含量; 蛋白质

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)15-0109-06

## Characteristics of Biosorption and A<sup>2</sup>O Combined Process and Increment of Protein Source Sludge

ZHENG Kai-kai<sup>1</sup>, ZHI Yao<sup>1</sup>, WANG Shuo<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Guang-sheng<sup>1,2,3</sup>, LI Ji<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Wuxi 214122, China; 3. Jiangsu

University Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** Operational characteristics and incremental potential of protein source sludge based on biosorption and A<sup>2</sup>O combined process were investigated to recover proteins from activated sludge. The interception of residual inorganic particles in influent and the adsorption of particulate organic matter in the biological adsorption process led to the subsequent A<sup>2</sup>O process lack of carbon source and TN, TP and other water quality indicators exceeding the discharge standard. In addition, the increase in organic matter content and sludge quantity was small, and the assimilation/dissimilation of nitrogen in influent was only approximately 20%. The high-quality carbon source generated by anaerobic fermentation of excess sludge in the biosorption process was added to the subsequent A<sup>2</sup>O treatment process to ensure the quality of

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07306-001); 江苏省重点研发计划(社会发展)科技示范工程(BE2015622)

通信作者: 李激 E-mail: lij@jiangnan.edu.cn

effluent and promote the increment of sludge. The overall carbon source utilization of the biological process was improved, the microbial activity was significantly increased, and high-quality effluent quality was obtained, of which ammonia nitrogen, TN and TP were less than 1 mg/L, 3 mg/L and 0.3 mg/L, respectively. Organic matter content and sludge quantity increased significantly, the assimilation/disassimilation of nitrogen reached approximately 50%, and the protein content increased from 341.2 mg/gMLSS to 406.3 mg/gMLSS, indicating that a growth rate of 19.1% was achieved. Elemental analysis showed that the mass fraction of nitrogen increased from 4.96% to 6.71%, which further confirmed the significant increase of protein content in the sludge.

**Key words:** biosorption; assimilation/disassimilation of nitrogen; organic matter content of sludge; protein

面对日益严峻的资源紧缺压力,国家推动和鼓励开展循环经济发展模式,促进资源综合利用产业的快速发展。作为节能环保产业的重要组成部分,城市污水处理行业如何实现资源循环利用,是当前的重要任务,也是今后的主导发展方向。城镇污水厂的剩余污泥大多为微生物细胞体,经过破壁预处理后,提取的蛋白质占污泥质量的30%~60%<sup>[1]</sup>,因此污水处理厂剩余污泥蛋白质资源化利用越来越受到关注<sup>[2]</sup>。但是,我国城镇污水处理厂存在进水管含砂量大及预处理段除砂效果不理想的问题,导致剩余污泥的含砂量高、有机质含量低,极大地制约了污泥提取蛋白质的资源化利用途径<sup>[3]</sup>。

生物吸附段是通过控制较短的水力停留时间(HRT)和污泥龄(SRT)来培养适应原水环境、可以实现快速增殖的原核微生物,用以吸附进水中的颗粒态物质。因此,生物吸附段的设置会有效减少后续处理段受无机杂质、难降解有机物及有毒有害物质的影响。原水中的氮主要以异化和同化两种方式被去除,异化即硝化-反硝化作用,同化即微生物利用 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 及污水中的其他物质合成胞内蛋白质,在脱氮的同时,实现污泥量的增长。

进水中的部分有机物转移到了生物吸附段的污泥中,导致后续处理段缺少生物脱氮除磷所需的碳源。为使整个污水处理系统达到碳源平衡,考虑利用该段污泥发酵产酸作为后续生物处理段的优质碳源。近年来,污泥厌氧发酵产酸技术日趋成熟,发酵液作为活性污泥优质碳源的应用研究取得了良好效果<sup>[4-5]</sup>。投加碳源在提高出水质量的同时,可以改变进水中氮的去除途径,显著提高氮的同化/异化,最终实现污泥中蛋白质含量及污泥量的同步

提高。与污泥减量的传统思维方式相反,获取大量高品质污泥是其资源化利用的前提,也是真正实现城市污水处理行业资源循环的关键<sup>[6]</sup>。

因此,笔者采用生物吸附/ $\text{A}^2\text{O}$ 组合工艺处理某污水厂原水,利用生物吸附段污泥发酵产酸作为优质碳源投加到 $\text{A}^2\text{O}$ 中,从而获得高质量的出水水质及高蛋白质含量的污泥,探索符合我国国情的污水处理新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与运行条件

采用生物吸附/ $\text{A}^2\text{O}$ 组合工艺处理某污水处理厂旋流沉砂池出水,利用微生物吸附絮凝作用,在生物吸附段去除大部分残余的无机颗粒物、部分COD及氮磷污染物(主要为颗粒态有机物);然后经 $\text{A}^2\text{O}$ 段实现剩余污染物的去除,获得较高质量的出水水质。为避免生物脱氮除磷碳源不足问题,可在 $\text{A}^2\text{O}$ 厌氧或缺氧段投加碳源,碳源为生物吸附段污泥的厌氧发酵产物。生物吸附/ $\text{A}^2\text{O}$ 组合工艺的流程图如图1所示。

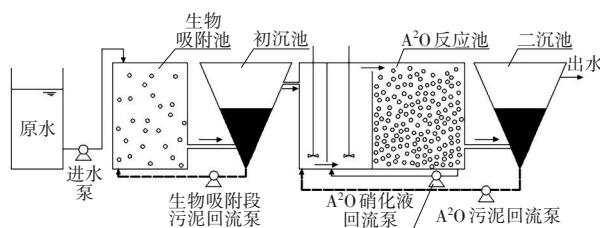


图1 生物吸附/ $\text{A}^2\text{O}$ 组合工艺流程

Fig.1 Flow chart of biosorption and  $\text{A}^2\text{O}$  combined process

设计进水量为50 mL/min。生物吸附段有效容积为1.5 L, HRT为0.5 h, SRT为2 d, 溶解氧(DO)维

持在0.5~1 mg/L,混合液悬浮固体浓度(MLSS)为4 000~5 000 mg/L。A<sup>2</sup>O反应器的总HRT为11.2 h,厌氧段、缺氧段和好氧段的HRT分别为1.6、3.2和6.4 h,好氧段DO浓度为2~4 mg/L,SRT为20 d,硝化液回流比为1.5,污泥回流比为0.8,MLSS为3 000~4 000 mg/L。生物吸附段和A<sup>2</sup>O段的接种污泥均为无锡市某污水处理厂污泥,有机质含量(MLVSS/MLSS)平均值为0.67。

试验分为两个阶段,第一阶段为某污水厂沉砂池出水进入生物吸附段,初沉池出水进入A<sup>2</sup>O段,在监测出水水质指标的基础上,监测污泥增量及蛋白质含量。第二阶段在此基础上投加碳源,投加点位为A<sup>2</sup>O的厌氧段,使用无水乙酸钠模拟厌氧发酵产物,投加量折算成COD为200 mg/L,监测出水水质指标、污泥增量及蛋白质含量的变化情况。

## 1.2 原水水质

生物吸附/A<sup>2</sup>O组合工艺进水为无锡市某污水处理厂旋流沉砂池出水,工业废水的比例约为25%,主要水质指标:COD为250~430 mg/L、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N为26~40 mg/L、TN为33~47 mg/L、TP为2.6~4.7 mg/L、SS为160~270 mg/L。

## 1.3 分析项目及方法

MLSS、MLVSS、COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP、磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)采用标准方法测定<sup>[7]</sup>,蛋白质采用凯氏定氮法测定,元素含量采用元素分析仪测定。微生物同化NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N量以污泥增长量的12%计算,异化量为单位时间内TN去除量减去同化量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污染物去除效果

#### 2.1.1 氨氮和总氮的变化

生物吸附/A<sup>2</sup>O工艺对TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的去除效果如图2所示。可以看出,进水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度低于0.6 mg/L,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/TN平均值为84.6%,表明TN中主要为NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,进水中不可氨化的有机氮含量较少。反应器运行初期,出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度都比较高,导致出水TN达到20 mg/L左右,出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N及TN都远超过《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准限值。随着A<sup>2</sup>O段的MLSS、HRT和好氧池DO浓度的升高,出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度下降,但仍在5 mg/L左右,无法稳定达到一级A标准。

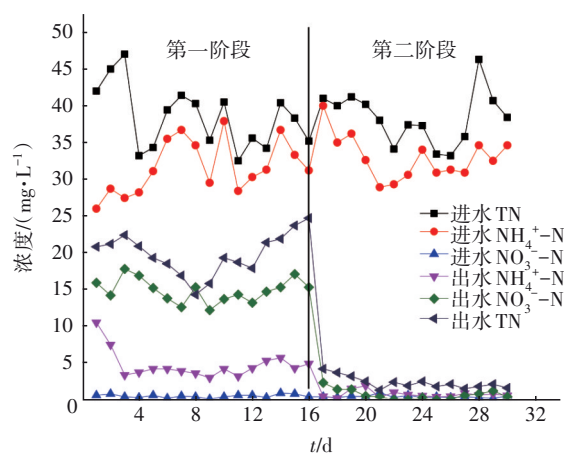


图2 生物吸附/A<sup>2</sup>O组合工艺对TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的去除效果

Fig.2 Removal effect of TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N by biosorption and A<sup>2</sup>O combined process

由于原水经过吸附段之后,大部分颗粒态COD(COD<sub>ss</sub>)被吸附,COD浓度降低了50%左右(见图3)。碳源的缺乏导致系统反硝化效果不佳,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度始终维持在较高水平,同时也导致TN无法稳定达标。在反应器正常运行的第16天投加碳源后,出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度都呈现下降趋势,TN浓度降低到3 mg/L以下,获得了较高质量的出水水质。硝化菌为化能自养型细菌,碳源的投加对其增殖无明显促进作用,导致出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度显著降低可能是由于系统中微生物利用氮的同化比例升高,即微生物的大量增殖需要利用污水中的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N来合成胞内蛋白质。

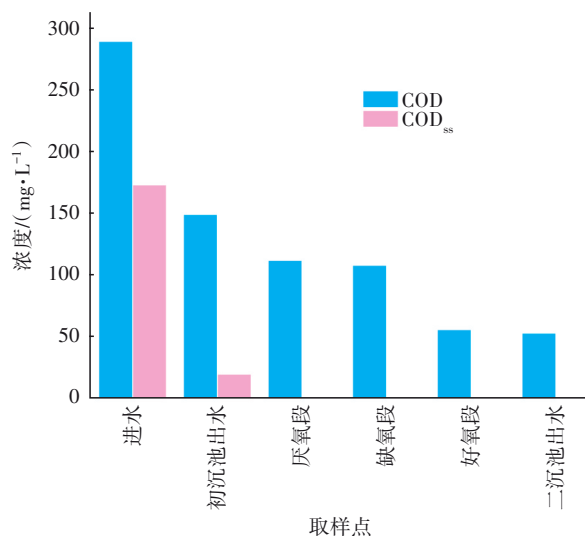


图3 COD及COD<sub>ss</sub>的全流程变化情况

Fig.3 Changes of COD and COD<sub>ss</sub> on the whole process

## 2.1.2 COD和总磷的变化

生物吸附/A<sup>2</sup>O组合工艺对COD和TP的去除效果如图4所示。

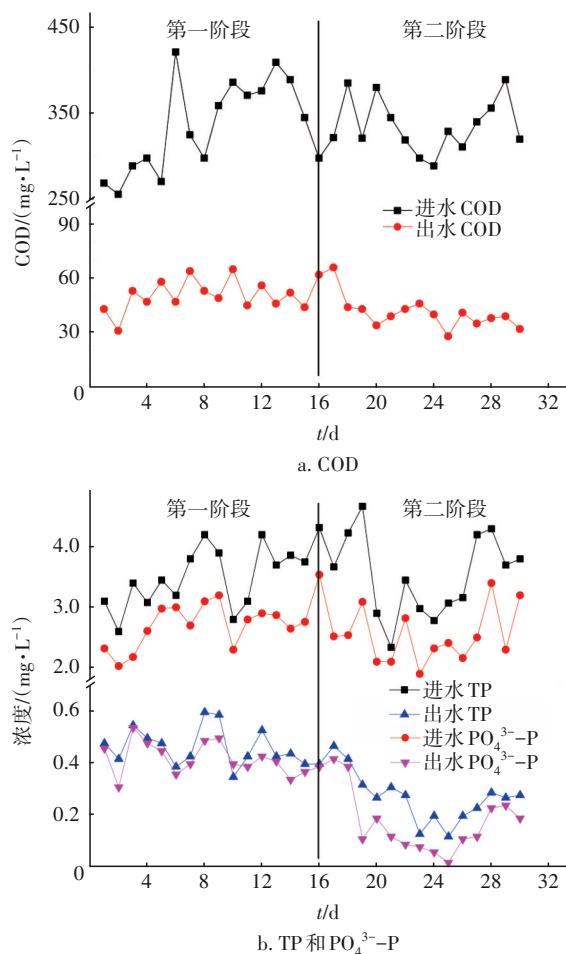


图4 生物吸附/A<sup>2</sup>O组合工艺对COD和TP的去除效果

Fig.4 Removal effect of COD and TP by biosorption and A<sup>2</sup>O combined process

从图4(a)可以看出,在系统运行的第一阶段,由于缺少碳源,污泥中微生物的活性受到抑制,使得有机物的降解效率受到影响,出水COD浓度为31~65 mg/L,平均值为51 mg/L,无法稳定达到一级A标准。在反应器运行的第二阶段,碳源的投加提高了系统中异养菌群的活性,微生物的大量生长繁殖使得有机物的浓度进一步降低,出水COD浓度相比第一阶段明显下降,平均值为40.5 mg/L,优于一级A标准。

从图4(b)可以看出,进水TP的组成中大部分为PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P,平均占比为75.6%。在反应器运行的第一阶段,出水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度较高,平均值为15 mg/L,高浓度的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N随污泥回流至厌氧段,一定程度上

抑制了聚磷菌的释磷作用,平均出水TP为0.46 mg/L,存在超标风险。在反应器运行的第二阶段,随着碳源条件的改善以及较低内回流硝态氮浓度(1 mg/L以下)使得系统除磷能力明显提高,出水TP浓度基本维持在0.3 mg/L以下,稳定达到了一级A标准。

## 2.2 污泥增量及蛋白质增量分析

### 2.2.1 污泥有机质含量的变化

生物吸附段及A<sup>2</sup>O段污泥有机质含量的变化如图5所示。

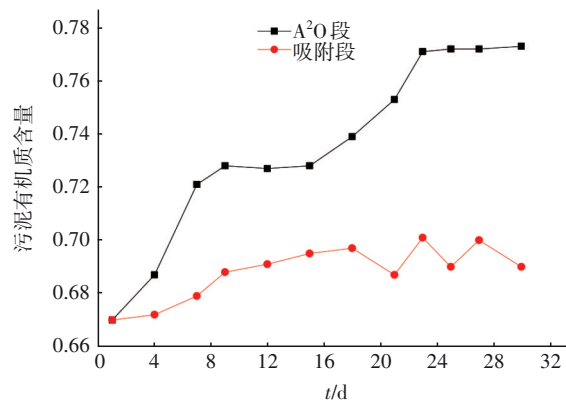


图5 污泥有机质含量的变化

Fig.5 Change of organic matter content of sludge

从图5可以看出,吸附段污泥有机质含量从接种污泥的0.67提高至0.69左右,该段污泥主要为进水中颗粒状物质的聚合体,这与Yan等<sup>[8]</sup>采用单独分离系统去除活性污泥中无机杂质的结果较为一致。本研究中,A<sup>2</sup>O段污泥有机质含量经过了2个增长阶段。由于吸附段截留了进水中残留的无机颗粒物,在反应器运行的第1~9天,A<sup>2</sup>O段污泥有机质含量出现了第一个上升过程,由接种污泥的0.67升高到0.73。但由于A<sup>2</sup>O段进水碳源的缺乏,有机质含量难以进一步升高。在反应器运行的第二阶段,随着碳源的投加,有机质含量进一步升高至0.77左右,相比接种污泥升高14.9%。剩余污泥有机质含量的显著提高可为提取蛋白质等资源化利用奠定基础。

### 2.2.2 污泥增量及氮的同化/异化

A<sup>2</sup>O系统第一、二阶段污泥增量及氮的同化/异化如图6所示。在第一阶段,反应器由于缺乏碳源,污泥量增长较慢,污泥产率仅为0.23 gVSS/gCOD,远低于正常活性污泥系统(0.4~0.7 gVSS/gCOD<sup>[8]</sup>),且反应器运行第一阶段氮的同化/异化只有20%左右,与黄满红等<sup>[9]</sup>的研究结果相近,出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N存



在超标风险,无法获得更优质的出水。

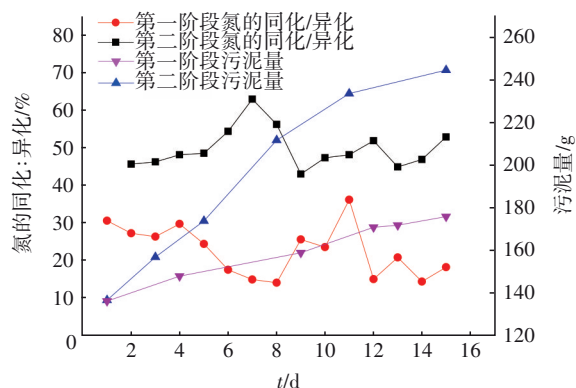


图6 A<sup>2</sup>O系统污泥增量及氮的同化/异化

Fig.6 Increment of sludge and assimilation/dissimilation of nitrogen in A<sup>2</sup>O process

随着生物吸附段污泥发酵液的补充,污泥增长率明显升高,污泥产率可以达到0.72 gVSS/gCOD,高于Yan等<sup>[8]</sup>获得的污泥产率,说明反应器取得了较好的污泥增量效果。同时,氮的同化/异化也发生了显著的变化,由第一阶段末期的16.6%升高到50.6%,碳源条件的改善使得A<sup>2</sup>O段异养微生物得以大量增殖,新细胞体的大量合成促进了微生物对污水中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N及其他污染物的利用。最终,进水中大量的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N以微生物胞内蛋白质的形式转移到了污泥中。

### 2.2.3 A<sup>2</sup>O段污泥蛋白质含量的变化

活性污泥主要由细菌和微型动物组成,其中蛋白质含量占细菌干质量的50%~60%<sup>[10]</sup>。Yucesoy等人<sup>[11]</sup>发现,蛋白质含量约占污泥有机质含量的40%。反应器不同运行阶段蛋白质含量的变化表明,A<sup>2</sup>O段污泥中的蛋白质含量从接种污泥的341.2 mg/gMLSS增加至406.3 mg/gMLSS,增长率为19.1%,蛋白质含量显著升高。

排除无机杂质的干扰,以单位有机质含量计算的蛋白质含量也同样升高,从517.0 mg/gMLVSS增加至534.6 mg/gMLVSS,增长率为3.4%。此外,通过元素含量分析发现,反应器运行30 d后,污泥有机质含量明显增加,组成细胞体的主要元素氮的含量从4.96%升高至6.71%(见图7),高于马蜀等<sup>[12]</sup>、邓利等<sup>[13]</sup>的研究结果,表明通过改善碳源条件,能够提高污泥的蛋白质含量,这为污泥的资源化利用奠定了基础。

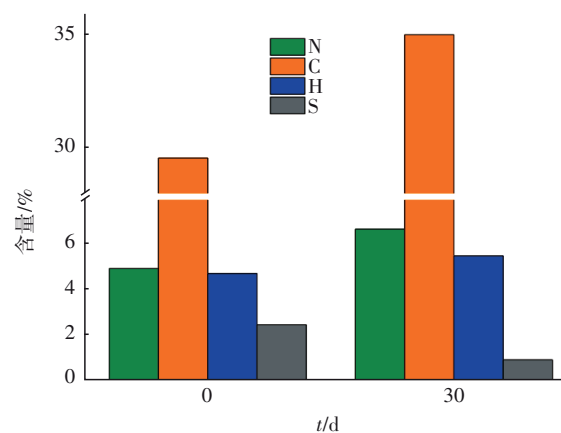


图7 A<sup>2</sup>O系统污泥元素分析结果

Fig.7 Elemental analysis results of sludge in A<sup>2</sup>O process

## 3 结论

① 生物吸附段可有效截留进水中残留的无机颗粒物,并能将进水中的大部分颗粒态有机物吸附到污泥中,可为该段剩余污泥的厌氧发酵产酸及后续A<sup>2</sup>O段获取高蛋白质含量的污泥奠定基础。

② 采用生物吸附/A<sup>2</sup>O组合工艺处理某污水厂旋流沉砂池出水,在无碳源投加阶段,由于生物吸附段去除了51.6%的COD,导致后续A<sup>2</sup>O段缺少碳源,TN、TP等水质指标均存在超标风险。补充生物吸附段污泥发酵液后,活性污泥整体性能提高,实现了高于一级A的出水水质,其中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN和TP可以分别达到1、3和0.3 mg/L以下。

③ 由于生物吸附段对原水中残留无机颗粒物的截留作用及优质碳源的投加,A<sup>2</sup>O段污泥的有机质含量从0.67升高至0.77,进水中氮的同化/异化从16.6%升高到50.6%。污泥蛋白质含量增长了19.1%,达到406.3 mg/gMLSS。氮元素含量的提高也从侧面证实了污泥中蛋白质含量的显著升高,可为下一步蛋白质的提取、纯化提供优质原料。

## 参考文献:

- [1] MONIQUE R, ELISABETH G N, ETIENNE P, *et al.* A high yield multi-method extraction protocol for protein quantification in activated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(16): 7464-7471.
  - [2] 陈伟华, 李萍, 陈广大, 等. 从干剩余污泥中提取蛋白质的试验研究[J]. *地球与环境*, 2011, 39(3): 435-439.
- CHEN Weihua, LI Ping, CHEN Guangda, *et al.* Experimental research on protein extraction from dried

- excess sludge [J]. *Earth and Environment*, 2011, 39 (3):435-439(in Chinese).
- [3] 郝晓地, 张璇蕾, 刘然彬, 等. 剩余污泥转化能源的瓶颈与突破技术[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(18): 1-7.
- HAO Xiaodi, ZHANG Xuanlei, LIU Ranbin, *et al.* Bottlenecks and breakthroughs of energy conversion from excess sludge[J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30 (18):1-7(in Chinese).
- [4] PENG Y Z, ZHANG L, ZHANG S J, *et al.* Enhanced nitrogen removal from sludge dewatering liquor by simultaneous primary sludge fermentation and nitrate reduction in batch and continuous reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 104(3):144-149.
- [5] GAO Y Q, PENG Y Z, ZHANG J Y, *et al.* Biological sludge reduction and enhanced nutrient removal in a pilot-scale system with 2-step sludge alkaline fermentation and A<sup>2</sup>O process [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(5):4091-4097.
- [6] 郝晓地, 张健. 污水处理的未来:回归原生态文明[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(20):1-7.
- HAO Xiaodi, ZHANG Jian. Future of wastewater treatment: returning to originally ecological civilization [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31 (20): 1-7 (in Chinese).
- [7] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [M]. 20th ed. Washington D C: American Public Health Association, 1998.
- [8] YAN P, JI F Y, WANG J, *et al.* Pilot-scale test of an advanced, integrated wastewater treatment process with sludge reduction, inorganic solids separation, phosphorus recovery, and enhanced nutrient removal (SIPER) [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 142(2): 483-489.
- [9] 黄满红, 李咏梅, 顾国维. A<sup>2</sup>O系统中碳、氮、磷的物料平衡分析[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(13): 41-44.
- HUANG Manhong, LI Yongmei, GU Guowei. Analysis on mass balance of carbon, nitrogen and phosphorus in A<sup>2</sup>O process[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25 (13):41-44(in Chinese).
- [10] GONZE E, PILLOT S, VALETTE E, *et al.* Ultrasonic treatment of an aerobic activated sludge in a batch reactor [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2003, 42(12):965-975.
- [11] YUCESOI E, LUDEMANN N, LUCAS H, *et al.* Protein analysis as a measure of active biomass in activated sludge [J]. *Water Science and Technology*, 2012, 65(8):1483-1489.
- [12] 马蜀, 高旭, 郭劲松. 城市污水处理厂剩余污泥的元素含量分析[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(19): 60-63.
- MA Shu, GAO Xu, GUO Jinsong. Element analysis of excess activated sludge in WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(19):60-63(in Chinese).
- [13] 邓利, 刘文丽, 张慧敏. 深圳市污水污泥的元素分析及农用安全评价[J]. *安全与环境学报*, 2009, 9(2): 103-106.
- DENG Li, LIU Wenli, ZHANG Huimin. Chemical element analysis and the risk assessment on the farm-use of sewage sludge in Shenzhen [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2009, 9(2):103-106(in Chinese).

作者简介:郑凯凯(1990-),男,江苏徐州人,博士研究生,主要研究方向为污水生物处理技术。

E-mail:zkk1022@126.com

收稿日期:2020-01-03

修回日期:2020-01-24

(编辑:任莹莹)

治理水土流失 建设美丽中国