水解酸化-磷酸铵镁法-EGSB 组合工艺处理大豆蛋白废水

汪 林[1,2,*] 代鹏飞[2] 张炜铭[1,2] 常 毅[2] 吕 路[1,2]
徐敬生[2] 杜 倩[2] 石家杰[2]

(1. 污染控制与资源化研究国家重点实验室,南京大学环境学院,南京 210093;
2. 国家环境保护有机化工废水处理与资源化工程技术中心,江苏南大环保科技有限公司,南京 210046)

摘 要 采用水解酸化-磷酸铵镁(MAP)法-EGSB 组合工艺对大豆蛋白废水进行处理,考察了水解酸化系统运行效果,并对其运行参数进行优化;提出 MAP 法对高浓度氨氮废水的处理方法,并评选其处理高浓度氨氮废水的适宜条件。结果表明,水解酸化系统运行稳定,最适 pH 为 7.0,最佳水力停留时间为 12 h,氨氮转化率高达 95.8%;MAP 法处理高浓度氨氮废水的优选条件为 $n(Mg):n(N):n(P)=1:1:0.8$,此条件下氨氮去除率为 88.3%,磷酸去除率为 76.7%;EGSB 反应器经过三个月的启动后可稳定运行,有机负荷高达到 9.88 kg·(m^3·d)$^{-1}$,COD 去除率达到 90.0% 左右。水解酸化-MAP-EGSB 组合工艺在处理大豆蛋白废水时可获得连续稳定的处理效果,为大豆蛋白废水处理的工程化提供了基础依据。

关键词 大豆蛋白废水;水解酸化;磷酸铵镁;厌氧反应

中图分类号 X52 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2016)11-6179-06 **DOI** 10.12030/j.cjee.201506203

Treatment of soy protein wastewater by hydrolysis acidification-magnesium ammonium phosphate precipitation-EGSB process

WANG Lin[1,2,*] DAI Pengfei[2] ZHANG Weiming[1,2] CHANG Yi[2] LYU Lu[1,2]
XU Jingsheng[2] DU Qian[2] SHI Jiajie[2]

(1. State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China;
2. State Environmental Protection Engineering Center for Organic Chemical Industrial Waste Water Disposal and Resources Reuse, Jiangsu NJU Environmental Technology Co., Ltd, Nanjing 210046, China)

Abstract A hydrolysis acidification-magnesium ammonium phosphate precipitation (MAP)-EGSB process was conducted to treat soy protein wastewater. The running effects of hydrolysis acidification were studied and its operational parameters were optimized. A MAP unit was proposed for the treatment of the high-concentration NH_4^+-N wastewater and optimal conditions were investigated experimentally. The results showed that hydrolytic acidification ran steadily. At the optimal HRT of 12 h and pH of 7.0, NH_4^+-N conversion rate reached 95.8%. The optimum MAP operational conditions for treating the high-concentration NH_4^+-N wastewater were: $n(Mg):n(N):n(P)=1:1:0.8$. Under this condition, the removal efficiencies of NH_4^+-N and phosphate were 88.3% and 76.7%, respectively. The EGSB anaerobic reactor was started successfully, after approximately three months of testing. The organic load was 9.88 kg·(m^3·d)$^{-1}$ and COD removal rate was 90.0%. Continuous and steady treatment effects can be achieved when using this process for treating soy protein wastewater. This study provides fundamental baseline results for engineering applications in the treatment of soy protein wastewater.

Key words soy protein wastewater; hydrolytic acidification; magnesium ammonium phosphate precipitation; anaerobic reaction

大豆蛋白是一种重要的植物蛋白,含有丰富的蛋白营养价值,不含胆固醇,被广泛应用在食品加工、肉食品生产中[1-2]。然而,大豆蛋白生产过程中产生大量废水,据统计,年产 1 万 t 大豆蛋白的企

基金项目:江苏省博士后科研资助计划项目(1501128C);江苏省环保厅 2015 年度省级专项;江苏省重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术)项目(BE2015175)

收稿日期:2015-06-30; **修订日期**:2015-09-08

作者简介:汪林(1980—),男,博士,工程师,研究方向:水污染控制技术。E-mail:wanglin@nuep.com.cn

*通讯联系人

业,每天约产生 1 000 t 乳清废水[3]。大豆蛋白生产废水因其成分复杂、有机物浓度高、悬浮物含量高、富含有机氮和有机磷等特点,一直是水处理技术面临的棘手问题[4-6]。目前,国内外主要采用"物化处理 + 生化处理工艺"对大豆蛋白废水进行处理[7-10],但是一些大豆蛋白废水污水处理厂由于脱氮除磷工艺设计不合理、运行操作不当等原因,存在处理系统运行不稳定、出水难以达标排放和处理成本较高等一系列运行问题[11]。蒋和团指出[12],某公司采用水解酸化 + UASB 工艺处理大豆蛋白废水,其运行过程中,UASB 出水含有高浓度氨氮和磷酸盐,与废水中的钙、镁等金属离子形成鸟粪石等结晶物质,致使出水管道堵塞、曝气头结垢等,影响厌氧反应器的稳定运行,造成后续处理负荷偏高。侯微等[13]研究表明,废水中氨氮浓度超过 500 mg · L^{-1},会对颗粒污泥的形成产生一定的影响。因此,如何有效地解决大豆蛋白废水处理中存在的高有机物、高氮及磷问题,减少大豆生产废水的外排风险,成为环境领域技术人员迫切需要研究的重点。

本研究采用水解酸化-MAP 法-EGSB 组合工艺对大豆蛋白废水进行处理,属于首次将 MAP 法应用于大豆蛋白废水处理脱氮除磷领域。本文探讨了水解酸化运行情况及其最优运行参数,同时对 MAP 法的反应条件进行优化,再联合 EGSB 生物降解,挖掘组合工艺处理大豆蛋白废水的最大潜能,以期为大豆蛋白废水治理的工程化应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验水质

废水取自山东莘县某大豆蛋白废水处理厂,该处理厂自 2005 年建成至今,目前处理能力为 5 500 $m^3 \cdot d^{-1}$。实验废水主要来源于离心段产生的乳清废水及车间卫生废水,主要含有部分残留蛋白质、多糖等,经测定,主要水质指标为:pH = (4.80 ± 0.02),COD 为(1.67 × 10^4 ± 4.2) mg · L^{-1},氨氮为(21.8 ± 0.2) mg · L^{-1},总氮为(443 ± 2.0) mg · L^{-1},磷酸盐为(114 ± 0.8) mg · L^{-1},总磷为(190 ± 1.8) mg · L^{-1},SS 为(292 ± 2.2) mg · L^{-1},B/C 为(0.38 ± 0.02)。

1.2 工艺方案的确定

由于山东莘县某大豆蛋白废水污染物浓度高,富含有机氮和有机磷等特点,拟采用水解酸化-MAP 法-EGSB 组合工艺进行处理。首先通过水解酸化将有机氮和有机磷转化为小分子氨氮和磷酸盐,并提高废水的可生化性,再采用 MAP 法将废水中氨氮和磷酸盐去除,并回收无机磷用做肥料,最后通过厌氧颗粒污泥床的生物作用将废水中的有机物降解,并产生甲烷气体,实现能源回用。

1.3 实验装置

1.3.1 水解酸化单元

由于大豆蛋白废水中污染物浓度高,富含有机氮和有机磷等特点,增大了处理难度。采用水解酸化过程可有效提高大豆蛋白废水的可生化性,为后续处理创造有利条件。水解酸化反应器为圆柱形,且采用有机玻璃制成,反应区外设置水浴保温层,反应器内径 15 cm,高 60 cm,有效容积为 8 L。

1.3.2 MAP 沉淀单元

大豆蛋白废水经水解酸化后,出水中氨氮浓度会显著增加,直接进入厌氧反应器会与废水中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等离子反应生成以鸟粪石为主的难溶解性复合无机盐,沉淀物不断在管壁上富集,易造成出水管道堵塞,增加后续处理单元运行负荷,所以应设置 MAP 沉淀单元,预先除去大量的氨氮及磷酸根。MAP 沉淀池为竖流式,池体为圆形,且采用有机玻璃制成,沉淀池内径 15 cm,高 80 cm,有效容积为 10 L。

1.3.3 EGSB 单元

EGSB 反应单元主要用于去除废水中的高浓度有机物,且产生有利用价值的沼气,作为洁净能源使用。EGSB 反应器为圆柱形,且采用有机玻璃制成,反应区外设置水浴保温层,反应器上部设有气、液、固三相分离器,反应器内径 18 cm,高 40 cm,有效容积为 8 L。

水解酸化-MAP 法-EGSB 组合工艺实验装置如图 1 所示。

1.4 实验方法

1.4.1 水解酸化池的运行及参数优化

将大豆蛋白原水投加到有效体积为 4 L 的水解酸化反应器中,添加某大豆蛋白污水处理厂的厌氧颗粒污泥,使反应器中混合污泥浓度为 0.80 g · L^{-1} 左右,调节反应初始 pH 值为 6.8 ~ 7.2,温度维持 30℃,通过机械搅拌的作用使废水和污泥处于完全

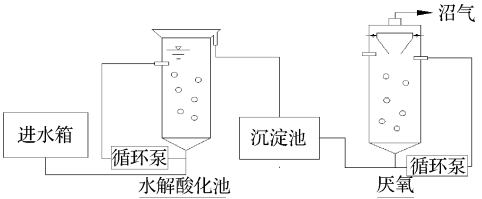

图 1 水解酸化-MAP 法-EGSB 装置示意图

Fig. 1 Experimental device of hydrolytic acidification-MAP-anaerobic reaction reaction

混合状态,进行间歇实验。以各时刻的 COD 去除效果、氨氮及磷酸盐转化率表征水解酸化运行效果。

水解酸化反应运行参数的研究主要是优化 pH 值和水力停留时间。大豆蛋白生产原水 pH 值在 3.5左右。为考察酸性和中性(6.8 ~ 7.2)条件下水解酸化的运行效果,优化 pH 值,分别设定反应初始 pH 值为 3.5 和 7.0,总水力停留时间为 96 h,进行间歇性实验,评估 COD 随时间的变化关系。设置水解酸化池的反应为 4、8、12、24 和 48 h,反应初始 pH 为 7.0,进行间歇性实验,优化水力停留时间参数。

1.4.2　MAP 法处理高浓度氨氮废水及其工艺运行参数优化

MAP 沉淀反应最佳 pH 范围为 9.0 ~ 10.7[14-15],因此,该反应 pH 值设为 9.5。MAP 沉淀反应为烧杯实验,将含高浓度氨氮的水解酸化池出水加入烧杯中,分别添加不同浓度的氧化镁和磷酸,使出水中 $n(Mg):n(N):n(P)$ 为 1∶1∶1.1、1∶1∶1、1.2∶1∶1.1、1.2∶1∶1、1∶1∶0.8、1.4∶1∶1、1.2∶1∶0.8 和 1.4∶1∶0.8,调节反应初始 pH 值为 9.5,搅拌反应 20 min 后,静置沉淀,取上清液分析氨氮和磷酸盐浓度。

1.4.3　厌氧实验

EGSB 厌氧反应器启动主要分为适应驯化期、负荷提升期及满负荷运行期,采用逐渐提升进水 COD 及进水量的方法来启动反应器。

实验配水:采用人工配水,用自来水将大豆蛋白原水 COD 浓度稀释到 2 000 mg·L^{-1}左右,用碳酸氢钠调节进水 pH 值为 7.0 左右,并添加微量元素,微量元素混合液的投加量为 1 mL·L^{-1},其成分为:$FeCl_3 \cdot 4H_2O$ 200 mg·L^{-1}、$NaMO_7O_{24} \cdot 2H_2O$ 60 mg·L^{-1}、$CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 200 mg·L^{-1}、KI 30 mg·L^{-1}、$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 30、H_3BO_3 100 mg·L^{-1}、$MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 120 mg·L^{-1}、$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 120 mg·L^{-1}和 $NaSeO_3 \cdot 5H_2O$ 100 mg·L^{-1}。

启动初期,接种某大豆蛋白废水处理厂的厌氧颗粒污泥至 EGSB 反应器,使反应器中混合液污泥浓度为 10.8 g·L^{-1}左右。用稀释过的大豆蛋白废水(COD 为 2 000 mg·L^{-1})将反应器加至满池容,开启循环泵使反应器内泥水充分混合,反应 3 d 后,通过蠕动泵将稀释后的废水注入反应器内,使进水有机负荷为 2.5 kg·(m^3·d)$^{-1}$,进行厌氧生物降解。当系统中出水 COD 及系统维持稳定后,逐渐增加进水浓度和进水量,让系统负荷提升,直到进水 COD 增加到原大豆蛋白废水浓度。

EGSB 厌氧反应器的启动过程中 pH 值控制在 6.8 ~ 7.2,温度维持 30 ℃左右,水力停留时间保持在 24 h。

1.4.4　水解酸化-MAP-EGSB 组合工艺处理大豆蛋白废水

考虑到大豆蛋白废水中悬浮物含量较高,对后续生物处理带来严重的影响,因此,本研究拟采用混凝对其进行预处理,再联合水解酸化-MAP-EGSB 处理大豆蛋白废水。实验装置如图 1 所示,预处理后的原水经蠕动泵提升至水解酸化反应池进行酸化反应,出水经溢流堰流入 MAP 沉淀池,反应 20 min 后,进行固液分离,上清液进入 EGSB 反应器进行厌氧生物降解,出水经溢流堰流入出水箱。

实验过程中控制水解酸化阶段水力停留时间为 12 h,pH 值为 7.0;调节 MAP 反应的条件为:反应 pH 值设为 9.5,$n(Mg):n(N):n(P)$ 为 1∶1∶0.8;EGSB 厌氧阶段水力停留时间 24 h,pH 值为 6.8 ~ 7.2,反应过程中温度等设定参数同 1.4。

1.5　分析项目及方法

实验中 COD、BOD_5、TP、TN、PO_4^{3-} 和 NH_4^+-N 等水质指标的测定,均采用国家标准分析方法[16]。

2　结果与讨论

2.1　水解酸化池运行参数的优化

2.1.1　pH 值对水解酸化效果的影响

pH 值是水解酸化过程的主要调控因素[17]。由图 2 可以看出,在 pH 值为 7.0 的条件下,反应时间为 0 ~ 96 h,氨氮释放量呈逐渐上升的趋势;而 pH 值为 4.5 的条件下,当反应时间为 0 ~ 24 h,氨氮释放量呈缓慢上升的趋势,但是当反应时间继续增加时,氨氮的释放受到明显抑制,可能是酸性环境对蛋白质等水解酶产生抑制作用,不利于氨氮的释放。与 pH 值为 7.0 条件下 COD 去除效果相比,酸性条

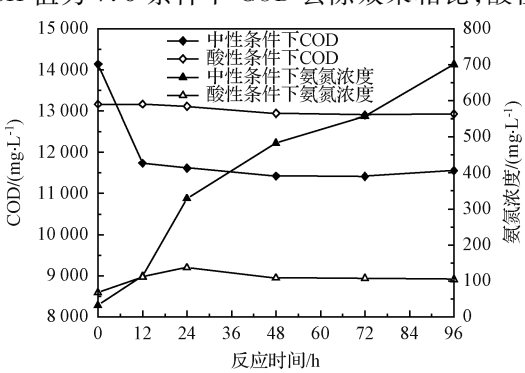

图 2　pH 值对水解酸化效果的影响

Fig. 2　Effect of pH on hydrolysis acidification process

件 COD 去除率较低,可能是 pH 值为 7.0 条件下,一方面有利于微生物降解有机物,另一方面大豆蛋白废水中含有钙、镁等金属离子,它们水解产物主要是氢氧化物沉淀,沉淀物作为晶核或吸附质时,废水中的胶体及细悬浮物较易于被网捕和发生吸附电中和作用。因此,pH 值为 7.0 时水解酸化效果较好。

2.1.2 水力停留时间对水解酸化效果的影响

水力停留时间(HRT)是影响水解酸化最终效果的关键[18]。由图 3 可知,随着 HRT 的延长,COD 去除率呈增加趋势,当 HRT 为 12 h 时,出水 COD 基本无变化,由此表明 12 h 时水解酸化过程基本完成。有研究表明,停留时间过长,会造成有机酸积累,影响水解酸化的连续进行,降低反应速率,也会对后续处理产生不利影响[19],因此,本实验选择水解酸化的最佳 HRT 为 12 h。

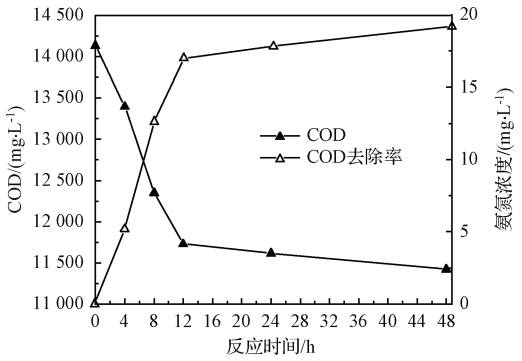

图 3 HRT 对水解酸化效果的影响

Fig. 3 Effect of hydraulic retention time on hydrolysis acidification process

2.2 水解酸化系统运行效果分析

由图 4(a)可知,随着反应时间的延长,COD 缓慢下降,一部分有机物得到去除,当水解酸化 HRT 为 12 h 时,COD 去除率达到最大值,为17.0%。水解酸化运行结束后,废水 B/C 由 0.38 提高到 0.45,可生化性良好。

大豆蛋白废水中含有较多的蛋白质,致使有机氮含量较高,而有机氮的转化主要在水解酸化阶段进行,因此,氨氮的平衡和转化至关重要[20]。由图 4(a)可知,水解酸化过程中,进水氨氮浓度为 88.2 mg·L^{-1},出水氨氮浓度提高至 690 mg·L^{-1},这主要是由于蛋白类物质水解酸化,生成相应的有机酸,释放出氨氮。96 h 后,总氮转化为氨氮的转化率为 95.8%。

由图 4(b)可得,随着水解酸化的运行,磷酸盐占总磷的比例逐渐升高,由 76.2% 增加到 92.2%,这证明水解酸化过程中有机磷被逐步转化为无机磷,但磷酸盐和总磷浓度同步降低,这可能是由于磷酸盐和水样中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子反应生成磷酸盐沉淀物引起的。

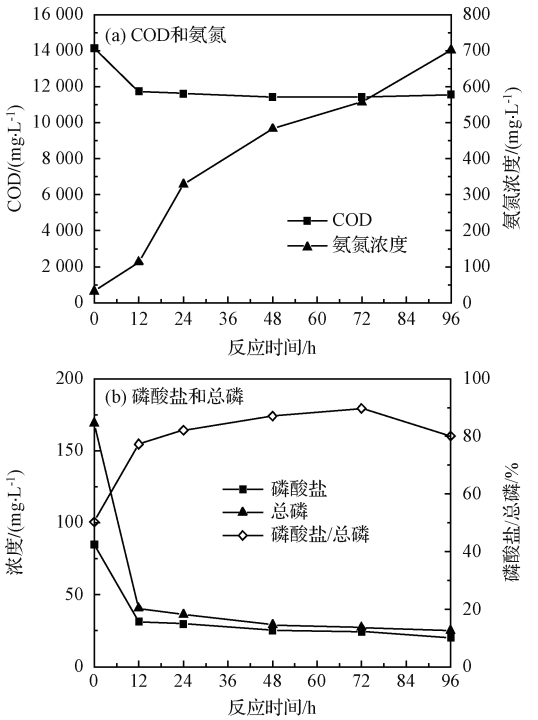

图 4 水解酸化过程中各指标的变化情况

Fig. 4 Variations of COD, NH_4^+-N, phosphate and total phosphorus during hydrolysis acidification process

废水在水解酸化过程中,一部分有机物得到去除,可生化性提高,有机氮和有机磷逐步转化为氨氮和磷酸盐。综上所述,水解酸化系统运行效果较好。

2.3 MAP 法处理高浓度氨氮废水及其工艺运行参数优化

由图 5 可知,n(Mg):n(P)由 1∶1.1 增加到 1∶0.8时,氨氮都得到了较好的去除,且去除率都高于 80.0%,但是氨氮去除率无显著提高,这是由于氧化镁溶解度较小,MAP 反应过程中部分氧化镁会包裹在 MAP 沉淀中,使部分氧化镁未能参与反应。

随着 n(Mg):n(P)由 1∶1.1 增加到 1∶0.8 时,即由 0.91 增加到 1.3,除磷效率得到明显增加。当 n(Mg):n(P)为 1.3 时,磷酸盐的去除率最大,为 76.7%。剩余磷酸盐浓度较低,氨氮去除率达 88.3%,且磷酸铵镁沉淀回收率较高,为 92.4%。磷酸铵镁沉淀可用作复合肥料,实现废物资源化利用。当 n(Mg):n(P)继续增加时,除磷效率无明显变化。

综上所述,当 n(Mg):n(P)由 1∶1.1 增加到

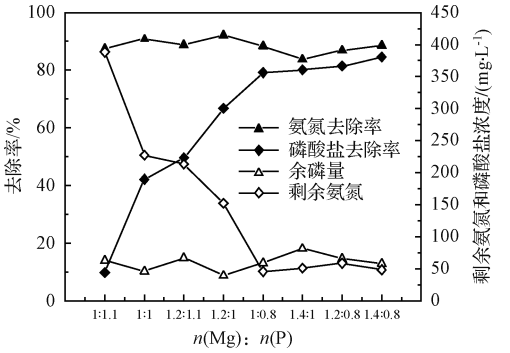

图 5　n(Mg)∶n(P)对氨氮和磷酸盐去除的影响

Fig. 5　Effect of ammonia nitrogen and phosphate of removal efficiencies during magnesium ammonium phosphate precipitation by n(Mg)∶n(P)

1.4∶0.8 时,对氨氮的去除影响较小,而对磷酸盐的去除影响较大,当 n(Mg)∶n(P)为 1.3 时,磷酸盐的去除率最大,且磷酸铵镁沉淀回收率较高,考虑氨氮、磷酸盐处理效果及经济方面等因素,利用 MAP 法处理高浓度氨氮废水的优选条件确定为 n(Mg)∶n(N)∶n(P)为 1∶1∶0.8。

2.4　厌氧实验处理效果

系统经过 3 个月的连续运行,EGSB 厌氧反应器启动过程中 COD 变化情况如图 6 所示。启动初期,COD 的去除率不高,随着活性污泥系统对大豆蛋白废水的适应,5 d 后,COD 去除率高达 70.0%,出水 COD 浓度维持在 800 mg·L^{-1}左右。

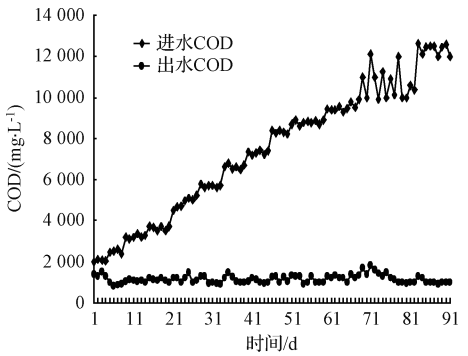

图 6　EGSB 厌氧反应器的进出水 COD 变化情况

Fig. 6　Variation of influent and effluent by EGSB anaerobic reactor

负荷增加阶段,每次增加进水 COD 时,出水 COD 均会出现短暂的升高,分析是由于微生物对废水中高有机负荷的适应过程。适应后出水 COD 很快会维持稳定,出水 COD 稳定在1 000 mg·L^{-1}左右。第 70 天后,系统进入稳定运行期,此阶段进水为大豆蛋白原水,有机负荷达到 9.88 kg·(m^3·d)$^{-1}$,COD 去除率大于 90%,且出水 COD 基本维持在 1 000 mg·L^{-1}左右,反应器内污泥浓度由初始 10.8 g·L^{-1}增加到 15.2 g·L^{-1},在 EGSB 反应器底部仅发现少量破碎的形状不规则的颗粒污泥,多数颗粒污泥为黑色椭圆形或球状,粒径主要分布在 1~3 mm 之间,且沉降性能较好。因此,EGSB 反应器成功启动,且具有较强的抗冲击能力,为后续好氧生物处理奠定了良好的基础。

2.5　水解酸化-MAP-EGSB 组合工艺处理大豆蛋白废水效果分析

系统稳定运行后,各处理单元平均出水水质指标如图 7 所示,COD 得到了较好的去除,去除率为 92.8%,系统的最终出水平均值 COD < 1 100 mg·L^{-1},氨氮 < 50 mg·L^{-1},磷酸盐 < 15 mg·L^{-1},为后续好氧处理提供基础。

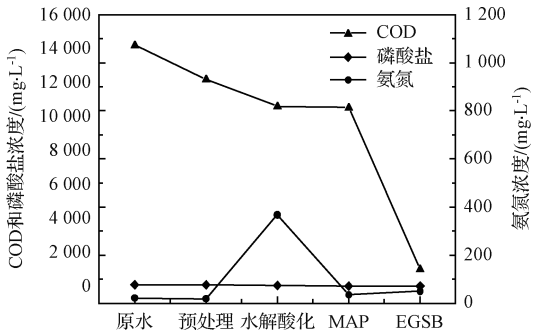

图 7　各处理单元出水水质指标

Fig. 7　COD, Ammonia concentrations and phosphate concentrations in the effluent of different treatment unit

3　结　论

本研究采用水解酸化-MAP 法-EGSB 工艺处理大豆蛋白废水,结果表明水解酸化系统运行较好,最佳运行参数为:水力停留时间为 12 h,最适 pH 为 7.0;利用 MAP 法能有效去除废水中高浓度氨氮,反应优选条件为:n(Mg)∶n(N)∶n(P)为 1∶1∶0.8,此条件下氨氮去除率为 88.3%,磷酸盐去除率为 76.7%,磷酸铵镁沉淀可回收用作复合肥料,实现废物资源化利用;EGSB 反应器经过 3 个月的启动后可稳定运行,有机负荷高达 9.88 kg·(m^3·d)$^{-1}$,COD 平均去除率高于 90%。水解酸化-MAP-EGSB 组合工艺在处理大豆蛋白废水时可获得连续稳定的处理效果,出水平均值 COD < 1 100 mg·L^{-1},氨氮 < 50 mg·L^{-1},磷酸盐 < 15 mg·L^{-1}。以上研究结论为大豆蛋白废水处理提供新的方法,也在一定程度上为工程化应用奠定了理论基础。

参 考 文 献

[1] 孙秀红. UASB + A/O 法处理大豆分离蛋白生产废水效果初探. 北方环境, **2013**, 25(9): 115-117
SUN Xiuhong. The UASB + A/O method of soy protein isolate production wastewater treatment effect. Northern Environment, **2013**, 25(9): 115-117(in Chinese)

[2] 勾怀亮. 大豆分离蛋白生产废水处理工艺优化. 济南: 山东大学硕士学位论文, **2011**
GOU Huailiang. Optimization of isolated soy protein wastewater treatment process. Jinan: Master Dissertation of Shandong University, **2011**(in Chinese)

[3] 韩飞, 刘勇. 中国大豆蛋白产业现状及发展方向. 大豆科技, **2013**(3): 13-16
HAN Fei, LIU Yong. Present status and future view of China soybean protein industry. Soybean Science & Technology, **2013**(3): 13-16(in Chinese)

[4] 亓秋波. 混凝 + IC 工艺处理大豆蛋白废水研究. 济南: 山东大学硕士学位论文, **2014**
QI Qiubo. Research on coagulation-IC reactor process in the treatment of soybean protein wastewater. Jinan: Master Dissertation of Shandong University, **2014**(in Chinese)

[5] 禹寅秋, 齐建华, 史恒欣. 大豆蛋白废水的治理及综合利用. 河南化工, **1998**(9): 29-31
YU Yinqiu, QI Jianhua, SHI Hengxin. The treatment and comprehensive utilization of soybean protein wastewater. Henan Chemical Industry, **1998**(9): 29-31(in Chinese)

[6] ZHU Gefu, LI Jianzheng, WU Peng, et al. The performance and phase separated characteristics of an anaerobic baffled reactor treating soybean protein processing wastewater. Bioresource Technology, **2008**, 99(17): 8027-8033

[7] ZHOU Li, GAO Baoyu, YUE Qinyan. UASB-A/O-BAF treatment of high strength wastewater: A case study for soybean protein wastewater. Desalination and Water Treatment, **2012**, 47(1/2/3): 24-30

[8] 鲍立新, 李建政, 昌盛, 等. ABR 处理大豆蛋白废水的效能及微生物群落动态分析. 环境科学, **2008**, 29(8): 2206-2213
BAO Lixin, LI Jianzheng, CHANG Sheng, et al. Capability and bacteria community analysis of an anaerobic baffled reactor treating soybean wastewater. Environmental Science, **2008**, 29(8): 2206-2213(in Chinese)

[9] SU Kuizu, YU Hanqing. Formation and characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor treating soybean-processing wastewater. Environmental Science & Technology, **2005**, 39(8): 2818-2827

[10] 吕斯濠, 刘力, 王晓玉, 等. 膜技术处理大豆乳清废水的研究. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), **2002**, 18(6): 647-650
LV Sihao, LIU Li, WANG Xiaoyu, et al. Development of treatment of soybean whey waste water by membrane process. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), **2002**, 18(6): 647-650(in Chinese)

[11] 李舟. "预处理-UASB-A/O-BAF"组合工艺处理大豆蛋白废水的研究. 济南: 山东大学博士学位论文, **2014**
LI Zhou. Study of combined pretreatment-UASB-A/O-BAF process in soybean protein wastewater treatment. Jinan: Doctor Dissertation of Shandong University, **2014**(in Chinese)

[12] 蒋和团. 大豆分离蛋白生产废水污染治理的综合分析. 工业水处理, **2010**, 30(4): 77-80
JIANG Hetuan. Synthesis analysis of the pollution treatment of wastewater from soybean protein isolation production. Industrial Water Treatment, **2010**, 30(4): 77-80(in Chinese)

[13] 侯薇, 薛嵘, 孙春玲, 等. 气浮-水解-UASB-两级 A/O 工艺处理大豆蛋白废水. 工业用水与废水, **2010**, 41(1): 88-90
HOU Wei, XUE Rong, SUN Chunling, et al. Soy protein wastewater treatment by air flotation-hydrolysis-UASB-two stage A/O process. Industrial Water & Wastewater, **2010**, 41(1): 88-90(in Chinese)

[14] 孙锦宜. 含氮废水处理技术与应用. 北京: 化学工业出版社, **2003**: 33-35

[15] 吴彦瑜, 彭晓春, 陈志良, 等. MAP 沉淀法去除渗滤液中低浓度氨氮. 环境工程学报, **2013**, 7(3): 925-930
WU Yanyu, PENG Xiaochun, CHEN Zhiliang, et al. Treatment of low concentration ammonium nitrogen in landfill leachate with MAP precipitation. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2013**, 7(3): 925-930(in Chinese)

[16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, **2002**

[17] RODRIGUEZ M., SARRIA V., ESPLUGAS S., et al. Photo-Fenton treatment of a biorecalcitrant wastewater generated in textile activities: Biodegradability of the photo-treated solution. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, **2002**, 151(1/2/3): 129-135

[18] 郑志伟, 呼世斌, 贺小荣, 等. 水解酸化-SBR 工艺处理果汁废水的研究. 环境工程学报, **2007**, 1(12): 47-50
ZHENG Zhiwei, HU Shibin, HE Xiaorong, et al. Study on treatment of syrup wastewater with hydrolysis acidification-SBR technology. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2007**, 1(12): 47-50(in Chinese)

[19] 喻尧. 水解酸化预处理乳品废水与造纸废水的效果研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文. **2006**
YU Yao. Study on the pretreatment for dairy wastewater and paper making wastewater by hydrolysis and acidification. Harbin: Master Dissertation of Harbin Institute of Technology, **2006**(in Chinese)

[20] 冯津津, 李晓红, 曾萍, 等. 采用水解酸化-复合好氧处理制药工业废水的工艺评价. 环境工程学报, **2015**, 9(3): 1043-1048
FENG Jinjin, LI Xiaohong, ZENG Ping, et al. Evaluation of pharmaceutical industrial wastewater treatment by composite hydrolyze acidification-composite aerobic process. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2015**, 9(3): 1043-1048(in Chinese)