



# 高浓度淀粉废水处理研究进展

何文文, 霍荣帆, 李 强, 陈正军

(甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃兰州 730070)

**[摘要]** 淀粉废水是淀粉生产加工过程中产生的有机废水。该类废水有机物含量丰富、COD 高、水质复杂。据统计, 2018 年中国淀粉年产量达 2 700 万 t, 可产生约 7 900 万 t 淀粉废水。淀粉废水如直接排放或处理不当, 会造成水资源的浪费, 同时导致周围水体和土壤的污染, 对人类生活与环境构成威胁。淀粉废水的处理已成为淀粉加工行业亟待解决的难题之一。目前淀粉废水处理相关研究主要为资源化利用与传统处理工艺改进等, 对高浓度淀粉废水综合处理的研究较少。对高浓度淀粉废水的研究趋势、废水类型、水质特点、处理方法等进行综述, 并归纳总结了物理、化学、生物方法及组合工艺的处理效果和优缺点, 以期为高浓度淀粉废水类似研究提供一定参考, 减少此类废水对环境的污染。

**[关键词]** 淀粉废水; 食品加工废水; 废水综合处理

**[中图分类号]** X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)04-0016-08

## Research progress of high concentration starch wastewater treatment

HE Wenwen, HUO Rongfan, LI Qiang, CHEN Zhengjun

(College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Starch wastewater is a type of organic wastewater generated from starch production process, which is rich in organic matter, high COD and complex water quality. According to statistics, the annual output of starch in China reached 27 million tons in 2018, which can generate about 79 million tons of starch wastewater. When starch wastewater is directly discharged or improperly treated, it will cause waste of water resources, as well as pollution of surrounding water and soil, posing a threat to human life and environment. The treatment of starch wastewater has become one of the urgent problems in starch processing industry. At present, researches related to starch wastewater mainly focus on resource utilization and traditional process improvement, etc., and there is little research on comprehensive treatment of high concentration starch wastewater. The research trends, wastewater types, water characteristics and treatment methods of high concentration starch wastewater were reviewed. And the treatment effects, advantages and disadvantages of physical, chemical and biological methods and combined processes were summarized. It hopes to provide some reference for similar research on high concentration starch wastewater and reduce the environmental pollution of starch wastewater.

**Key words:** starch wastewater; food processing wastewater; comprehensive treatment of wastewater

淀粉废水是一种典型的食品加工废水, 无毒且营养物丰富<sup>[1]</sup>。此类废水产量大, 若直接排放会造成水资源浪费与环境污染。近年来, 关于淀粉废水处理的研究主要集中在废水资源化利用(如生产酯类物质<sup>[2]</sup>、蛋白质回收<sup>[3]</sup>、生产维生素<sup>[4]</sup>与生物农药<sup>[5]</sup>、生物制氢<sup>[6]</sup>、开发生物絮凝剂<sup>[7]</sup>等)、传统淀粉

废水处理工艺改良(如参数优化<sup>[8]</sup>、装置改进<sup>[9]</sup>等)以及新型淀粉废水处理方法的开发(如管式电反应器法<sup>[10]</sup>、藻类生物转化<sup>[11]</sup>等), 并取得一定研究成果。但对高浓度淀粉废水综合处理的研究仍较缺乏。笔者对高浓度废水的研究进展进行了总结, 指出高浓度淀粉废水的合理化利用与废水净化的统

**[基金项目]** 甘肃省高等学校创新创业能力提升项目(2019B-074); 甘肃省自然科学基金(20JR10RA517); 甘肃农业大学公招博士科研启动基金(2017RCZX-25)

一是未来研究方向之一,以期为提高淀粉加工企业经济效益、促进环境友好型产业稳健发展提供一定理论依据。

1 高浓度淀粉废水处理研究情况

目前高浓度淀粉废水仍是工业废水中处理难度较大的一类废水。根据 Web of Science 检索结果可知淀粉废水处理相关文章逐年增加。在淀粉废水处理研究领域,中国研究者发表论文数量占比 34.38%,居世界第一位,印度占 11.61%,巴西占 7.8%。

我国对淀粉废水的研究主要集中在 6 种典型高浓度淀粉废水,如表 1 所示。

表 1 不同类型淀粉废水的性质

Table 1 Properties of different types of starch wastewater

废水类型	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	BOD/(mg·L <sup>-1</sup> )	SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	文献
马铃薯淀粉废水	20 000~45 000	9 000~18 000	~1 800	[12]
甘薯淀粉废水	10 000~30 000	~20 000	2 500~3 000	[13]
红薯淀粉废水	5 000~10 000	—	2 000~3 000	[14]
玉米淀粉废水	8 000~15 000	—	1 000~3 000	[15]
小麦淀粉废水	10 000~14 000	8 000~18 000	~4 000	[16]
木薯淀粉废水	6 000~12 000	—	5 000~6 000	[17]

由表 1 可见,这些淀粉废水含有丰富的营养物质,COD、BOD、SS 很高,是处理难度较大的一类工业废水。在实际生产中,淀粉废水产量大、COD 负荷高,一般需要规模化处理且成本高;淀粉废水的温度一般较低,而低温会延缓工艺启动时间,影响处理性能。此外,薯类作物一般为季节性收获,其产品及废弃物也具有间断产生的特点,导致淀粉废水的水质水量不稳定,影响设备的稳定运行;其中马铃薯淀粉废水伴随大量泡沫,严重影响设备的正常运行,增加处理难度。因此,根据淀粉废水处理难度的不同<sup>[18]</sup>,逐渐形成多元的淀粉废水处理方法<sup>[19]</sup>。

2 物理法

采用物理法处理淀粉废水相对简单,主要通过物理作用分离淀粉废水的各成分,其优点在于无需维持生物过程所需环境,且运行成本低、操作简单,不需要投入大量前期资金<sup>[20]</sup>。在淀粉废水处理过程中,物理法具有不可替代的作用,能够迅速去除不溶性污染物和部分有机物,对 COD 的去除效果明显。物理法处理淀粉废水的原理如图 1 所示。

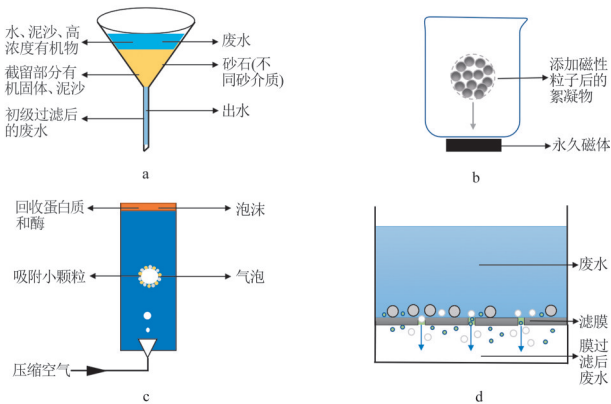


图 1 物理法处理淀粉废水的原理

Fig. 1 Mechanism of physical method of starch wastewater

2.1 砂滤法

砂滤法是比较原始的废水处理方法[见图 1(a)]。砂滤器自 19 世纪即用于废水处理,操作简单,可低成本去除有机固体<sup>[21]</sup>。V. K. BOSAK 等<sup>[22]</sup>采用砂滤器处理马铃薯淀粉废水,总固体悬浮物(TSS)去除率≥69%,BOD<sub>5</sub>可降低 77% 以上,TP 去除率≥71%。但由于淀粉废水中的悬浮物粒径不同,若长期运行砂滤器可能导致间隙阻塞,因此需通过改良过滤介质提升过滤精度,延长砂滤器的稳定运行时间,强化该方法在废水处理中的应用。

2.2 磁絮凝法

磁絮凝法是一种新兴的废水处理技术,与传统絮凝工艺相比,具有处理量大、效率高、设备简单紧凑、占地面积小等优点。磁絮凝处理淀粉废水原理如图 1(b)所示,磁粉作为絮凝核体,在磁力作用下形成紧密结实的絮体,不易打散,除浊效果好,可减轻后续处理的负荷,减少工程成本<sup>[23]</sup>。含铁矿物是淀粉和磷酸盐良好的天然吸附剂,通过磁选技术可分离出具有吸附淀粉和磷酸盐能力的核壳磁种子<sup>[24]</sup>。Chunjie DU 等<sup>[25]</sup>通过硫化焙烧法制备磁性种子,采用磁絮凝工艺去除废水中的超细 HAP 粒子,在 PFS(30 mg/L)与磁性种子(7.5 g/L)的协同作用下,废水中的浊度、总磷、有机质含量均显著降低。磁铁矿及其改性产物作为水介质吸附剂得到广泛应用。但在规模化应用中,搭建磁场需要额外成本,如后续处理采用生物法,磁场还将影响微生物活性。

磁絮凝从常规絮凝法发展而来,其发展不仅受到磁技术的限制,还受絮凝剂的制约,发展磁絮凝技

术需要更多研发投入。

### 2.3 泡沫分离法

泡沫分离法是用泡沫浓缩表面活性物质的废水处理办法<sup>[26]</sup>〔见图 1(c)〕,常用于蛋白质和酶的回收<sup>[27]</sup>。Taihua MU 等<sup>[28]</sup>设计了一种斜泡分离柱,可有效回收地瓜淀粉废水中的蛋白质。此外,Zongmin LIU 等<sup>[29]</sup>设计了从马铃薯淀粉生产废水回收马铃薯脯氨酸的两段泡沫分离工艺,并确定最佳工艺条件。泡沫分离技术是一种经济高效的淀粉废水处理技术,同时能较好地对淀粉废水进行资源化利用,与其他方法配合使用时可提高资源化利用的程度。但其处理效果受温度影响严重且后续需消泡处理,很大程度上局限了在废水处理中的应用。

### 2.4 膜过滤法

膜过滤法在膜两侧压差作用下,利用各组分在膜中传质的选择性差异,对多组分进行分离、分级、提纯、富集〔见图 1(d)〕。B. CANCINO-MADARIAGA 等<sup>[30]</sup>采用沉淀、微滤与反渗透联合去除玉米淀粉洗涤废水中的固体颗粒,结果表明,排水中的 BOD<sub>5</sub> 降至 31.2 mg/L。膜处理法对环境友好,一般不会造成二次污染。MBR 的应用能提高活性污泥的利用效率,增强微生物对废水的处理效果。膜过滤法对废水的化学性质不产生影响,是一种绿色的清洁技术。研发新型高精度滤膜,有目的地分离所需物质,减少膜污染是该方法的发展趋势。

## 3 生物法

生物法直接利用微生物的代谢循环降解废水中的有机物,达到净化污水的目的,其原理如图 2 所示。

生物法包括好氧生物处理法、厌氧生物处理法

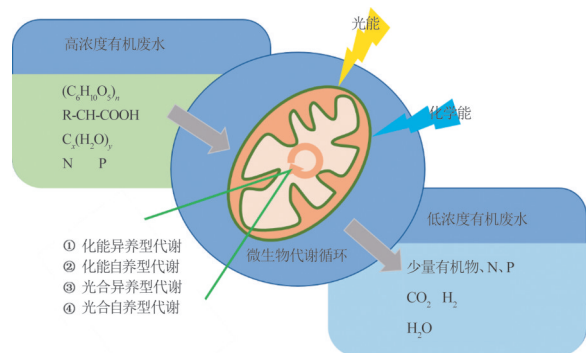


图 2 生物法处理淀粉废水的机理

Fig. 2 Mechanism of biological treatment of starch wastewater

和光合细菌法。常见的好氧生物处理法有生物塘法、生物接触氧化法和序批式活性污泥法(SBR);厌氧生物处理法有升流式厌氧污泥床(UASB)、厌氧流化床(AFB)、厌氧接触消化法(ACP)、厌氧折流板反应器(ABR)和厌氧滤池(AF)。此外,微生物燃料电池(MFC)<sup>[30]</sup>和微生物电解池(MEC)<sup>[31]</sup>作为新型有机废物处理技术逐渐受到关注。在众多淀粉废水处理反应器中,UASB 常被用于工业淀粉废水的处理,是迄今各废水厌氧处理的最佳选择<sup>[32]</sup>。

### 3.1 UASB

UASB 兼具废水处理与产气功能。山东某小麦淀粉加工厂采用 UASB 反应器处理高浓度小麦淀粉废水,同时生产沼气,处理效果良好<sup>[33]</sup>。UASB 虽然是目前最流行的规模化淀粉废水处理工艺,但仍存在配水不均匀、抗冲击负荷能力低、SS 去除效果不佳等问题<sup>[9]</sup>。针对这些问题,优化运行条件、创新反应器设计能进一步提升 UASB 的处理效果。

### 3.2 EGSB 与 AnaEG

膨胀颗粒污泥床(EGSB)是基于 UASB 改进的厌氧处理技术之一,近年来在淀粉废水处理中受到越来越多关注<sup>[34]</sup>。Wanqian GUO 等<sup>[35]</sup>开发了基于生物膜的 EGSB 反应器处理含淀粉废水,并通过混合微生物培养回收氢气。Chunjie LI 等<sup>[36]</sup>发明了一种结合 UASB 和 EGSB 优点的厌氧膨胀颗粒污泥床(AnaEG),可克服现有反应器水力负荷低、混合效果差、易短流的缺点<sup>[37]</sup>。Xianchao QIN 等<sup>[38]</sup>采用 AnaEG 处理淀粉加工废水,对其运行性能和微生物群落结构进行评价。结果表明,在长期进水水质不稳定的情况下,AnaEG 仍能保持稳定的处理效率,且主要反应区位于反应器底部,主要污染物去除率 >90%。AnaEG 为 UASB 工艺的创新,能够高效分解有机污染物,显著降低能耗,在淀粉废水规模化处理中有望取代 UASB 工艺。

### 3.3 光合细菌法

相比于各种反应器,光合细菌法(PSB)无需设定和提供特定环境条件,可直接进行废水处理,是一种环境友好的可持续处理技术<sup>[39]</sup>。P. PRACHANURAK 等<sup>[40]</sup>采用内溢流再循环的光生物反应器处理高浓度发酵淀粉废水,BOD<sub>5</sub> 和 COD 平均去除率分别为 95%、88%。Haifeng LU 等<sup>[39]</sup>将苹果酸引入 PSB 废水处理过程,通过协同代谢加速淀粉降解。结果表明,苹果酸质量浓度为 700 mg/L 时淀粉去除率可提高

9.8倍,COD减少95.0%,生物质产率达到1.02。PSB 生物质比活性污泥更清洁,且无毒<sup>[41]</sup>。PSB 结合微生物固定化技术能进一步加强光合细菌对淀粉废水的处理效果,拓宽其应用范围。

### 3.4 MFC与MEC

在生物法处理过程中,有些微生物可利用有机废弃物同时伴随高附加值产品产生。MFC和MEC填补了废水处理过程中附加值产品有效利用的空缺,使电化学系统得到更有效的应用。

MFC能通过氧化有机物产生电能,作为独特的能量回收方式被用于废水处理与产电研究中,是一种有吸引力的废水处理替代方案<sup>[42]</sup>,受到越来越多关注<sup>[43]</sup>。E. HERRERO-HERNANDEZ等<sup>[44]</sup>以大肠杆菌为活性细菌组分,马铃薯提取物合成废水为能源,研制一种无介质MFC,使用镀铂钛条阳极和网状结构阴极获得高功率密度(502 mW/m<sup>2</sup>)。除发电外,MFC还能有效处理废水,降低61%的废水初始需氧量。MEC理论上具有将任何生物降解废物转化为H<sub>2</sub>的潜力,逐渐得到研究者的关注。P. KHONGKLIANG等<sup>[45]</sup>以木薯淀粉加工废水为研究对象,在两步高温暗发酵和微生物电解、HRT为48 h条件下,氢气产量最高为182 mL/g,COD去除率最高为58%。

MFC和MEC需要消耗昂贵的阴阳极材料,经济成本较高,难用于规模化废水处理,需将电化学工艺与其他工艺进行组合处理。生物电化学系统是淀粉废水处理的新方法,为探索废水处理方法提供了多种可能。

## 4 物理化学法

### 4.1 混凝沉淀法

混凝沉淀法是一种常用的物理化学废水处理方法,可用于淀粉废水处理<sup>[46]</sup>,能为废水后续处理减轻负担。其效率取决于原水性质、混凝剂与助凝剂的种类及数量、废水pH和凝结时间<sup>[47]</sup>。无机/有机复合混凝剂因优异性能近年来也受到广泛关注。但不可生物降解的合成聚合物的大量应用,对环境产生负面影响<sup>[48]</sup>。采用混凝沉淀法处理淀粉废水时,前期实验条件非常重要,在优化条件下才能使混凝剂发挥最佳效果。

### 4.2 絮凝沉淀法

传统的絮凝剂对动物和环境均有一定不良影响,在废水处理领域中的应用并不理想<sup>[49]</sup>。微生物生长和细胞裂解过程中分泌的生物絮凝剂(MBF)

具有可生物降解和无害特性,近年来被认为是解决水生生物毒性和环境污染的潜在方法之一<sup>[50]</sup>。Junyuan GUO等<sup>[51]</sup>制备了生物絮凝剂并用于马铃薯淀粉废水处理,生物絮凝剂投加量为30 mg/L、pH为7.5时,COD去除率可达52.4%,浊度去除率为81.7%。N. JOSHI等<sup>[52]</sup>对肺炎克雷伯菌NJ7菌株进行分离筛选以生产生物絮凝剂,并用于淀粉加工废水的絮凝。结果表明,该絮凝剂可降低41%的COD和90%的浊度。从目前研究方向来看,使用廉价培养基分离、筛选絮凝微生物是该方法研究的趋势。

## 5 组合工艺

对于淀粉废水,单一的处理技术很难使其达到排放标准<sup>[53]</sup>。组合工艺集成了不同工艺的优点,可更彻底地处理淀粉废水。厌氧—好氧组合工艺适应性强、处理效果良好,但启动时间较长。随着淀粉废水处理方法的多元化,组合工艺呈现出不同工艺多级联合处理的新趋势。多级组合工艺的流程化模式见图3。

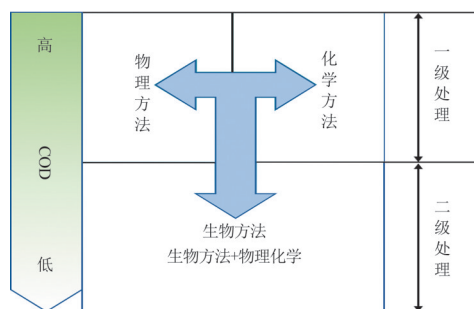


图3 组合工艺结构

Fig. 3 Structure of combined process

针对高COD淀粉废水,首先进行一级处理,优先选择物理-化学联合方法,可高效降低有机负荷,去除大部分有机污染物,提高废水可生化性,为后续生物处理提供便捷。二级处理为一级处理后对淀粉废水进行深度处理的过程,一般采用生物法或多方法联合,可实现淀粉废水的资源化利用,进一步消耗废水中的有机物,使COD降到标准要求。

实际生产中淀粉废水的处理比较复杂。对于高浓度淀粉废水,物理方法的组合对COD有明显去除效果。杜新贞等<sup>[54]</sup>采用实验室模拟法联合混凝沉淀—泡沫分离—吸附技术处理马铃薯淀粉废水。结果表明,COD总去除率为80.1%,工艺操作简单、效果好。生物法与化学法组合可实现预处理与后处理的有机统一,增强对高浓度淀粉废水的全

面处理效果。S. VLADIMIR 等<sup>[55]</sup>采用生物化学结合方法处理高浓度淀粉废水(COD 为 20 g/L、总氮为 1 g/L、总磷为 0.4 g/L),总 COD 去除率达 77%~93%,废水碳氮比达(4~5):1。J. FETTIG 等<sup>[56]</sup>采用溶气浮选、膨胀颗粒污泥床(EGSB)厌氧降解和垂直流人工湿地好氧后处理相结合的中试装置处理木薯淀粉废水,整合多工艺的的优点,实现组合工艺对淀粉废水的综合处理。

组合工艺是各处理工艺不断发展而出现的高效处理方法,能根据实际生产的处理需求,设计合适的工艺流程,极致发挥单个工艺在组合中的优势,实现废水处理效益最大化。未来研究中,组合工艺将是淀粉废水处理的主流工艺,也是废水处理与资源化有机统一的高效方法。

## 6 高浓度淀粉废水的资源化利用

目前淀粉废水处理面临的共同问题在于投资费用大、运行成本高,很难达到预期的效果。淀粉废水资源化利用是在处理污染物的基础上产生经济价值,将降低废水处理工艺的资金投入,缓解淀粉加工企业生产投资方面的压力。淀粉废水资源化利用的方式有发展生态农业、回收有效组分、培养絮凝微生物和生产新能源等。

### 6.1 发展生态农业

淀粉废水主要含有淀粉、糖类、蛋白质、脂肪、氮、磷等营养物质,且不含病原体等有毒有害物质<sup>[57]</sup>。通过合理的控制手段使营养物回流农田,是淀粉废水资源化利用的形式之一。一定量的淀粉废水营养物对农作物具有促进生长作用。赵博超等<sup>[58]</sup>研究了马铃薯淀粉废水还田对土壤肥力的影响。结果表明,马铃薯淀粉废水在增加土壤肥力的同时,不会导致农田土壤重金属含量显著变化,具有处理量大、操作过程简单、有机物质降解完全的优点。但处理过程所需时间长、效率低且占地面积较大,同时需要技术保障,以免处理过程中对地下水造成污染,即利用淀粉废水发展生态农业需把握好处理与利用的尺度。

### 6.2 蛋白质回收

蛋白质回收是淀粉废水处理研究中的热点。常见的蛋白质回收方法有泡沫分离法、膜分离法、絮凝法及综合处理法等<sup>[59]</sup>。其中,泡沫分离法和膜分离法对环境友好,简单高效,但后续处理成本高;絮凝

法回收效率高,但缺乏对新型、高效、安全、环保廉价絮凝剂的研究。根据淀粉废水类型选择匹配的蛋白质回收工艺,可以最大限度地节约成本,提高回收效率,降低淀粉废水对环境的污染。

### 6.3 絮凝微生物培养

淀粉废水有机物含量高,氮磷及其他营养物充足、毒性小,是培养微生物的理想基质<sup>[60]</sup>。Sheng-yan PU 等<sup>[61]</sup>采用淀粉废水培养絮凝微生物,不仅大幅降低微生物的培养成本,产生的微生物絮凝剂还可用于淀粉废水中蛋白质的回收。这种内循环式淀粉废水资源化利用方法降低了回收淀粉废水中蛋白质的成本,与其他回收蛋白质的絮凝法相比,避免外来物质的引入,杜绝淀粉废水二次污染的可能性。将淀粉废水培养微生物和回收蛋白质有机统一是提高淀粉加工企业经济效益的有效方法。

### 6.4 新能源生产

淀粉废水有机物含量丰富,可作为产能微生物的营养源生产能源气体,比较普遍的是通过淀粉废水发酵产甲烷。甲烷是沼气的主要成分,可作为日常生活燃料。C. WATTANASILP 等<sup>[62]</sup>通过模型分析了木薯淀粉废水沼气利用途径的可行性。结果表明,选择合适的沼气技术不仅能减少废水的环境问题,还可生产可再生能源。也有研究对木薯淀粉废水进行预处理,以提高产甲烷效率<sup>[63]</sup>。此外,淀粉废水也可用来生产氢气。N. SINBUATHONG 等<sup>[64]</sup>将热处理后 COD 为 20 000 mg/L 的淀粉废水与微生物混合发酵制氢。随着生物电化学系统的发展,MFC 和 MEC 以淀粉废水为底物产电或产氢<sup>[65]</sup>,作为淀粉废水资源化利用的新形式逐渐被人们熟知。

### 6.5 其他方式

利用低成本原料生产生物化学产品是一种有吸引力的选择。通过微生物的特殊代谢途径获取有价值的副产物是淀粉废水资源化利用的有效方法。常见的副产物有油脂、多糖和维生素等<sup>[66]</sup>。杜鹃等<sup>[67]</sup>研究获取了一株产油能力强的微生物,以甘薯淀粉废水为原料进行发酵,粗脂肪产量可达 9 g/L,同时出水 COD 去除率最高可达 87%。此外,淀粉废水也可用于污染土壤的修复。Zhen HAN 等<sup>[68]</sup>发现淀粉废水能为石油的生物降解提供营养,提高生物降解率,为石油污染土壤的修复提供廉价的生物化学方法。开发更多利用淀粉废水的可培养微生物能够开

拓淀粉废水资源化利用的方式,为淀粉废水处理提供更加经济高效的方法。

## 7 结语

随着研究者对淀粉生产工艺和废水资源化利用研究的不断深入,淀粉废水处理方式日益多样化。单一废水处理方式已无法达到预期效果,多工艺联合处理方法能很大程度上提高废水处理效果,改善淀粉废水对环境的污染。同时,有些处理方法不仅能处理淀粉废水,还可从中生产附加值产品。

未来高浓度淀粉废水处理的研究应从两方面出发,提高处理效率和资源化利用:(1)对废水处理工艺进行创新,并探索不同工艺组合的多种可能性,使组合工艺性能发挥最佳。(2)淀粉废水资源化利用方式较多,采用淀粉废水培养絮凝微生物回收蛋白质是一种高效的资源回收方式。未来的研究可尝试分离筛选更多能利用淀粉废水的功能菌株,使淀粉废水资源利用更加多元化。淀粉废水的资源化利用可减轻淀粉生产企业废水处理的负担,高效的资源利用与COD降解是淀粉废水综合处理的最新趋势,有望取代传统的废水处理方式,为资源回收和环境保护提供新思路。

### 参考文献

- [1] TAN Xiaobo, ZHAO Xianchao, YANG Libin. Strategies for enhanced biomass and lipid production by *Chlorella pyrenoidosa* culture in starch processing wastewater[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 236:117671.
- [2] SINAELI N, ZARE D, AZIN M. Production and characterization of poly 3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate in wheat starch wastewater and its potential for nanoparticle synthesis[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2021, 52(2):561-573.
- [3] LI Hongbin, ZENG Xianhua, SHI Wenying, et al. Recovery and purification of potato proteins from potato starch wastewater by hollow fiber separation membrane integrated process[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 63:102380.
- [4] ZHANG Chao, REN Huixue, ZHONG Chuanqing. Economical production of vitamin K<sub>2</sub> using wheat starch wastewater[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 270:122486.
- [5] NDAO A, KUMAR L R, TYAGI R D, et al. Biopesticide and formulation processes based on starch industrial wastewater fortified with soybean medium[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2020, 55(2):115-126.
- [6] WADJEAM P, REUNGSANG A, IMAI T, et al. Co-digestion of cassava starch wastewater with buffalo dung for bio-hydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(29):14694-14706.
- [7] NGUYEN N T, PHAN T H M, TRAN T N, et al. Production of novel bio-flocculants from *Klebsiella variicola* BF<sub>1</sub> using cassava starch wastewater and its application[J]. *Current Science*, 2019, 117(1):121.
- [8] 何宏,郭盛楠,程国玲,等. SBR法处理模拟淀粉废水参数优化的研究[J]. *山东化工*, 2019, 48(3):177-178.  
HE Hong, GUO Shengnan, CHENG Guoling, et al. Effect of oxidation on the performance of the SBR for treating simulated starch wastewater[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2019, 48(3):177-178, 180.
- [9] 张波浪,孙根行,路建萍,等.改进厌氧反应器处理淀粉废水[J]. *水处理技术*, 2013, 39(9):69-72.  
ZHANG Bolang, SUN Genxing, LU Jianping, et al. Starch wastewater treatment by improved anaerobic reactor[J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(9):69-72.
- [10] 董家利,修莺萌,孙冰心.管式反应器处理淀粉废水的研究[J]. *黑龙江水利科技*, 2020, 48(11):18-20.  
DONG Jiali, XIU Yingmeng, SUN Bingxin. Study on treatment of starch wastewater in tubular reactor[J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2020, 48(11):18-20.
- [11] MOHD UDAIYAPPAN A F, ABU HASAN H, TAKRIFF M S, et al. A review of the potentials, challenges and current status of microalgae biomass applications in industrial wastewater treatment[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2017, 20:8-21.
- [12] 冀保程.马铃薯淀粉废水中蛋白质回收利用现状研究[J]. *资源节约与环保*, 2018(3):112.  
JI Baocheng. Study on the status of protein recycling in potato starch wastewater[J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2018(3):112.
- [13] 崔春月,刘仁长,郑庆柱.超滤+纳滤回收甘薯淀粉加工废水中多糖的中试研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(5):238-241.  
CUI Chunyue, LIU Renchang, ZHENG Qingzhu. Pilot study on saccharides recovery from sweet potato starch processing wastewater by combined process of ultrafiltration and nanofiltration[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(5):238-241.
- [14] 方降龙,海子彬,谢显传,等.农村红薯淀粉低污染生产模式探讨[J]. *现代农业科技*, 2014(18):213-214.  
FANG Xianglong, HAI Zibin, XIE Xianchuan, et al. Discussion on a less polluting mode of rural sweet potato starch production[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2014(18):213-214.
- [15] 王艳,吕维华,姜红波,等.淀粉废水处理技术研究进展[J]. *应用化工*, 2010, 39(10):1568-1573.  
WANG Yan, LÜ Weihua, JIANG Hongbo, et al. Research progress on starch wastewater treatment process[J]. *Applied Chemical Industry*, 2010, 39(10):1568-1573.
- [16] 陶令霞.小麦淀粉生产废水资源化及处理技术研究[J]. *海峡科技与产业*, 2020(2):68-70.  
TAO Lingxia. Research on wheat starch production wastewater re-

- sourceization and treatment technology[J]. Technology and Industry Across the Straits, 2020(2):68-70.
- [17] 韦科陆, 杨灼萍. “UASB+SBR”工艺在木薯淀粉废水中的应用[J]. 环保科技, 2020, 26(5):8-11.
- WEI Kelu, YANG Zhuoping. Application of “UASB + SBR” process in cassava starch wastewater treatment [J]. Environmental Protection and Technology, 2020, 26(5):8-11.
- [18] 柴社立, 宋若海, 李清泉, 等. 多阶段水解-好氧工艺处理淀粉废水的研究[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(3):266-270.
- CHAI Sheli, SONG Ruohai, LI Qingquan, et al. Starch wastewater treatment by multi-stage hydrolytic-aerobic processes[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000, 30(3):266-270.
- [19] 郭晓娅, 年跃刚, 闫海红, 等. 淀粉废水资源化利用现状与应用前景[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(2):117-126.
- GUO Xiaoya, NIAN Yuegang, YAN Haihong, et al. Current status and application prospect of resource utilization of starch wastewater [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(2):117-126.
- [20] SARGOLZAEI J, MOGHADDAM A H, SHAYEGAN J. Statistical assessment of starch removal from starchy wastewater using membrane technology [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2011, 28(9):1889-1896.
- [21] GAUR R S, CAI Ling, TUOVINEN O H, et al. Pretreatment of Turkey fat-containing wastewater in coarse sand and gravel/coarse sand bioreactors [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(3):1106-1110.
- [22] BOSAK V K, VANDERZAAG A C, CROLLA A, et al. Treatment of potato farm wastewater with sand filtration [J]. Environmental Technology, 2016, 37(13):1597-1604.
- [23] 吴健, 张金流, 海子彬, 等. 磁絮凝法预处理红薯淀粉废水的试验研究[J]. 蚌埠学院学报, 2017, 6(6):46-50.
- WU Jian, ZHANG Jinliu, HAI Zibin, et al. Study on pretreatment of sweet potato starch wastewater by magnetic flocculation [J]. Journal of Bengbu University, 2017, 6(6):46-50.
- [24] DU Chunjie, YU Jinsheng, SUN Wei, et al. Purification of starch and phosphorus wastewater using core-shell magnetic seeds prepared by sulfated roasting[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 81:4-16.
- [25] DU Chunjie, HU Yuehua, HAN Haisheng, et al. Magnetic separation of phosphate contaminants from starch wastewater using magnetic seeding [J]. Science of the Total Environment, 2019, 695:133723.
- [26] STOWERS C C, MAKAROV V, WALKER A, et al. Effect of air flow rate on the foam fractionation of a mixture of egg white and egg yolk [J]. Asia - Pacific Journal of Chemical Engineering, 2009, 4(2):180-183.
- [27] HOSSAIN M M, FENTON G. Concentration of proteins from single component solution using a semibatch foaming process[J]. Separation Science and Technology, 1998, 33(11):1703-1721.
- [28] MU Taihua, LIU Ying, ZHANG Miao, et al. Protein recovery from sweet potato starch wastewater by foam separation [J]. Separation Science and Technology, 2014, 49(14):2255-2260.
- [29] LIU Zongmin, WU Zhaoliang, LI Rui, et al. Two-stage foam separation technology for recovering potato protein from potato processing wastewater using the column with the spiral internal component [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 114(2):192-198.
- [30] CANCINO - MADARIAGA B, AGUIRRE J. Combination treatment of corn starch wastewater by sedimentation, microfiltration and reverse osmosis [J]. Desalination, 2011, 279(1/2/3):285-290.
- [31] RABAEY K, VERSTRAETE W. Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation [J]. Trends in Biotechnology, 2005, 23(6):291-298.
- [32] JING Zhaoqian, HU Yong, NIU Qigui, et al. UASB performance and electron competition between methane-producing Archaea and sulfate-reducing bacteria in treating sulfate-rich wastewater containing ethanol and acetate [J]. Bioresource Technology, 2013, 137:349-357.
- [33] TAN Xiaobo, CHU Huaqiang, ZHANG Yalei, et al. Chlorella pyrenoidosa cultivation using anaerobic digested starch processing wastewater in an airlift circulation photobioreactor [J]. Bioresource Technology, 2014, 170:538-548.
- [34] FANG Cheng, BOE K, ANGELIDAKI I. Biogas production from potato-juice, a by-product from potato-starch processing, in up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) and expanded granular sludge bed (EGSB) reactors [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(10):5734-5741.
- [35] GUO Wanqian, REN Nanqi, CHEN Zhaobo, et al. Simultaneous biohydrogen production and starch wastewater treatment in an acidogenic expanded granular sludge bed reactor by mixed culture for long-term operation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(24):7397-7404.
- [36] LI Chunjie, TABASSUM S, ZHANG Zhenjia. An advanced anaerobic expanded granular sludge bed (AnaEG) for the treatment of coal gasification wastewater [J]. RSC Adv, 2014, 4(101):57580-57586.
- [37] 杨卫, 李孟, 闫爱萍. 脉冲水解/EGSB/倒置 A<sup>2</sup>/O 工艺处理玉米淀粉废水 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(18):95-97.
- YANG Wei, LI Meng, YAN Aiping. Combined process of impulse hydrolysis acidification, EGSB and inverted A<sup>2</sup>/O for corn starch wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(18):95-97.
- [38] QIN Xianchao, WU Xiaogang, LI Lingfang, et al. The advanced anaerobic expanded granular sludge bed (AnaEG) possessed temporally and spatially stable treatment performance and microbial community in treating starch processing wastewater [J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9:589.
- [39] LU Haifeng, ZHANG Guangming, LU Yufeng, et al. Using co-

- metabolism to accelerate synthetic starch wastewater degradation and nutrient recovery in photosynthetic bacterial wastewater treatment technology[J]. *Environmental Technology*, 2016, 37(7): 775-784.
- [40] PRACHANURAK P, CHIEMCHAI SRI C, CHIEMCHAI SRI W, et al. Biomass production from fermented starch wastewater in photo-bioreactor with internal overflow recirculation[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 165:129-136.
- [41] MUÑOZ R, GUIEYSSE B. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review[J]. *Water Research*, 2006, 40(15):2799-2815.
- [42] DU Zhuwei, LI Haoran, GU Tingyue. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy[J]. *Biotechnology Advances*, 2007, 25(5): 464-482.
- [43] BI Linlin, CI Suqin, CAI Pingwei, et al. One-step pyrolysis route to three dimensional nitrogen-doped porous carbon as anode materials for microbial fuel cells[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 427:10-16.
- [44] HERRERO-HERNANDEZ E, SMITH T J, AKID R. Electricity generation from wastewaters with starch as carbon source using a mediatorless microbial fuel cell[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 39(1):194-198.
- [45] KHONGKLIANG P, KONGJAN P, UTARAPICHAT B, et al. Continuous hydrogen production from cassava starch processing wastewater by two-stage thermophilic dark fermentation and microbial electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(45):27584-27592.
- [46] WANG Chengjin, ALPATOVA A, MCPHEDRAN K N, et al. Coagulation/flocculation process with polyaluminum chloride for the remediation of oil sands process-affected water: Performance and mechanism study[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 160:254-262.
- [47] TIAN Xia, SHI Yanxi, LIN Guolin, et al. Study on environmental materials with treatment of sweet potato starch wastewater by coagulation precipitation method[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 703:33-36.
- [48] PIAZZA G J, LORA J H, WAYMAN L I, et al. Removal of lignin from straw spent pulping liquor using synthetic cationic and bio-based flocculants[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 188:348-357.
- [49] DENG S B, BAI R B, HU X M, et al. Characteristics of a bioflocculant produced by *Bacillus mucilaginosus* and its use in starch wastewater treatment[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, 60(5):588-593.
- [50] GUO Junyuan, YANG Chunping, ZENG Guangming. Treatment of swine wastewater using chemically modified zeolite and bioflocculant from activated sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 143:289-297.
- [51] GUO Junyuan, LAU A K, ZHANG Yuzhe, et al. Characterization and flocculation mechanism of a bioflocculant from potato starch wastewater[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99(14):5855-5861.
- [52] JOSHI N, NARESH DHOLAKIYA R, ANIL KUMAR M, et al. Recycling of starch processing industrial wastewater as a sole nutrient source for the bioflocculant production[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2017, 36(5):1458-1465.
- [53] 文玉萍. 混凝+UMAR+CASS组合工艺在木薯淀粉酒精废水处理工程中的应用[J]. *轻工科技*, 2014, 30(6):119-121.
- WEN Yuping. Application of combined coagulation+UMAR+CASS process in cassava starch alcohol wastewater treatment project[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2014, 30(6): 119-121.
- [54] 杜新贞,薛林科,司长代,等. 混凝沉淀-泡沫分离-吸附工艺处理马铃薯淀粉废水的实验研究[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(5):88-91.
- DU Xinzheng, XUE Linke, SI Changdai, et al. Experimental studies on the treatment of potato starch wastewater by coagulation and precipitation-foam fractionation-adsorption[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2009, 45(5):88-91.
- [55] VLADIMIR S, ANDREY E, MARINA G, et al. Combined biologic (anaerobic-aerobic) and chemical treatment of starch industry wastewater[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2003, 109(1/2/3):253-62.
- [56] FETTIG J, PICK V, AUSTERMANN-HAUN U, et al. Treatment of tapioca starch wastewater by a novel combination of physical and biological processes[J]. *Water Science and Technology*, 2013, 68(6):1264-1270.
- [57] 王秀衡,郭晓琳,白舜文. 马铃薯淀粉废水资源化利用案例的成本收益分析[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(22):29-32.
- WANG Xiuheng, GUO Xiaolin, BAI Shunwen. Cost-benefit analysis of potato starch processing wastewater reuse and nutrient recovery: A case study of hanan green food industrial park[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(22):29-32.
- [58] 赵博超,王雪婷,窦广玉,等. 马铃薯淀粉加工废水还田利用对土壤养分及重金属的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(5):666-671.
- ZHAO Bochao, WANG Xueting, DOU Guangyu, et al. Effect of returning potato starch processing wastewater on nutrients and heavy metals in soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5):666-671.
- [59] ŠÁRKA E, POUR V, VESELÁ A, et al. Possibilities for the use of membrane processes for the pre-treatment of wastewater from the production of dried potato purée[J]. *Desalination*, 2009, 249(1):135-138.
- [60] XU Shengjun, BAI Zhihui, JIN Bo, et al. Bioconversion of wastewater from sweet potato starch production to *Paenibacillus polymyxa* biofertilizer for tea plants[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4:4131.

(下转第29页)