



食品工业废水处理技术研究进展

邓永飞, 刘 涛, 吴海铨, 李嘉雯, 陆登俊
(广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

[摘要] 食品工业废水具有来源广泛、成分复杂的特点,因其中含有大量中、高浓度有机物,易对环境造成一定污染。从物化处理、生物处理以及物化-生物处理 3 个方面综述了食品工业废水处理技术的研究进展。其中,物化处理包括膜分离法、高级氧化法、电絮凝法等;生物处理包括好氧处理、厌氧处理、厌氧-好氧处理及生物膜处理;物化-生物处理是将二者相结合得到的新型废水处理技术。最后,对食品工业废水处理技术的未来发展方向进行了展望。

[关键词] 食品工业废水;物化处理;生物处理

[中图分类号] X792 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2021)10-0001-07

Research progress of wastewater treatment technology in food industry

DENG Yongfei, LIU Tao, WU Haiquan, LI Jiawen, LU Dengjun

(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Food industry wastewater has the characteristics of wide source and complex composition, containing a large number of medium and high concentration of organic matter, which is easy to bring some pollution to the environment. The research progress of food industry wastewater treatment technology is reviewed from three aspects: physicochemical treatment, biological treatment and physicochemical-biological treatment. Among of them, the physicochemical treatment includes membrane separation, advanced oxidation, electric flocculation, etc. Biological treatment includes aerobic treatment, anaerobic treatment, anaerobic-aerobic treatment and biofilm treatment. Physicochemical-biological treatment is a new technology which combines the above two wastewater treatment process. Finally, the future development direction of food industry wastewater treatment technology is prospected.

Key words: food industry wastewater; physicochemical treatment; biological treatment

我国食品产业规模庞大,覆盖面广,种类繁多,主要包括肉制品、果蔬制品、乳制品等。在食品加工过程中,会因原料浸泡、产品制冷及设备清洗等操作产生大量有机废水^[1]。由于各类食品的加工原料及生产工艺不同,导致食品工业废水呈现成分复杂且波动性较大的特点,其成分包括大量的悬浮物,多种化学形式的氮、脂肪、蛋白质等有机物,以及磷、氯等其他用于清洗和消毒的化学物质^[2]。近年来,随着食品行业的不断发展,食品加工废水的产生量呈现快速增长的趋势,该类废水若不经处理直接排放,会给环境带来巨大的污染。因此,选取适宜的技术对食品工业废水进行处理,力求在降低废水中有机物含量

的同时,回收利用废水中的营养物质,成为食品工业废水污染治理的主要目标。

随着工业水处理技术的不断发展,针对食品工业废水处理的研究也日益增加。根据食品工业废水的来源及特性,目前国内外常采用物化法及生物法对其进行处理^[3-5]。物化法是在某种理化反应机理的基础上,通过调整技术参数、组合顺序处理食品工业废水;生物法是借助生物膜、活性污泥等生物系统,在微生物的作用下处理食品工业废水中的污染成分,从而改善废水的品质。在此基础上,也有研究将物化法与生物法相结合对食品工业废水进行处理^[6]。

笔者综述了食品工业中常见的废水处理技术,

简要叙述了各项技术在食品工业废水治理中的应用进展,旨在为食品工业废水处理技术的发展提供参考。

1 物化处理法

1.1 膜分离法

1.1.1 微滤

微滤(microfiltration, MF)是以静水压为推动力形成的多功能膜分离技术。微滤膜的水动力阻力低,在低静水压下便能除去水中高浓度污染物,因此在运行过程中能耗较低,且应用范围较广,目前多用于除去废水中的悬浮物及部分微生物^[7]。J. D. D. SANTOS等^[8]采用微滤技术处理木薯淀粉加工废水,该研究首先向废水中添加混凝剂,通过混凝沉淀得到上清液,然后对上清液进行MF处理。研究发现,当混凝剂投加量为320 mg/L, MF压力为0.14 MPa,处理时间为15 min时,木薯淀粉废水的水质可得到明显改善, COD、氰化物、SS去除率分别为75%、91%和100%。该研究结果表明, MF技术对废水中的有机物和悬浮物处理效果优异,具有良好的应用前景。

1.1.2 超滤

超滤(ultrafiltration, UF)膜为非对称的多孔膜,其精细的表面赋予了超滤系统良好的选择渗透性,使其能够在不同流速和压力下截留溶液中的大分子物质,有利于废水中油脂、糖类等有机物的去除^[9]。K. SARDARI等^[10]利用UF技术对经电絮凝预处理后的畜产品加工废水进行深度处理,并考察了操作压力对处理效果的影响。结果表明,当UF压力为0.07 MPa,运行时间为5 min时,废水中油脂、COD的去除率均高于90%, BOD去除率可达98%;此外,废水中的粒子出现团聚现象,平均粒径由36.24 μm 降至25.70 μm ,表明UF技术能够有效去除废水中油脂等有机物及大颗粒污染物。但在超滤处理过程中,超滤膜极易受到污染,需要对膜进行清洗,这在一定程度上增加了废水处理的成本。

1.1.3 反渗透

反渗透(reverse osmosis, RO)是基于溶解扩散学说形成的分离方法,它通过压力差使溶剂进行逆浓度梯度渗透,从而分离溶液中的溶剂组分与非溶剂组分。目前,RO技术多用于去除工业废水中的盐离子、氨基酸等物质。当水中污染物含量过高时,RO膜易出现堵塞、高渗透压等问题,因此RO技术对水

质要求较高。在食品工业废水处理中,RO主要通过与MF、UF等预处理工艺组合对废水进行终端处理,从而降低废水中的污染物含量^[11]。K. HERNANDEZ等^[12]研究了UF/RO体系对乳制品工业废水的处理效果,该研究首先用UF技术对废水进行预处理,随即将压力调整为1.4 MPa,利用RO技术对废水进行进一步处理。结果表明,RO膜分离一价离子的效率可达90%,废水中的COD和BOD被完全除去。UF/RO体系在乳制品废水处理中具有一定的可行性,并且表现出良好的脱盐效果。

1.1.4 纳滤

纳滤(nanofiltration, NF)是在反渗透基础上形成的膜分离技术。与反渗透相比,纳滤膜具有独特的选择性,且该技术的工作压力相对较低,一定程度上可降低运行成本。因此, NF是一项节能、环保的膜分离技术^[13]。目前,该技术在食品工业中主要用于去除油类加工废水中的多酚类化合物^[14]。L. IOANNOU-TTOFA等^[15]利用UF/NF技术处理橄榄油加工废水,通过测定处理前后废水中污染物浓度的变化来评定该技术的处理效果。结果表明,经UF/NF技术处理后,废水中的总酚类化合物、COD、BOD含量均显著降低,去除率分别为95%、92%、100%。此外, Y. A. R. LEBRON等^[16]利用MF/NF技术处理制糖加工废水,研究表明,废水中的COD和色度去除率均高于90.6%,且MF/NF运行成本较低,为0.37美元/ m^3 ,内部收益率高达52.3%,在有效处理废水的同时,带来了良好的经济收益。

1.2 高级氧化法

1.2.1 Fenton氧化法

Fenton氧化是通过 Fe^{2+} 催化 H_2O_2 生成羟基自由基($\cdot\text{OH}$),利用 $\cdot\text{OH}$ 的强氧化性分解有机物,从而实现废水中污染物的有效去除。Fenton氧化还具有良好的絮凝作用,在反应过程中可使废水中部分悬浮物发生沉淀,可降低食品工业废水的浊度^[17]。但传统Fenton氧化法存在运行成本高、催化剂回收困难等缺点。对此, V. LEIFELD等^[18]通过重复利用混凝预处理残留的 Fe^{3+} ,对木薯淀粉加工废水进行Fenton氧化处理。结果表明,经处理后,废水浊度降低至37.3 NTU,相较于处理前浊度降低了68%。该方法对食品加工废水中的悬浮物去除效果良好,并且反应过程中不需补充铁元素,有效降低了运行成本。

1.2.2 三维电极法

三维电极法是在二维电极基础上发展形成的一种氧化技术。在三维电极体系中,主要通过颗粒电极来提升反应的强度。两极板接通电源后,颗粒电极会发生复极化,相当于形成多个微型电解池,废水中的有机物可直接在主电极和颗粒电极表面得失电子发生氧化还原反应。同时,电极表面可产生强氧化性或强还原性的中间产物,进而有效降解废水中的高浓度有机污染物及有害微生物^[19-20]。Can WANG 等^[21]以 Ti/PbO_2 为填充电极,通过三维电极法对食品加工废水进行二次处理。通过对废水毒性检测发现,当控制电流密度为 5 mA/cm^2 ,作用时间为 30 min 时,废水中的菌落总数可由初始的 $1 \times 10^5 \text{ CFU/mL}$ 降低至 $1 \times 10^2 \text{ CFU/mL}$,该方法对废水中有害微生物的去除效果良好。

1.2.3 臭氧氧化技术

臭氧具有良好的氧化性,其氧化性强于传统氧化剂如过氧化氢、高锰酸钾、二氧化氯等。臭氧氧化技术是利用分子臭氧或者高活性的 $\cdot\text{OH}$ 去除废水中的有机污染物^[22]。由于臭氧具有分解迅速、无残留的优势,因此该技术可用于处理富含色素、高浓度有机物的食品加工废水。H. H. JANG 等^[23]利用臭氧氧化技术处理酱油加工废水,研究了该技术对废水的处理效果。研究发现,当 pH 为 11.0 ,臭氧质量浓度为 50.0 mg/L 时,处理效果最佳,废水中的色度、COD 均显著降低,去除率分别为 81.1% 、 64.9% 。

1.2.4 光催化技术

光催化技术是以紫外光为光源的一种氧化技术。当催化剂受到紫外光照射后,会产生电子-空穴对,并形成具有高氧化电位的强氧化剂,该氧化剂可与吸附于催化剂表面的色素等物质发生反应。因此,光催化技术可用于食品工业废水的脱色处理^[24]。张海霞^[25]选取锐钛矿型纳米 TiO_2 为催化剂,利用光催化技术处理糖蜜加工废水。结果表明,当催化剂质量浓度为 5 g/L ,光强由 30 W 增加至 120 W 时,废水脱色率可由 16.1% 升至 39.7% ,提升光强可有效降低废水的色度。Y. W. CHENG 等^[26]研究了光催化技术对棕榈油加工废水的处理效果,发现当催化剂 WO_3 投加量为 0.5 g/L ,处理时间为 1 h 时,处理效果最佳,废水的脱色率可达到 96.21% 。H. SATORI 等^[27]以氧化锌为催化剂,探讨了光催化技术对咖啡加工废水

的处理效果。结果表明,在一定的条件下,废水经处理后,脱色率高达 80% 。

1.3 混凝法

混凝是指在混凝剂作用下,通过破坏废水中胶体颗粒及悬浮颗粒的稳定性,使其凝聚为沉降性能良好的絮凝体,然后予以分离去除的过程。食品工业废水经混凝处理后,其中的悬浮物及有机物能够有效去除,并且废水的可生化性得到提升。其通常作为预处理技术,以利于后续工艺的处理效果。赵晓旭等^[28]利用混凝技术对豆制品加工废水进行预处理,考察了混凝剂种类、初始 pH 等因素对废水处理效果的影响。结果表明,当初始 pH 为 $3.5 \sim 4.0$,混凝剂聚合氯化铝投加量为 0.5 g/L 时, COD 去除率可达 27% 。W. QASIM 等^[29]对混凝法预处理糖果加工废水进行了研究,研究发现,当控制混凝剂明矾投加量为 240 mg/L ,处理时间为 1 h 时,废水 COD 去除率可达 87.2% ,且废水的浊度、硬度均有所下降。

1.4 电絮凝法

电絮凝是指在外加电场作用下,可溶性阳极电解产生阳离子,并进一步水解为水络合物和金属氢氧化物,使废水中的胶体和悬浮离子吸附沉降,形成絮凝物的过程。P. DROGUI 等^[30]以低碳钢作为双极电极,研究了电絮凝法对肉制品加工废水的处理效果。结果表明,该方法对废水 COD、BOD 的去除率分别可达 82% 和 87% ,且废水中病原体和部分无机物均得到有效去除;从电极材料成本、电能消耗量等多个方面综合考量,该技术的废水处理成本为 $0.98 \sim 2.14 \text{ 美元/m}^3$ 。Y. ESFANDYARI 等^[31]以铝为两极电极,采用电絮凝法处理 4 倍稀释的橄榄油加工废水。结果表明,电絮凝处理 30 min , COD、多酚去除的比能耗(SEC)分别为 6.82 、 $92.33 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$,废水中的 COD、BOD、SS、总酚类化合物均显著降低,去除率分别为 96% 、 93.6% 、 97.0% 、 94.4% ,且废水的 BOD/COD 由 0.29 提升到 0.46 ,有利于其在生物系统中的后续处理。电絮凝法具有二次污染小、停留时间短、运行成本低等特点,可有效去除废水中部分有机物和悬浮物,且该技术去除磷元素等无机物的效果优于混凝法。电絮凝技术在油类加工等废水的处理中具有良好的应用潜力。

1.5 超声技术

超声波作用于溶液时会产生一定的理化作用,

主要包括热效应和空化效应,其中空化效应常应用于工业废水的处理。在超声空化的作用下,水分子易被分解成反应性极强的氢原子和羟基自由基,废水中的有机物与羟基自由基反应而被降解^[32]。超声技术具有安全、高效的特点,常作为辅助技术处理工业废水。李琛等^[33]利用超声辅助活性炭吸附处理高浓度食品有机废水,结果表明,处理后的废水中有机污染物含量显著降低,COD、氨氮去除率均高于 63.6%,且运行成本仅为 1.5 元/m³,该处理技术具有良好的可行性。A. DURAN 等^[34]对超声辅助氧化法处理饮料、酒厂工业废水进行了研究,研究结果表明,在一定的条件下,废水中有机物的去除率可高达 98%。超声辅助处理可在一定程度上缩短废水的处理周期,减少废水处理过程中的能源消耗,有利于提升食品工业的经济效益。

2 生物处理法

2.1 好氧处理法

活性污泥法是传统的好氧处理技术。活性污泥是指在人工充氧条件下,对污水和细菌、原生动物以及其他微生物进行混合培养后形成的絮凝团,其具有良好的吸附、氧化和分解有机物的能力^[35]。

序批式活性污泥法(Sequencing batch reactor, SBR)是一种常见的活性污泥处理技术,主要以间歇曝气的方式运行。SBR 技术的核心是反应池,均化、初沉、生物降解、滗水、排泥等过程均在反应池中进行。N. SCHWARZENBECK 等^[36]利用 SBR 技术处理啤酒加工废水,考察了该技术对废水 COD 的处理效果。研究发现,在 SBR 系统中,颗粒污泥表现出较强的吸氧活性,能有效降解纤维素等有机物;经处理后废水中 COD 含量显著降低,去除率可达 80%。

在 SBR 中,废水的处理是在单一反应器内进行的,一定程度上降低了设备的利用率,且进水是间歇进行的,曝气器极易堵塞。为此,M. C. GORONSY 等^[37]在 SBR 的基础上成功研发出循环式活性污泥系统(Circulating activated sludge system, CASS)。与 SBR 相比,CASS 可同时连续进水,间断排水,可在一定程度上避免曝气器出现堵塞,反应池的利用率也得以提升。CASS 反应池被分为生物选择区及主反应区 2 部分:在生物选择区内,废水中的污染物可被微生物快速吸附,实现污染物的快速去除;而主反应区则处于低负荷的降解过程,二者相结合提升了废水的

处理效率。马伟等^[38]利用 CASS 技术处理蛋糕加工废水,结果表明,在 pH 为 6.0,混凝剂 PAFC 投加量为 400 mg/L,沉淀时间为 3 h 的条件下,出水 COD 为 89 mg/L,总磷为 0.40 mg/L,符合《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的一级标准要求,COD、总磷去除率均高于 85%;整个系统沉淀稳定,几乎不产生泡沫。CASS 运行过程不需要排泥,具有经济节约的特点。

2.2 厌氧处理法

厌氧处理主要分为水解酸化、产氢气-产乙酸以及产甲烷 3 个阶段,该方法主要是利用厌氧微生物的特性,在不借助外界 O₂ 的条件下,将废水中的有机物分解,在产生甲烷的同时,减少温室气体 CO₂ 的排放^[39]。此法具有成本低、运行稳定等特点,被广泛应用于工业废水的处理。

上流式厌氧污泥床(Up-flow anaerobic sludge bed, UASB)是典型的厌氧反应器,常被用于处理高浓度有机废水及水中硫酸盐等物质。UASB 能形成高负荷、高浓度及高沉降性的厌氧污泥,在食品工业废水的处理中发挥了重要作用。项赞等^[40]研究了中温条件下 UASB 对高浓度食品发酵废水的处理效果。结果表明,待 UASB 反应器运行稳定后,当 HRT 为 72 h, COD 负荷为 2.8 kg/(m³·d)时,处理效果最佳,COD 去除率可达 80%。

厌氧膨胀颗粒污泥床(Expanded granular sludge bed, EGSB)是以 UASB 为基础改进得到的厌氧处理技术,它解决了 UASB 易出现的短流、堵塞等问题。与 UASB 相比,EGSB 具有上流流速快、污泥膨胀度高等特点,因此在处理高氨氮、难降解有机废水方面具有明显优势^[41]。于永翠^[42]考察了 EGSB 对甜菜加工废水的处理效果,研究发现,控制流速为 1.64~2.62 m/h 时,EGSB 中的颗粒污泥能与废水充分混合;当系统运行稳定后,废水 COD、BOD、SS 和氨氮的去除率均高于 99.4%,充分证实了 EGSB 对废水中氨氮的去除效果显著,能够有效处理甜菜加工废水。

2.3 厌氧-好氧处理法

厌氧生物反应器具有能耗低、产气量高、抗冲击负荷能力强等优点,适用于高浓度有机废水的处理,但是其存在启动时间长、有机物去除不彻底的缺陷;好氧处理则具有经济节约的特点,适用于处理低浓度有机废水,且出水污染物浓度远低于厌氧处理^[43]。将厌氧和好氧处理相结合,充分发挥二者的优势,可

以有效回收能源,降低运行成本,进一步改善富含悬浮物和有机物废水的出水品质,有利于食品工业废水的深度处理。

牙斐颖^[44]研究了两相厌氧-好氧技术对木薯酒精废水的处理效果。木薯酒精废水经预处理后,依次进入连续搅拌反应器(Continuous stirred tank reactor, CSTR)和 UASB 进行厌氧处理,再进入 SBR 进行好氧处理。结果表明,该组合工艺可使废水中有机物得到充分降解,废水中的 COD、BOD、SS、氨氮等含量显著降低,去除率均高于 70%。

马志辉^[45]通过实验考察了 UASB/CASS 技术对豆制品废水的处理效果,结果表明,在控制 UASB 和 CASS 的 HRT 分别为 6、14 h 时,该系统对废水的处理效果最佳,此条件下废水 COD 去除率达到 98.28%。UASB 与 CASS 结合后运行稳定,并且充分发挥了二者的优点,有效去除了废水中的有机碳,缩短了废水的处理周期,降低了运行成本。

张占庭^[46]利用厌氧+A/O 工艺处理乳制品废水,研究了该技术对乳制品废水的处理效果。运行结果表明,该组合工艺对废水中 COD、SS、BOD、氨氮的去除效果显著,去除率分别为 99.6%、99.6%、97.1%、96.2%,且废水可生化性得到了显著提升;该系统运行稳定,废水处理成本为 0.86 元/m³。由此可见,在乳制品加工废水的处理中,厌氧-好氧处理技术具有良好的可行性,有利于提升食品企业的经济效益。

2.4 生物膜处理法

生物膜处理法是微生物附着在反应器中的填料表面生长,形成稳定的生物膜系统;待该系统运行稳定后,废水与生物膜充分接触,在微生物作用下污染物被有效去除^[47]。生物膜处理法主要包括生物接触氧化法、内循环生物流化床、生物膜反应器等。

由于传统的生物接触氧化法具有工艺复杂、运行成本较高的特点,梁止水等^[48]以玄武岩纤维为填充材料开发了新型生物接触氧化处理技术,并研究了该技术对食品工业废水的处理效果。结果表明,在较低溶解氧条件下,该生物膜系统能够有效去除食品废水中的污染物, COD、总氮、总磷的去除率均可达到 95%以上,出水水质符合排放标准要求,且整体运行成本降低近 30%。此外,徐晶等^[49]采用二级接触氧化法对饮料厂废水进行处理,结果表明,该工艺对废水中 Fe、Mn 的总去除率分别达到 61.64%、

50.18%。此研究表明,生物接触氧化法在高效降解有机污染物的同时,还能吸附废水中的重金属污染物;并且该技术采用延时曝气,缩短了活性污泥的清理周期,一定程度上降低了运行成本。

田雪莲等^[50]利用内循环生物流化床处理富含高浓度有机污染物的糖业废水,研究了空气流量和 HRT 对处理效果的影响。研究表明,在进气量为 40 L/h, HRT 为 3~4 h 的条件下,废水 COD 和氨氮的平均去除率分别为 90.7%和 86.5%,出水 COD 和氨氮分别稳定在 60、2 mg/L 以下,符合排放标准要求,并且该系统抗冲击负荷能力强,能够有效处理此类水质波动较大的食品加工废水。

M. ABDULGADER 等^[51]选取柔性纤维为填充材料,得到一种新型的序批式生物膜反应器,并研究了其对乳制品加工废水的处理效果。研究表明,反应器的最佳启动条件为 HRT=24 h, COD 有机负载率为 8.2 kg/m³,在此条件下,处理后废水中的 COD 和 SS 分别降低了 97.5%、99.3%,表明该系统可高效处理乳制品废水。

3 物化-生物处理法

食品加工原料来源广泛,且随着社会的发展,制品的种类日益增多,由此产生的废水水量、水质均存在较大的差异,这在一定程度上增加了食品加工废水的处理难度,导致单一的物化、生物处理法不能达到理想的处理效果。研究表明,将物化处理法与生物处理法相结合,充分发挥二者的优势,可有效改善对食品工业废水的处理效果,并在一定程度上促进食品工业的发展。

郑海领^[52]以厌氧序批式反应器为预处理技术,将其与电化学法相结合对高盐榨菜废水进行处理。结果表明,废水经预处理后,出水 COD 为 775 mg/L, COD 去除率为 87%,出水 COD 未能达到排放标准(GB 8978—1996)要求;随后采用电化学法对预处理出水进行进一步处理,控制电流密度为 88 mA/cm²,板间距为 2 cm,电解 40 min,出水 COD 为 90 mg/L,符合排放标准要求。

M. GHIMPUSAN 等^[53]将臭氧氧化技术与生物反应器相结合处理金枪鱼、橄榄油加工有机废水,实验中首先利用臭氧氧化技术对废水进行预处理,随后采用生物反应器对预处理后废水做进一步处理。

实验结果表明,废水经该组合工艺处理后,出水 COD 稳定在 3.5~10.0 mg/L, COD 去除率在 90% 左右,且废水中的表面活性剂及悬浮物被有效去除,表明该技术对食品加工废水具有良好的处理效果。

Chang LI 等^[54]采用非均相 Fenton 氧化+生物膜反应器技术处理海产品加工废水,研究了该体系对高盐度废水的处理效果。结果表明,该组合系统对废水中污染物的去除效果显著, COD、氨氮去除率均高于 95%, B/C 由 0.21 提升至 0.43。可见,该系统在高盐度、难降解的海产品加工废水的处理方面具有良好的应用前景。

Weiwei CHEN 等^[47]利用混凝-膜生物反应器组合系统对乳品废水进行处理,实验结果表明,该体系具有较强的抗冲击负荷能力,处理出水 COD 降至 8 mg/L, COD 去除率达到 98%, 混凝对于稳定膜生物反应器的出水水质具有重要意义。混凝法与膜生物反应器的结合为乳品工业废水的回收利用提供了可能。

4 展望

目前,物化处理技术和生物处理技术在食品工业废水处理中已得到广泛应用,且处理效果良好。由于食品工业废水有机物含量较高、水质差异明显,实现废水零污染排放的目标仍具有一定的难度。因此,在实现节能高效的同时,优化食品工业废水治理技术、提升废水资源的回收利用率成为今后研究的重点。在现有研究基础上,未来对食品工业废水处理技术的探索可从以下几点入手:

(1) 废水处理技术的优化。废水处理效果受多种因素的影响,针对现有食品工业废水处理技术,需进一步探索最佳的实验参数和操作条件,提升设备稳定性,提升废水处理能力。

(2) 材料及新技术的研究。对于物化处理法,可通过研发性能优异的新型无机材料,提升絮凝、吸附等方法的处理效果;对于生物处理法,可从微生物性能的提升以及新型能源物质的利用入手,优化现有生物处理工艺,为食品废水处理提供新资源。

(3) 组合技术的探索。单一的物化处理技术和生物处理技术对废水的处理能力有限,物化处理和生物处理相结合具有良好的应用潜力。目前,组合技术的应用仍处于开发阶段,接下来可从处理次序、操作条件等多个方面进行探索,将 2 种处理技术的优势

互补,不断改善废水的处理效果。

(4) 废水成分的回收利用。食品加工废水中富含蛋白质、油脂等多种营养成分,具有极高的回收价值。因此,在探索不同技术对废水的处理能力时,还应重点考察其对废水中营养物质的回收效果,实现资源的再利用,为食品工业带来巨大的经济效益。

参考文献

- [1] 张磊,赵婷婷,何虎. 食品加工废水处理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2018, 44(12): 7-13.
- [2] FRENKEL V S, CUMMINGS G A, MAILLACHERUVU K Y, et al. Food-processing wastes[J]. Water Environment Research, 2018, 90(10): 1033-1053.
- [3] 翁新春,方薇,陈祎斐. 食品工业废水处理工艺及节能探究[J]. 资源节约与环保, 2015(2): 63-65.
- [4] 陈秋羽,张洁. 食品行业废水处理与利用[J]. 现代食品, 2019(18): 56-58.
- [5] CASTRO-MUÑOZ R, FÍLA V, RODRÍGUEZ-ROMERO V M, et al. Water production from food processing wastewaters using integrated membrane systems: A sustainable approach[J]. Tecnología y Ciencias del Agua, 2017, 8(6): 129-136.
- [6] 张国宣,褚喜英,师媛媛,等. 膜生物反应器处理食品工业废水的研究进展[J]. 河南化工, 2017, 34(3): 13-17.
- [7] ANIS S F, HASHAIKEH R, HILAL N. Microfiltration membrane processes: A review of research trends over the past decade[J]. Journal of Water Process Engineering, 2019, 32: 100941.
- [8] SANTOS J D D, TERESINHA M, FAGUNDES-KLEN V, et al. Evaluation of the combined process of coagulation/flocculation and microfiltration of cassava starch wastewater: Removal efficiency and membrane fouling[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2017, 7(228): 228-238.
- [9] AZMI N S, YUNOS K F M. Effect of regenerated cellulose of ultrafiltration membranes on POME treatment[J]. Jurnal Teknologi, 2014, 70(2): 81-86.
- [10] SARDARI K, ASKEGAARD J, CHIAO Y, et al. Electrocoagulation followed by ultrafiltration for treating poultry processing wastewater[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2018, 6(4): 4937-4944.
- [11] 易华西,张兰威,黄冬成,等. 反渗透膜技术在乳品工业废水处理中的应用[J]. 中国乳品工业, 2015, 43(6): 49-51.
- [12] HERNANDEZ K, MURO C, ORTEGA R E, et al. Water recovery by treatment of food industry wastewater using membrane processes[J]. Environmental Technology, 2021, 42(5): 775-788.
- [13] SALEHI F. Current and future applications for nanofiltration technology in the food processing[J]. Food and Bioprocess Processing, 2014, 92(2): 161-177.
- [14] OCHANDO-PULIDO J M, CORPAS-MARTINEZ J R, VELLIDO-PEREZ J A, et al. Optimization of polymeric nanofiltration perfor-

- mance for olive-oil-washing wastewater phenols recovery and reclamation[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 236: 116261.
- [15] IOANNOU-TTOFA L, MICHAEL-KORDATO I, FATTAS S C, et al. Treatment efficiency and economic feasibility of biological oxidation, membrane filtration and separation processes, and advanced oxidation for the purification and valorization of olive mill wastewater[J]. Water Research, 2017, 114: 1-13.
- [16] LEBRON Y A R, MOREIRA V R, FURTADO T P B, et al. Vinasse treatment using hybrid tannin-based Coagulation-Microfiltration-Nanofiltration processes: Potential energy recovery, technical and economic feasibility assessment[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 248: 117152.
- [17] 许金花, 汪晓军, 陈志伟. Fenton 试剂氧化深度处理食品添加剂废水[J]. 食品工业科技, 2008(9): 126-128.
- [18] LEIFELD V, DOS SANTOS T P M, ZELINSKI D W, et al. Ferrous ions reused as catalysts in Fenton-like reactions for remediation of agro-food industrial wastewater[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 222: 284-292.
- [19] 孙晓静. GAC 三维电极法处理模拟染料废水的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- [20] 杨二奎. 三维电极法对猪场废水生化系统尾水的处理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [21] WANG Can, HUANG Y K, ZHAO Qing, et al. Treatment of secondary effluent using a three-dimensional electrode system: COD removal, biotoxicity assessment, and disinfection effects [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 243: 1-6.
- [22] ALSAGER O A, ALNAJRANI M N, ABUELIZZ H A, et al. Removal of antibiotics from water and waste milk by ozonation; kinetics, by-products, and antimicrobial activity[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 158: 114-122.
- [23] JANG H H, SEO G T, JEONG D W. Investigation of oxidation methods for waste soy sauce treatment[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(10): 1190.
- [24] 梁璇, 于小秀, 徐云峰, 等. 应用光催化技术处理食品生产废水的研究综述[J]. 轻工科技, 2019, 35(11): 95-97.
- [25] 张海霞. 光催化处理糖蜜酒精废水的研究[J]. 轻工科技, 2016, 32(3): 87-88.
- [26] CHENG Y W, CHANG Y S, NG K H, et al. Photocatalytic restoration of liquid effluent from oil palm agroindustry in Malaysia using tungsten oxides catalyst[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 162: 205-219.
- [27] SATORI H, KAWASE Y. Decolorization of dark brown colored coffee effluent using zinc oxide particles: The role of dissolved oxygen in degradation of colored compounds[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 139: 172-179.
- [28] 赵晓旭, 张忠懿, 牛青, 等. 用混凝-微电解预处理工艺处理豆制品废水[J]. 沈阳大学学报: 自然科学版, 2019, 31(2): 95-100.
- [29] QASIM W, MANE A V. Characterization and treatment of selected food industrial effluents by coagulation and adsorption techniques[J]. Water Resources and Industry, 2013, 4: 1-12.
- [30] DROGUI P, ASSELIN M, BRAR S K, et al. Electrochemical removal of pollutants from agro-industry wastewaters[J]. Separation and Purification Technology, 2008, 61(3): 301-310.
- [31] ESFANDYARI Y, MAHDAVI Y, SEYEDSALEHI M, et al. Degradation and biodegradability improvement of the olive mill wastewater by peroxi-electrocoagulation/electrooxidation-electroflotation process with bipolar aluminum electrodes[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(8): 6288-6297.
- [32] 刘东红, 孟瑞锋, 唐佳妮. 超声技术在食品杀菌及废水处理中应用的研究进展[J]. 农产品加工: 学刊, 2009(10): 18-21.
- [33] 李琛, 葛红光, 刘军海, 等. 超声波辅助活性炭吸附处理高浓度食品废水的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(11): 202-205.
- [34] DURAN A, MONTEAGUDO J M, SANMARTIN I, et al. Homogeneous sonophotolysis of food processing industry wastewater: Study of synergistic effects, mineralization and toxicity removal[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(2): 785-791.
- [35] 王春华. 浅谈甘蔗制糖废水的污染控制[J]. 广西糖业, 2019(1): 7-9.
- [36] SCHWARZENBECK N, ERLEY R, MC SWAIN B S, et al. Treatment of malting wastewater in a granular sludge sequencing batch reactor (SBR)[J]. Acta Hydrochimica et Hydrobiologica, 2004, 32(1): 16-24.
- [37] GORONSZY M C, SLATER N, KONICKI D. The cyclic Activated Sludge System for resort area wastewater treatment[J]. Water Science and Technology, 1995, 32(9/10): 105-114.
- [38] 马伟, 戴安全. CASS 工艺处理蛋糕食品加工废水实例[J]. 给水排水, 2016, 42(5): 66-71.
- [39] GHANIMEH S, ABOU KHALIL C, BOU MOSLEH C, et al. Optimized anaerobic-aerobic sequential system for the treatment of food waste and wastewater[J]. Waste Management, 2018, 71: 767-774.
- [40] 项赟, 李方志, 温勇, 等. UASB 反应器处理高浓度食品发酵废水启动特性研究[J]. 环境工程, 2014, 32(S1): 99-102.
- [41] 陈奕榕. EGSB-BES 耦合工艺处理糖厂废水的启动与运行研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [42] 于永翠. EGSB-A/O 组合工艺处理淀粉制糖生产废水的工程优化[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2014.
- [43] LIU Wancen, SONG Xiaoye, HUDA N, et al. Comparison between aerobic and anaerobic membrane bioreactors for trace organic contaminant removal in wastewater treatment[J]. Environmental Technology & Innovation, 2020, 17: 100564.
- [44] 牙斐颖. “两相厌氧+好氧”工艺处理木薯酒精废水的研究[J]. 建材与装饰, 2016(33): 160-161.
- [45] 马志辉. UASB 与 CASS 联用处理豆制品废水工艺设计[D]. 保定: 河北大学, 2017.
- [46] 张占庭. “厌氧+A/O”替代“气浮+CASS”工艺在乳制品废水处理中的运行与监测分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2015.

(下转第 13 页)

- ramics International, 2014, 40(5): 7093-7098.
- [35] MURCIA J, AVILA-MARTINEZ E G, ROJAS H, et al. Powder and nanotubes titania modified by dye sensitization as photocatalysts for the organic pollutant elimination[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(4): 517-528.
- [36] 李佩欣, 冯铭扬, 吴彩平. 基于电子顺磁共振的铈卟啉敏化 TiO₂ 光催化性机理的研究[J]. *物理学报*, 2015(13): 375-379.
- [37] HAN Xue, YANG Xiaobin, LIU Guangbo, et al. Boosting visible light photocatalytic activity via impregnation-induced RhB-sensitized MIL-125(Ti)[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, 143: 90-99.
- [38] KHAN J A, SAYED M, SHAH N, et al. Synthesis of eosin modified TiO₂ film with co-exposed {001} and {101} facets for photocatalytic degradation of para-aminobenzoic acid and solar H₂ production[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, 265: 118557.
- [39] 徐俊英, 李越湘, 彭绍琴. 伊红 Y 敏化 Pt 负载 (001) 晶面占优 TiO₂ 纳米片可见光催化制氢的研究[J]. *功能材料*, 2016, 47(1): 1066-1071.
- [40] 杜雪岩, 王峭, 续京, 曙红, 叶绿素铜三钠共敏化 TiO₂ 纳米颗粒的光催化性能[J]. *材料导报*, 2014, 28(1): 46-50.
- [41] SHANG Xili, LI Bin, ZHANG Tianyong, et al. Photocatalytic degradation of methyl orange with commercial organic pigment sensitized TiO₂[J]. *Procedia Environmental Science*, 2013, 18: 478-485.
- [42] JENNYFER D A, AUGUSTO A S, MUESE M, et al. Analysis of two dye-sensitized methods for improving the sunlight absorption of TiO₂ using CPC photoreactor at pilot scale[J]. *Material Science in Semiconductor Processing*, 2019, 103: 640-651.
- [43] PHONGAMWONG T, DONPHAI W, PRASITCHOKE P, et al. Novel visible-light-sensitized Chl-Mg/P25 catalysts for photocatalytic degradation of rhodamine B[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, 207: 326-334.
- [44] 徐志兵, 严家平, 钮志远. 光敏化 Ag/TiO₂ 催化剂的制备及其催化性能[J]. *石油化工*, 2013, 42(3): 330-333.
- [45] CARLOS D U, WILLIAM V, ROMERO E, et al. TiO₂ thin films sensitization with natural dyes extracted from *Bactris guineensis* for photocatalytic applications: Experimental and DFT study[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2020, 24(5): 407-416.
- [46] ABOU-GAMRA Z M, AHMED M A. Synthesis of mesoporous TiO₂-curcumin nanoparticles for photocatalytic degradation of methylene blue dye[J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology B: Biology*, 2016, 160: 134-141.
- [47] MONTRI A, THANATCHAPORN T, NARIT T, et al. Curcumin modified titanium dioxide nanotubes with enhanced visible light photocatalytic performance[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2019, 14: 1954-1967.
- [48] GOULART S, NIEVES L J J, BERNARDIN A M, et al. Sensitization of TiO₂ nanoparticles with natural dyes extracts for photocatalysis activity under visible light[J]. *Dyes and Pigments*, 2020, 182: 654-662.
- [49] XIE Wanjie, PAKDEL E, LIANG Yujia, et al. Natural melanin/TiO₂ hybrids for simultaneous removal of dyes and heavy metal ions under visible light[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2019, 389: 292-308.
- [50] 史珺, 吴扬, 缪建文. 天然染料混合二氧化钛光降解醋酸纤维的研究[J]. *南通大学学报: 自然科学版*, 2018, 17(2): 18-22.
- [作者简介] 汤晓蕾(1996—), 硕士研究生. E-mail: 1113101507@qq.com. 通讯作者: 董延茂, 教授. E-mail: 2547866497@qq.com.
- [收稿日期] 2021-06-22(修改稿)
-
- (上接第 7 页)
- [47] CHEN Weiwei, LIU Jinrong. The possibility and applicability of coagulation-MBR hybrid system in reclamation of dairy wastewater[J]. *Desalination*, 2012, 285: 226-231.
- [48] 梁止水, 张倩, 韦静, 等. 玄武岩纤维填料生物接触氧化法提升食品废水处理的效果评价; 以日本 Mizkan Holdings 美浓加茂工厂为例[J]. *环境工程*, 2019, 37(9): 8-12.
- [49] 徐晶, 张瑞玲, 黄春鹏, 等. 二级接触氧化工艺对饮料厂废水中重金属去除[J]. *食品工业*, 2018, 39(3): 84-87.
- [50] 田雪莲, 胡堃, 郭勇, 等. 内循环好氧生物流化床处理糖业废水试验研究[J]. *工业水处理*, 2011, 31(1): 33-36.
- [51] ABDULGADER M, YU Q J, ZINATIZADEH A A, et al. Performance and kinetics analysis of an aerobic sequencing batch flexible fibre biofilm reactor for milk processing wastewater treatment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 255: 109793.
- [52] 郑海领. 高盐榨菜废水物化生化处理技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [53] GHIMPUSAN M, NECHIFOR G, NECHIFOR A, et al. Case studies on the physical-chemical parameters' variation during three different purification approaches destined to treat wastewaters from food industry[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 203: 811-816.
- [54] LI Chang, LI Xiong, QIN Lei, et al. Membrane photo-bioreactor coupled with heterogeneous Fenton fluidized bed for high salinity wastewater treatment: Pollutant removal, photosynthetic bacteria harvest and membrane anti-fouling analysis[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 696: 133953.
- [作者简介] 邓永飞(1997—), 硕士研究生. 电话: 17736905361, E-mail: dengyongfei2019@163.com. 通讯作者: 陆登俊, 博士, 副教授. 电话: 15578064828, E-mail: dj6688@126.com.
- [收稿日期] 2021-06-29(修改稿)