

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.22.021

马铃薯淀粉废水的蛋白回收与土地利用工程示范

赵博超¹, 窦广玉¹, 苑喜男¹, 王雪婷¹, 朱克松¹, 马 龙²,
潘涔轩¹

(1. 中国环境科学研究院 国家环境保护生态工业重点实验室, 北京 100012; 2. 固原玉明
淀粉有限公司, 宁夏 固原 756000)

摘 要: 为推动马铃薯淀粉行业科学、精准治理加工废水, 针对其加工废水高有机质、高氮、高磷的水质特性, 在宁夏固原某马铃薯淀粉加工企业采用工艺废水(汁水)蛋白回收与综合废水土地利用联合处理工艺(处理规模以工艺废水计, 30 m³/h)替代传统末端生化处理工艺, 并进行环境效益、经济效益及社会效益分析。生产运行数据表明, 该联合处理工艺的蛋白回收率达到40.93%, SS去除率达到54.76%, COD去除率为19.2%, 综合废水全部实现土地利用, 基本实现工艺设计目标。示范工程的联合处理工艺相比废水达标排放, 每年减排COD、SS、总氮、总磷分别为6.64 t、1.99 t、1.99 t、66.4 kg, 并可为企业增加经济效益(税后61万元/a)。此外, 还可以增加当地农民收入, 实现资源循环利用。该联合处理模式将传统末端污染治理投入模式转变为资源利用产出模式, 较好地解决了企业水污染治理问题, 同时经济效益、社会效益显著, 为马铃薯淀粉行业废水治理提供了新路径。

关键词: 马铃薯淀粉加工废水; 蛋白回收; 土地利用; 工程示范

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)22-0126-07

Demonstration Project of Potato Starch Wastewater Protein Recovery and Land Use

ZHAO Bo-chao¹, DOU Guang-yu¹, YUAN Xi-nan¹, WANG Xue-ting¹,
ZHU Ke-song¹, MA Long², PAN Cen-xuan¹

(1. Key Laboratory of Eco-Industry of the Ministry of Environmental Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Guyuan Yuming Starch Co. Ltd., Guyuan 756000, China)

Abstract: In order to promote the scientific and precise treatment of processing wastewater in the potato starch industry, based on its characteristics of high organic matter, high nitrogen and high phosphorus, a combined treatment process of protein recovery from processing wastewater and comprehensive wastewater land use with treatment scale of 30 m³/h process wastewater is adopted in a potato starch processing enterprises in Ningxia Guyuan to replace the traditional end biochemical treatment process of wastewater, and to analyze the environmental benefits, economic benefits and social benefits. The production and operation data show that the protein recovery rate, SS removal rate and COD

基金项目: 甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2023CYZC-41)

通信作者: 潘涔轩 E-mail: pancenx@sina.com

removal rate of the combined treatment process were 40.93%, 54.76% and 19.2%, respectively. All the comprehensive wastewater was successfully returned to the field for utilization, indicating that the goal of designed process was generally achieved. The benefit analysis shows that the combined treatment process of the demonstration project can reduce the annual discharge COD, SS, total nitrogen, and total phosphorus by 6.64 t, 1.99 t, 1.99 t and 66.4 kg, respectively, compared with up-to-standard discharge of wastewater, and could increase the economic benefit of 610 thousand yuan after tax for the enterprise every year. In addition, it could increase the income of local farmers and realize the recycling of resources. The combined treatment model transforms the traditional end pollution input mode into resource utilization output mode, which better solves the problem of enterprise pollution control, and has significant economic and social benefits. It provides a new path for wastewater treatment in the potato starch industry.

Key words: potato starch processing wastewater; protein recovery; land use; demonstration project

目前国内农副产品加工行业的生产废水普遍采用传统好氧生物处理或厌氧、好氧组合工艺处理^[1-3],出水水质执行污水综合排放标准(或行业水污染物排放标准),或者达到间接排放标准后排入城市/园区污水管网。但是对于季节性生产的农副产品加工行业如马铃薯原淀粉加工行业(多集中在东北、西北、华北地区),其生产时间多在每年9月—11月,气温较低,生产加工时间较短,水质、水量变化大,常规的生化工艺难以达到设计处理效果。同时生化处理工艺^[4-6]也普遍存在工艺流程复杂、投资偏大、运行费用高、操作要求严苛、需要常年运行等问题,严重制约企业可持续发展。

马铃薯淀粉加工综合废水是一种高浓度有机废水,主要包括原料清洗废水和马铃薯工艺废水(汁水),主要表现为COD负荷高,生物降解性好(B/C高达0.84),含有大量氮、磷、钾元素,无重金属,无苯类、酚类等致癌物^[7-9]。已有试验研究表明,施用马铃薯淀粉加工废水与有机肥效果类似,能够改善土壤结构,提高土壤肥力^[10-12]。因此,将马铃薯淀粉加工废水预处理后施用于农田种植是一种循环经济的思路,既可保证废水得到妥善处理,又能补充植物所需的养分和水分,改良土壤结构,但国内规模化工业应用案例报道较少^[13],相关行业也仅限在制糖行业有个别案例^[14-15],难以为马铃薯淀粉加工废水规模化土地利用提供全面参考。

本研究设计了蛋白回收与土地利用联合处理马铃薯淀粉废水的工艺路线,并在宁夏固原市某淀粉

粉有限公司进行工程示范,分析了工程运行效果及环境效益和经济效益,可为马铃薯淀粉行业废水治理提供参考。

1 废水水质及水量

该淀粉企业现有马铃薯处理量为40 t/h生产线一条(以淀粉计,约6 t/h),每年加工期一般从10月初开始,12月末结束,加工期约90 d。原料(马铃薯)清洗废水和马铃薯淀粉工艺废水(汁水)混合后形成综合废水。根据生产统计,淀粉综合废水产量为50~60 m³/h,其中马铃薯淀粉工艺废水(汁水)为25~30 m³/h。洗薯废水和工艺废水水质见表1。

表1 洗薯废水和工艺废水的水质

Tab.1 Quality data of potato washing wastewater and process wastewater

项目	pH	COD/ (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)	总氮/ (mg·L ⁻¹)	总磷/ (mg·L ⁻¹)
洗薯 废水	6.3 ~ 7.1	4 352 ~ 6 855	4 352 ~ 6 855	61 ~ 126	15.3 ~ 43.6
工艺 废水	5.6 ~ 6.6	35 110 ~ 37 735	7 028 ~ 8 107	2 040 ~ 2 380	207 ~ 242

2 工艺流程

本项目处理工艺摒弃传统的末端治理达标排放思路,针对废水的成分特点,以清洁生产和循环经济为设计理念,采用马铃薯淀粉工艺废水(汁水)蛋白回收与综合废水土地利用联合处理工艺,流程如图1所示。利用蛋白质热变性原理进行蛋白回收。蛋白质遇热后化学键断裂,导致其空间结构发

生变化,使原本可溶的蛋白质析出,再通过分离、烘干得到蛋白副产品。但是,马铃薯淀粉工艺废水(汁水)中由于含有大量细纤维、小颗粒淀粉,在换热器中加热时易糊化堵塞换热器和管道,致使蛋白回收过程无法稳定运行。本项目工艺设计时在马铃薯淀粉工艺废水(汁水)加热前增加细纤维分离工序,采用两级细纤维离心筛分离细纤维和小颗粒淀粉,避免加热过程堵塞换热器。此外,换热系统采用2套设备(1用1备),每3天切换使用,确保稳定运行。

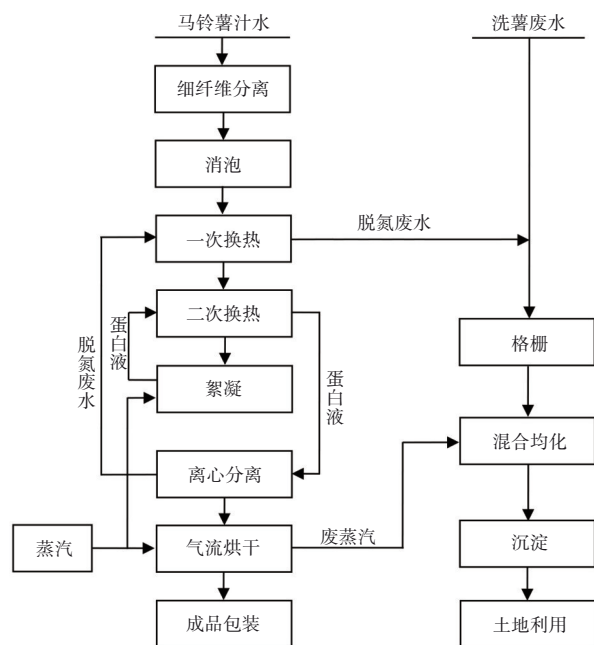


图1 废水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

该工序不仅从马铃薯工艺废水(汁水)中回收蛋白副产品出售,增加企业经济效益,同时还能降低马铃薯工艺废水(汁水)中的固形物及COD负荷,对汁水进行热消毒,有利于后续废水土地利用。

土地利用系统利用土壤、微生物、植物生态系统的自净功能和自我调控机制,通过一系列物理、化学和生物化学过程,最终实现废水资源化处理的目标^[16-17]。马铃薯淀粉工艺废水(汁水)经蛋白回收处理后排出的脱氮废水与原料(马铃薯)清洗废水经过格栅、混合均化、沉淀后由泵站提升到缓冲池,随后根据当年废水施用计划喷施到农田。

经过处理后的废水于当年企业开产后即开始施用(投放)到空闲的农田上,一般为每年10月—12

月。废水施用量按照土壤肥力及翌年种植农作物生长所需营养物质的量综合确定,为了避免废水施用不均匀影响作物生长,施用前用激光整地机对土地进行平整,并采用基于畦灌的新型小畦灌溉方式施用,小畦入口埋设量水堰控制流量,再根据时间控制灌溉量,如图2所示。

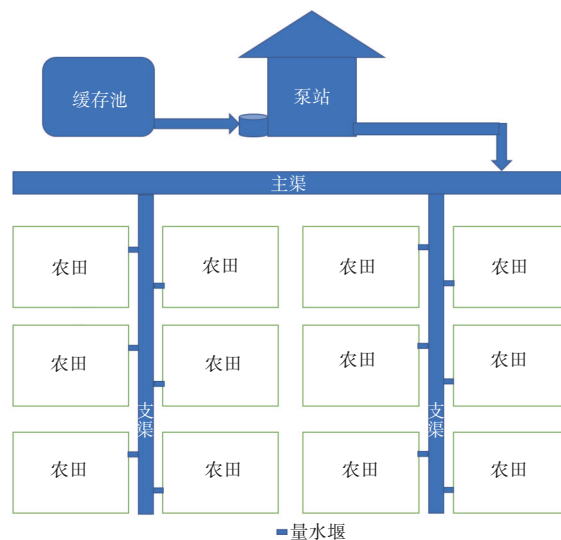


图2 小畦施用示意

Fig.2 Schematic diagram of small border application

施用后及时进行土地翻耕,翌年耕种时根据《测土配方施肥技术规范》(NY/T 1118—2006)减少化肥施用量。

3 核心单元设计

3.1 蛋白回收系统

蛋白回收系统的马铃薯工艺废水(汁水)处理能力约30 m³/h,工艺废水(汁水)蛋白回收率≥40%, COD去除率≥25%, SS去除率≥50%。蛋白回收主要包括细纤维分离单元、换热单元、絮凝单元、蛋白分离单元和烘干单元。

各工序主要设备及参数如下:纤维分离单元主要设备为2台细纤维离心筛,转速960~1 100 r/min,处理能力30 t/h。换热单元主要设备为3台螺旋板式换热器,2用1备,设计压力0.8 MPa,设计温度170℃,换热面积80 m²。絮凝单元主要设备为1台气水混合加热器和保温絮凝罐,设计压力1.6 MPa,额定流量10 m³/h。蛋白分离单元主要设备为2台并联卧螺离心机,分离因数最大为3 630(无级可调),处理能力30~50 m³/h。烘干单元设备生产能力500 kg/h,干燥管长22.6 m,功率15 kW。

3.2 土地利用系统

废水土地利用系统处理能力为 60 m³/h,包括还田预处理和土地施用两个核心单元,主要设计参数如下:

- ① 混合均化调节池。1 座,地上式钢筋混凝土结构(内部防腐),设计规模 1 440 m³/d,有效容积为 90 m³,HRT 为 1.5 h。配套设备:人工格栅 1 套(S304 材质);废水提升泵 2 台(1 用 1 备), $Q=60\text{ m}^3/\text{h}$, $N=11.0\text{ kW}$;浮球液位计、转子流量计、空气搅拌系统各 1 套。
- ② 斜管沉淀池。2 座,地上式钢筋混凝土结构(内部防腐),每座设计规模 720 m³/d,尺寸为 6.0 m×5.0 m×4.5 m,有效水深 4.0 m,污泥沉至底部的污泥斗内,再由污泥泵提升至污泥池,上清液自流至缓冲池。斜管沉淀池表面负荷 0.59 m³/(m²·h),固体负荷 100 kg/(m²·d)。配套设备:斜管填料 34 m²(直径 35 mm,高 800 mm,乙丙共聚材质);斜管支架 1 套;污泥泵 2 台(1 用 1 备), $Q=20\text{ m}^3/\text{h}$, $N=5.5\text{ kW}$ 。
- ③ 缓冲池。1 座,地上式钢筋混凝土结构(内部防腐),有效容积为 1 440 m³。配套设备:废水提升泵 3 台(2 用 1 备), $Q=100\text{ m}^3/\text{h}$, $N=15.0\text{ kW}$ 。
- ④ 土地施用系统。采用小畦灌溉方式,单个小畦面积≤160 m²,小畦田面高差≤±3 cm,农田废水最大施用量≤1 500 m³/hm²。

4 工艺运行效果

4.1 蛋白回收

根据当年企业马铃薯加工量估算,共产生工艺废水(汁水)约 36 700 m³,实际进入蛋白回收工序约 31 200 m³(占产生量的 85%),另有约 5 500 m³工艺废水(汁水)由于设备调试和临时检修而直接进入土地施用系统。根据表 1 中工艺废水氮含量和蛋白回收系统设计指标测算,可回收蛋白副产品 204~238 t。企业当年实际从工艺废水(汁水)中回收蛋白副产品 230 t(蛋白含量 77.9%,水分 11.7%),达

到工艺设计目标,且回收的蛋白副产品作为饲料级蛋白全部出售。

2019 年 11 月 12 日—17 日,每日上午和下午分别采集蛋白回收工序的进、出水水样分析,水质见表 2。

表 2 马铃薯工艺废水(汁水)、脱氮废水的水质
Tab.2 Quality of potato processing wastewater and denitrification wastewater

项目	COD	SS	总氮
马铃薯汁水/(mg·L ⁻¹)	36 318±820	7 560±529	2 173±112
脱氮废水/(mg·L ⁻¹)	29 373±2 332	3 420±170	1 283±113
污染物去除率/%	19.2	54.76	40.93

马铃薯淀粉工艺废水(汁水)经蛋白回收后 COD 降低 19.2%,蛋白回收率(总氮浓度降低) 40.93%,SS 降低 54.76%。蛋白回收工序的蛋白回收率、SS 去除率均达到设计指标,但 COD 去除率未达到设计要求,主要原因是随着生产进行,室外气温不断降低,马铃薯(露天堆场)中淀粉逐渐变成可溶性糖类有机物(糖化现象)^[18],导致汁水中可溶性有机物增加。后续生产中优化原料收储计划,并建设原料储存库,降低原料中淀粉糖化程度,减少汁水中可溶性有机物,有利于提高 COD 去除率。

4.2 废水土地利用

废水水质数据(见表 3)显示,马铃薯淀粉加工综合废水 pH 为 6.2±0.4,呈微酸性,有机质及全氮含量较高。示范工程所在地的土壤呈弱碱性,施用后可改善土壤理化性质、提升肥力。2019 年企业由于缺少原料而未满负荷生产,当年共生产马铃薯淀粉 7 200 t,产生加工废水约 66 400 m³。企业共流转农田 83.6 hm²,根据废水的营养含量和当年土地养分情况,玉米田平均施用综合废水 900 m³/hm²,施用面积 56 hm²;小麦田平均施用综合废水 600 m³/hm²,施用面积 24 hm²;其他作物农田平均施用加工废水 450 m³/hm²,施用面积 3.6 hm²,加工废水全部采用小畦方式施用,当年施用完毕。

表 3 土地利用工艺各工序水质
Tab.3 Wastewater quality of each process of land use technology

项目	pH	COD/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	总氮/(mg·L ⁻¹)	总磷/(mg·L ⁻¹)
脱氮废水	5.6±0.4	29 373±2 332	3 420±170	1 283±113	206±12
洗薯废水	6.7±0.5	5 394±351	2 430±150	84.7±6.2	21.5±1.6
混合均化池综合废水	6.4±0.4	19 340±1 160	3 006±210	781±31	129±5.2
沉淀池综合废水	6.2±0.4	18 187±1 013	2 660±154	742±42	126±4.7

2020年秋季,该企业2019年马铃薯淀粉加工废水还田地块青贮玉米产量59.4 t/hm²,小麦产量6.16 t/hm²。相比于未施用加工废水的农田,马铃薯加工废水还田地块青贮玉米产量增产10.41%(对照地块53.8 t/hm²),小麦增产6.94%(对照地块5.76 t/hm²),这表明施用马铃薯淀粉加工废水有助于提高作物产量。

5 效益分析

5.1 环境效益

2019年企业全部加工废水采用蛋白回收与土地利用联合处理工艺处理,减少排放废水量6.64×10⁴ m³,以《淀粉工业水污染物排放标准》(GB 25461—2010)中污染物直接排放标准限值核算,COD、SS、总氮、总磷的减排量分别为6.64 t、1.99 t、1.99 t、66.4 kg,基本实现了废水污染物向周围水体的“零排放”。

5.2 经济效益

5.2.1 经济效益分析方法

① 盈亏平衡点

盈亏平衡点是项目方案营业收入等于生产经营成本之点,计算公式如下:

$$BEP = \frac{C_f}{P - C_v - r} \times 100\% \quad (1)$$

式中:BEP为盈亏平衡点; C_f 为年固定成本; C_v 为年可变成本; r 为年销售税金及附加; P 为年销售收入。

② 财务净现值

财务净现值是一种绝对经济效益指标,是将项目寿命期内每年发生的现金流量,按一定的基准折现率,折现到同一时点的现值累加值。计算公式如下:

$$FNPV = \sum (C_t - C_0)_t (1 + i_0)^{-t} \quad (2)$$

式中:FNPV为财务净现值; C_t 为现金流入; C_0 为现金流出; $\sum (C_t - C_0)_t$ 为第 t 年净现金流量; i_0 为基准折现率。

③ 财务内部收益率

内部收益率是一种相对经济指标,是将项目在计算期内各年净现金流量现值累计等于零时的折现率。插值法试算公式如下:

$$FIRR = i_1 + NPV_1 (i_2 - i_1) / (NPV_1 + |NPV_2|) \quad (3)$$

式中:FIRR为财务内部收益率;NPV为净现值;

i_1 、 i_2 分别为两个试算收益率。

5.2.2 经济效益分析

据统计,蛋白回收与土地利用联合处理工艺厂房和设备投资1 193.2万元。2019年生产蛋白230 t,施用废水6.64×10⁴ m³,人工费为55.3万元,电、煤等能源费为37.46万元,土地租赁及农资费为39.2万元,蛋白销售收入为121.9万元,农产品销售收入为100.8万元。以企业2019年生产经营数据为基准,计算满负荷生产时蛋白回收与土地利用联合处理工艺运行费用和产品销售收入,并进行财务效益分析。示范工程财务数据参数选取如下:项目计算期为10年,农副食品加工行业基准收益率为8%,厂房和设备残值按10%计,采用平均年限法计算折旧和摊销。

① 盈亏平衡分析

计算期内,每年总成本271.4万元,固定成本157.2万元,可变成本114.2万元,年销售收入365.8万元,年销售税金及附加0.9万元,根据式(1)计算可得,示范工程的盈亏平衡点为62.7%,表明只要生产负荷达到设计能力的62.7%,蛋白回收与土地利用联合处理工艺就可以实现盈亏平衡,具有一定的抗风险能力。

② 财务净现值

计算期内,第一年现金流出1 119.4万元,第二年现金流出110.5万元,以后每年现金流出195.8万元。第一年以后每年现金流入365.8万元,最后一年现金流入633.5万元。财务基准收益率选择农副食品加工行业基准收益率为8%。根据式(2)计算可得,示范工程财务净现值(所得税后)为61万元,表明蛋白回收与土地利用联合处理工艺在达到农副食品加工行业基准收益率为8%的基础上,每年还有61万元收益。

③ 财务内部收益率

当收益率 $i=10\%$ 时,示范工程净现金流 $FNPV_1=-36$ (万元) <0 ;当收益率 $i=8\%$ 时,示范工程净现金流 $FNPV_1=61$ (万元) >0 。根据式(3)计算可得,示范工程财务内部收益率(所得税后)为9.21%,稍大于农副食品加工行业基准收益率(8%)。

5.3 社会效益分析

① 增加农民收入。2019年企业蛋白回收系统和土地系统用工34人次,合计支付工资55.3万元。企业周边农户将农田租给企业,户均8.3亩(约

0.55 hm²),单价300元/亩(折合4500元/hm²),获得农田流转费用2490元,若企业再雇佣该农户到企业打工(还田和农业种植),工资4000元/月,雇佣时间8个月,需支付约32000元,合计该农户收入34490元,相比2019年宁夏固原地区农村人均可支配收入(10656元),增收23834元。

② 减少化肥施用。该示范工程废水施用到农田后,增加土壤肥力,起到肥料作用。相比于周边没有施用马铃薯淀粉加工废水的农田,分别减少氮肥(尿素,氮含量46.4%)施用量405 kg/hm²(玉米)、191 kg/hm²(小麦);减少磷肥(过磷酸钙,有效P₂O₅含量16%)施用量853 kg/hm²(玉米)、862 kg/hm²(小麦)。

③ 提升农业生产水平。企业流转农田后,对原来的小块、凹凸起伏的旱田进行改造,形成大块平整的适于机械化作用的灌溉农田,大幅提升了农业生产水平。

6 结论

① 该示范工程设计并采用工艺废水(汁水)蛋白回收与综合废水土地利用联合处理工艺,将传统的污染治理投入模式转变为资源利用产出模式,最终实现了马铃薯淀粉废水污染的科学化、精准化治理。

② 示范工程工艺废水(汁水)蛋白回收率达到40.93%,SS去除率为54.76%,均达到工艺设计指标;对COD去除率为19.2%,略低于工艺设计指标。综合废水全部施入土地进行利用,实现了工艺设计目标。

③ 在环境效益方面,相比于废水达标排放模式,2019年示范工程实现减排废水COD 6.64 t、SS 1.99 t、总氮1.99 t、总磷66.4 kg;在经济效益方面,示范工程的投资收益大于风险,在8%的基准利率基础上,每年约有61万元(税后)的收益现值;在社会效益方面,示范工程增加就业岗位,提高农民收入,并提升农业生产水平,减少了农业氮肥(尿素,氮含量46.4%)施用量405 kg/hm²(玉米)、191 kg/hm²(小麦),减少了磷肥(过磷酸钙,有效P₂O₅含量16%)施用量853 kg/hm²(玉米)、862 kg/hm²(小麦)。

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.

ZHANG Lei, ZHAO Tingting, HE Hu. Research progress of food industry wastewater treatment technology [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(12): 7-13(in Chinese).

[2] 闫海红,年跃刚,周岳溪,等.预处理-水解酸化-厌氧-好氧工艺对玉米淀粉废水有机污染物的降解[J].环境工程学报,2015,9(10):4673-4679.

YAN Haihong, NIAN Yuegang, ZHOU Yuexi, et al. Biodegradation of organic compounds in corn starch wastewater through pretreatment-hydrolysis acidification-anaerobic-aerobic process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(10): 4673-4679(in Chinese).

[3] 孙理密,翟纪学,张德清,等.高氮磷有机食品废水处理工程实例分析[J].工业水处理,2022,42(1):171-174.

SUN Limi, ZHAI Jixue, ZHANG Deqing, et al. A treatment project case of organic food wastewater with high concentrations of nitrogen and phosphorus compounds [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(1):171-174(in Chinese).

[4] 于鹏飞,孙明,纪鑫奇,等.混凝沉淀-UASB-MBR耦合工艺处理屠宰废水[J].环境污染与防治,2018,40(7):737-742.

YU Pengfei, SUN Ming, JI Xinqi, et al. Treatment of slaughter wastewater by coagulation sedimentation-UASB-MBR coupling process [J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(7): 737-742 (in Chinese).

[5] 魏源送,郁达伟,曹磊.农副食品加工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术[J].环境科学,2014,35(4):1613-1622.

WEI Yuansong, YU Dawei, CAO Lei. Anaerobic membrane bioreactors for treating agricultural and food processing wastewater at high strength [J]. Environmental Science, 2014, 35(4): 1613-1622 (in Chinese).

[6] 李芳蓉,贺莉萍,王英,等.马铃薯淀粉生产废水资源化处理及综合利用[J].粮食与饲料工业,2018(6):31-37.

LI Fangrong, HE Liping, WANG Ying, et al. Wastewater treatment in potato starch production and comprehensive utilization [J]. Cereal & Feed Industry, 2018(6):31-37(in Chinese).

[7] 左金龙,杨少冬,夏至,等.马铃薯蛋白废水综合利用及在动物生产中的应用[J].饲料研究,2022(5):

- 154-157.
- ZUO Jinlong, YANG Shaodong, XIA Zhi, *et al.* Research progress on recycling of potato protein wastewater and application in animal production [J]. *Feed Research*, 2022(5):154-157(in Chinese).
- [8] 周添红. 马铃薯淀粉加工废水资源化及尾水可见光催化深度净化研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2018.
- ZHOU Tianhong. Resourceful Regeneration of Wastewater from Potato Starch Processing and Deep Purification of the Tail Water with Visible-Light-Driven Photocatalytic Degradation Technology [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018(in Chinese).
- [9] FANG C, BOE K, ANGELIDAKI I. Biogas production from potato-juice, a by-product from potato-starch processing, in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) and expanded granular sludge bed (EGSB) reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(10): 5734-5741.
- [10] 雷金银, 雷晓婷, 何进勤, 等. 马铃薯加工废水灌溉农田土壤肥力特征及其对施肥的响应[J]. *土壤*, 2022, 54(3): 473-480.
- LEI Jinyin, LEI Xiaoting, HE Jinqin, *et al.* Soil fertility characteristics and its response to fertilization of potato starch processing wastewater irrigation [J]. *Soils*, 2022, 54(3): 473-480(in Chinese).
- [11] 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(in Chinese).
- [12] 赵博超, 窦广玉, 王雪婷, 等. 长期施用马铃薯淀粉加工废水后土壤的氮磷累积与分配特征[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(5):81-87.
- ZHAO Bochao, DOU Guangyu, WANG Xueting, *et al.* Accumulation and distribution of nitrogen and phosphorus in soil with long-term application of potato starch processing wastewater [J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2021, 49(5): 81-87(in Chinese).
- [13] 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(in Chinese).
- [15] 李亚峰, 李志成. 慢速渗滤土地处理技术处理甜菜制糖冲洗废水[J]. *工业水处理*, 2014, 34(5):88-90.
- LI Yafeng, LI Zhicheng. Slow-rate percolation land treatment technique used for the treatment of flushing wastewater from beet sugar production [J]. *Industrial Water Treatment*, 2014, 34(5):88-90(in Chinese).
- [15] 张颖, 李鑫. 甜菜冲洗废水灌溉对土壤化学性质的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2014, 45(6):38-44.
- ZHANG Ying, LI Xin. Effect of irrigation with sugar beet rinse water on soil chemical properties [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2014, 45(6): 38-44(in Chinese).
- [16] 唐占一. 污水土地好氧生物过滤系统处理市政污水的中试试验研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2015.
- TANG Zhanyi. Study on the Treatment of Municipal Sewage in Land Aerobic Biological Filtration System [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [17] 王羽婷, 张皓东, 段小卫, 等. 土壤渗滤系统出水氨氮浓度不稳定的成因探究[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(1): 226-229.
- WANG Yuting, ZHANG Haodong, DUAN Xiaowei, *et al.* Causes leading to the instability and the corresponding examination of the effluent ammonia concentrations in the soil's aqua-system [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(1): 226-229 (in Chinese).
- [18] 侯娟. 马铃薯低温糖化相关淀粉酶基因的功能鉴定及机制解析[D]. 武汉:华中农业大学, 2017.
- HOU Juan. Function Characterization and Mechanism Dissection of the Amylase Genes Related to Cold-induced Sweetening in Potato [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017(in Chinese).

作者简介:赵博超(1987-),男,黑龙江哈尔滨人,工程师,硕士,主要从事农副食品废物和固体废物环境影响与资源化利用研究。

E-mail:phdzbc0814@163.com

收稿日期:2022-05-23

修回日期:2022-09-01

(编辑:衣春敏)