

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2021.12.002

微藻处理型废水及其特性研究进展

Research progress of wastewater processed by microalgae

崔元捷¹, 张红兵^{1*}, 何恒², 陈铁军², 郭帆²

CUI Yuanjie¹, ZHANG Hongbing^{1*}, HE Heng², CHEN Tiejun², GUO Fan²

(1.河北经贸大学 生物科学与工程学院, 石家庄 050061; 2.华电水务科技股份有限公司, 北京 100070)

(1. Biological Science and Engineering Institute, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China; 2. Huadian Water Technology Company Limited, Beijing 100070, China)

摘要:微藻在异养条件下可利用废水中的各种营养物质生长,在去除废水中的高营养物质和金属元素的同时生产生物燃料、生物活性物质、饲料添加剂等有益成分,是实现废水净化与生物质生产耦合的一种生物技术平台,具有效益良好、可持续性强的特点。然而气候条件、废水成分差异等原因对微藻大规模培养产生影响。参考近年来国内外利用各种废水进行微藻养殖的研究,综述不同废水的特点及其对微藻养殖造成的影响,介绍废水存在的营养缺乏、底物抑制、毒性和共存微生物等问题的解决方案。

关键词:废水处理;微藻;生物质生产;营养物质;微生物抑制;悬浮物

中图分类号:X 52:TK 09 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)12-0010-07

Abstract: Nourishing heterotrophic microalgae by various nutrients in wastewater can remove nutrients and metal elements from wastewater, and produce biofuels, bioactive substances, feed additives and other beneficial ingredients at the same time. It is a biotechnological platform coupling wastewater purification and biomass production, which is both profitable and sustainable. However, different climatic conditions and wastewater composition have posed problems on the large-scale cultivation of microalgae. Recent domestic and international researches on microalgae culture by eutrophic wastewater described the influence of different wastewater characteristics on microalgae growth, and provided solutions for the nutrient deficiency, substrate inhibition, toxicity and co-existing microorganisms existing in microalgae culture in wastewater.

Keywords: wastewater treatment; microalgae; biomass production; nutrients; microbial inhibition; suspended matter

0 引言

随着世界人口增加和工农业迅猛发展,水污染日益加剧。污染物中含有大量氮、磷等元素,还有铁、镁、钙等金属离子,导致水体严重富营养化。微藻虽是单细胞自养型生物,但在有机质环境中生长速率更高,有益于生产生物质燃料、多糖或饲料蛋白等产品^[1]。近年来微藻商业化培养需消耗大量营养源,效益不佳^[2],如果改用废水驯化并养殖微藻,可在净化废水的同时获取生物质,实现废水的循环利用,成为目前的研究热点^[3-5]。基于此有必要对废水的来源、组成及对微藻生长的影响进行归纳总结,为废水养殖微藻提供参考。

1 各类废水的相互关系

不同废水的组分不同、菌群迥异,有些废水浊度高、营养差、细菌污染严重并含有毒物质,导致微藻生长缓慢,甚至不适宜直接用于培养微藻^[6-7]。在环保工业中,废水可通过一定的方法和途径相互混合和转化:原废水经过格栅或筛滤器后进入沉砂池砂水分离,再进入初次沉淀池,以上为一级处理(物理处理)。初次沉淀池出水进入生物处理阶段,经活性污泥法(用于曝气池、氧化沟)、生物膜法(用于生物滤池、生物转盘、生物流化床)处理进入二次沉淀池。二次沉淀池出水经消毒后排放或进入三级处理,产生的污泥一部分回流至初次沉淀池或生物处理设备,一部分进入污泥浓缩池及污泥消化池,经脱水干燥后再利用,如图1所示。部分二级出水可采用生物脱氮除磷法、混凝沉淀法、砂滤法、活性炭吸附法、离子交换法和电渗析法进行三级处理。

收稿日期:2021-06-10;修回日期:2021-09-27

基金项目:河北省科技厅重点研发项目(18273612D);石家庄市科学技术研究与发展计划项目(191240243A)

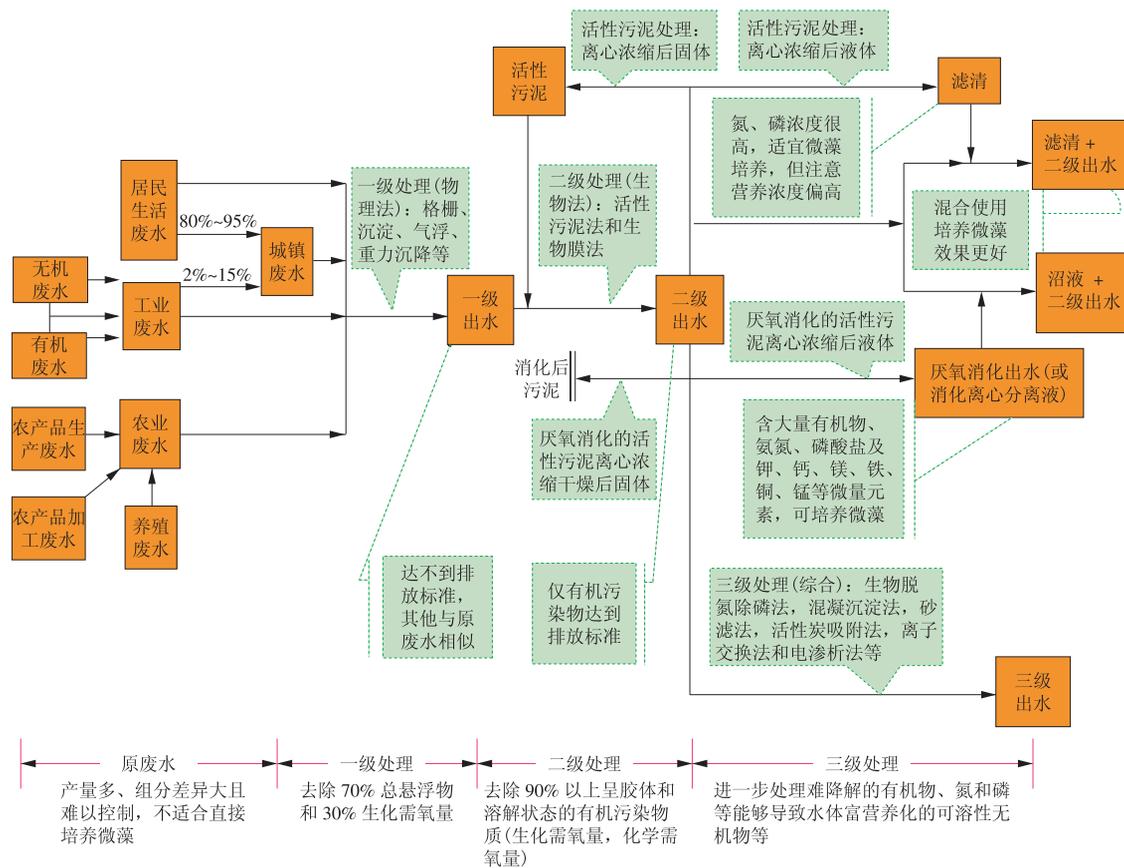


图 1 各类废水相互关系及对微藻生长的影响

Fig. 1 Relationship between different wastewater and the influence on microalgae growth

2 常见废水

2.1 原废水

工、农业生产及居民生活废水来源复杂、组分

各异,富含微藻必需的各类营养素(见表 1^[8])。

近年来有基于原废水培养单一或混合微藻的报道。Komolafe 等^[9]用含 42.30 mg/L 氮、35.40 mg/L 磷的原生活废水混合培养颤藻(*Oscillatoria*)和节旋

表 1 微藻培养废水中氮、磷、碳的典型组成^[8]

Tab. 1 Typical composition of nitrogen, phosphorus and carbon in wastewater for microalgae culture^[8]

类型	来源	氮/(mg·L ⁻¹)				磷/(mg·L ⁻¹)		碳/(mg·L ⁻¹)	
		NO ₃ -N	NH ₄ -N	TKN	TN	PO ₄ -P	TP	COD	TOC
工业废水	酿酒厂	2.0~11.0	3.0~106.0	—	—	—	57.0~326.0	565.0~7 837.0	—
	地毯厂	0~28.0	18.0~26.0	—	—	20.0~35.0	—	1 412.0	—
	乳品厂	<1.0	120.0~350.0	—	—	—	35.0~350.0	2 000.0~20 213.0	—
	石油、金属和化工	1.9	1.1	—	—	—	—	1 200.0	—
	仪表厂	—	67.0	128.6	—	—	120.6	—	—
	淀粉厂	—	49.0~115.0	—	—	—	50.0~385.0	2 470.0~15 440.0	—
	木材制浆造纸	—	—	—	—	—	—	1 248.0	—
农业废水	马铃薯加工	54.0	12.0	—	—	48.0	—	745.0	—
	稻米加工	—	—	—	25.0~95.0	12.0~94.0	—	2 578.0~6 480.0	—
城市废水	生活废水	—	25.0~66.0	—	—	7.0~12.0	—	400.0~500.0	—
	垃圾渗滤液	—	112.0~192.0	—	—	7.0~9.0	—	3 725.0~4 861.0	—
	下水道污水	1.0	23.0~219.0	—	—	1.0~12.0	—	183.0~380.0	—
厌氧消化废水	养牛场粪便	<1.0	1 279.0~1 961.0	—	—	—	240.0	4 855.0~4 945.0	—
	城镇废水	—	646.0	—	—	101.0	—	—	76.0
	猪舍粪便	—	324.0~656.0	—	—	117.0	—	—	1 247.0

注: NO₃-N, 硝态氮; NO₂-N, 亚硝态氮; NH₄-N, 氨态氮; TKN, 总凯氏氮; TN, 总氮; PO₄-P, 磷酸盐; DOP, 有机磷; TP, 总磷; TOC, 总有机碳。

藻(*Arthrospira*),并与单培养栅藻(*Desmodesmus* sp.)进行比较,分别获得0.45 g/L和0.58 g/L的生物量,但混合培养可去除82.0%的氮、61.0%的磷和99.8%的大肠杆菌。Wang等^[10]评价了小球藻(*Chlorella* sp.)对初级城镇废水的处理能力,生长速率为0.429/d,对氨态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、磷和化学需氧量(COD)的去除能力分别为74.7%、90.6%和56.5%。

室外条件下废水来源、流量及微生物分布多变,组分复杂,尤其是总悬浮物(TSS)高,光照、温度和pH值等环境因素波动频繁且难以控制^[4-5],造成实验室试验结果与室外实际值差异很大。Lu等^[11]利用乳品厂原废水评估小球藻生物量和营养物去除能力,结果显示在室内环境中生物量高达260.00 mg/(L·d),对氮、磷去除能力分别为88.38 mg/(L·d)

和38.34 mg/(L·d),而室外环境中相应指标分别为110.00 mg/(L·d),41.31 mg/(L·d),6.58 mg/(L·d)。微藻种类、废水成分、温度和光照等条件都会影响微藻的培养。下面将对各类废水的特点和对微藻培养的影响进行归纳。

2.1.1 工业废水

全世界每年产生工业废水数万亿t,其中TSS、生化需氧量(BOD)和COD最高可达每升数十克。Farag等^[12]估计仅用全球工业废水的50%培养微藻,每年就可产生24700万t生物量及3700万t脂类。

根据不同产业类型,工业废水分为有机废水(难/易生物降解2类)、无机废水(含必需营养素/有害重金属元素2类)和混合废水3类,以最后一种为主。各类废水的具体组成与来源有关,见表2^[8]。

表2 不同来源废水指标^[8]

Tab. 2 Composition of different types wastewater^[8]

来源	COD/(mg·L ⁻¹)	BOD/(mg·L ⁻¹)	TOC/(mg·L ⁻¹)	NH ₄ -N/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	TSS/(mg·L ⁻¹)	pH值
钢铁工业	150.00~ 6 000.00	—	—	10.00~300.00	7.00~8.00	—	500.00~ 2 500.00	7.00~8.00
医药化工	240.00~ 35 600.00	800.00~ 114 000.00	—	<0.20	5.25~ 7 500.00	89.00~ 4 200.00	0.06~1679.00	<1.00~6.70
纺织工业	728.00~ 6 000.00	250.00~ 700.00	90.60~108.00	4.80~100.00	21.00~57.00	0.83~120.00	16.00~46.00	7.80~10.40
采矿	—	—	27.30	—	0.20	0.23	—	4.20
橄榄油磨坊	—	—	26 460.00~ 32 680.00	—	410.00~ 1 020.00	30.00~ 1 000.00	41 900.00~ 54 760.00	4.90~5.10
食品加工	440.00~ 3 500.00	132.00~ 16 000.00	—	—	5.70~9.50	4.00~57.30	2.43~ 13 300.00	6.35~7.00
皮革加工	16 000.00	5 000.00	—	450.00	273.00	21.00	—	—
地毯制造	106.00~1 412.00	2.00~487.00	—	0.57~25.85	—	3.47~13.83	4.00~268.00	6.50~8.00
制浆造纸	1 120.00~ 1 160.00	200.00~ 210.00	—	—	—	—	80.00~90.00	5.50~6.80
乳品业	10 251.20	4 840.60	—	—	663.00	153.60	5 802.60	8.34
制糖业	1 360.00~ 2 000.00	300.00~ 2 200.00	—	—	—	—	220.00~ 790.00	6.50~8.80

油脂厂、食品厂和屠宰场等产生的非化工型有机废水中富含氮、磷、钙、铁、铝等元素,TOC也高,其中一些元素可以被微藻有效利用,可用于培养微藻。如培养斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)时仅在培养基中添加1%食品厂废水就可大幅提高生物量和油脂产量(棕榈酸和油酸含量提高8%),絮凝效果也很好^[13]。与此相反,机械化工类工厂废水往往富含重金属或有毒有机物,不利于微藻生长,尤其是机械电子工业废水中含有大量金属纳米物质(TiO_2 , ZnO , CeO_2 , NiO , Y_2O_3 , Al_2O_3 , Ag 和 Pt),会在微藻细胞内产生具有破坏作用的活性氧,对淡水藻和

海洋藻的生长都有抑制作用^[14-15]。

2.1.2 农业废水

广义农业涵盖农牧渔业,包括粮食作物种植和畜牧水产养殖等产业,其废水中含有动物粪便及植物秸秆、稻壳、树叶等成分,但目前直接利用农业废水培养微藻的研究极少。

在畜牧养殖业中,猪和家禽养殖废水中富含碳、氮、磷等有机营养物,BOD很高^[16],有理由相信动物粪便废水可能适宜培养微藻,也有一些微藻在农业废水生长和有效去除营养物质的报道^[17-19]。Sun等^[18]以经过 NaClO 灭菌处理并用3层纱布过滤

后的猪场废水为培养基(pH 值为 8.0 ± 0.3 , TN 为 (421.50 ± 9.19) mg/L, TP 为 (5.00 ± 0.28) mg/L, COD 为 (813.12 ± 39.83) mg/L), 在室外条件下培养普通小球藻。结果表明,藻细胞能够迅速适应废水和室外条件,指数生长期的比生长速率为 $0.120/d$, 略高于室内人工培养基培养时的比生长速率,同时对 TN, TP 和 COD 的去除率分别为 72.48%, 86.93% 和 85.94%。Ansari 等^[19]利用水产养殖废水(营养缺乏)补充硝酸钠方式合成半人工培养基进行小球藻(*Chlorella sorokiniana*)、斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)和镰形纤维藻(*Ankistrodesmus falcatus*)3 种藻的培养,发现废水中的 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和磷酸盐可有效去除,净化后的废水可回收用于水产养殖。

与此同时,农业废水存在的问题也不容忽视。

(1)营养物质含量两极化。废水中营养物质缺乏或营养物过高(高渗透压)均不利于微藻生长。

(2)不溶性有机物难利用。农业废水中不溶性有机物含量高,碳元素被“锁定”,制约微藻对碳的利用,造成碳元素严重浪费和不足并存的情况^[20]。

(3)高浊度废水遮挡光线。废水中悬浮物遮挡光线,影响微藻光合自养^[20-21]。

(4)农用化学物抑制作用。大量农药、杀虫剂、抗生素和其他化合物可能会影响微藻生长及生物质品质,特别是生产饲料蛋白时更应谨慎。

2.1.3 城市废水

城市废水通常为居民生活废水(80%~95%)混有少量工业废水(5%~20%),产量大、污染低,适宜微藻培养和制备生物质,是有效实现污染治理和能源再生耦合的重要途径,但存在如下问题。

(1)组分变化大。受地域、环境、季节和工农业生产影响,其典型成分包括 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、磷酸盐、BOD、COD 和微生物,还有难以去除的砷、镉、铬、铜、铅、汞、锌等有毒金属离子(见表 3),但营养组分波动大,不利于微藻的连续稳定培养^[22]。

Mennaa 等^[23]利用西班牙南部城市废水(COD 为 384.00 mg/L, TP 为 12.70 mg/L, TN 为 54.58 mg/L)培养 7 种微藻,结果显示最佳生物质产量为 118.00~108.00 mg/L,其中斜生栅藻效果最好,总溶解磷和硝态氮质量分数分别降低了 80% 和 87%。Guldhe 等^[24]利用城市废水培养小球藻(*Chlorella kessleri* 和 *Chlorella vulgaris*),结果生物量(干重)分别达到 (2.70 ± 0.08) g/L 和 (2.91 ± 0.02) g/L,分别消除 96% 和 95% 的 TN,并分别消除 99% 和 98% 的 TP。韩松芳等^[25]利用斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)、蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)原始株和油脂产量较高的诱变株处理城市废水,发现所有微藻生长情况

表 3 典型城市废水(混有少量工业废水)成分^[22]

Tab. 3 Components of typical municipal wastewater(mixed with little industrial wastewater)^[22]

参数	数值	参数	数值
COD/(g·m ⁻³)	300.0~900.0	铝/(mg·m ⁻³)	350.0~1 000.0
BOD/(g·m ⁻³)	140.0~350.0	镉/(mg·m ⁻³)	1.0~4.0
TN/(g·m ⁻³)	30.0~100.0	铬/(mg·m ⁻³)	10.0~25.0
NH ₄ -N/(g·m ⁻³)	20.0~75.0	铜/(mg·m ⁻³)	30.0~70.0
NO ₃ -N+NO ₂ -N/(g·m ⁻³)	0.1~0.5	铅/(mg·m ⁻³)	25.0~80.0
DON/(g·m ⁻³)	10.0~25.0	汞/(mg·m ⁻³)	1.0~3.0
TKN/(g·m ⁻³)	30.0~100.0	TSS/(g·m ⁻³)	250.0~600.0
TP/(g·m ⁻³)	6.0~25.0	VSS/(g·m ⁻³)	200.0~480.0
PO ₄ -P/(g·m ⁻³)	4.0~15.0	pH 值	7~8
DOP/(g·m ⁻³)	2.0~10.0		

注:VSS 为挥发性悬浮物。

都很好,可以实现水质净化,使废水中 COD 去除率达到 80% 以上, TN 及 TP 去除率分别达到 93% 以上,其中氨氮的去除率可达 100%。

(2)宏量营养浓度低。虽然废水中含有氮、磷等微藻生长所必需的宏量元素,但质量浓度较低,不足以维持微藻长期生长。

(3)微量元素“双刃剑”。低质量浓度微量元素对微藻有益,但工业废水中微量元素质量浓度高,有毒副作用。

(4)悬浮物遮挡阳光。城市废水的主体为居民生活废水,有一定颜色,悬浮固形物含量高,遮蔽阳光,使微藻培养体系内光分布不均,不利于微藻光合作用。

(5)新型污染物过多。越来越多的激素、药物等新型化合物通过化妆品和表面活性剂进入废水,难以被微藻利用,成为持续涌现的新难题。Godos 等^[26]在实验室条件下利用高效藻类培养池除去人工合成废水中的四环素。Matamoros 等研究了去除咖啡因、布洛芬、佳乐麝香、磷酸三丁酯、4-辛基酚等有机污染物,去除率从可忽略不计到 99% 不等,并且夏季高于冬季,说明季节、有机物类型、去除方法都对有机污染物去除率有重要影响^[27-28]。

(6)其他微生物抑制。废水中存在大量细菌或原生动物,二者相互竞争,争夺营养;同时前者会分泌化合物攻击微藻;另外代谢废物还会改变环境的 pH 值和营养物质^[29]。只有极少数条件下微藻和细菌能够形成菌藻共生体并产生良性互动^[30]。

2.2 废水处理厂出水

2.2.1 一级出水

生物处理过程之前,废水通过格栅、沉淀或气

浮等重力沉降型机械处理,可去除 70% 总沉降物(砂石)和脂肪等得到一级出水。与原废水类似,其营养物质质量浓度高,含有 COD, TSS 和其他生长抑制剂。如一级出水中 COD 质量浓度达 270.00 mg/L 就可影响微藻异养和混合培养的代谢途径^[31]。另外,一级出水光透性差,细菌含量高且存在与微藻竞争养分和有机碳的问题。利用一级出水培养微藻成功案例较多,情况与原废水类似,不再赘述。

2.2.2 二级出水

废水中的污染物在生物处理过程中被细菌混合种群降解并转化为污泥,使二级出水中 BOD 和营养物浓度降低,有毒化合物减少,最适宜培养微藻,但有时需额外补充营养物质。需要注意的是,二级出水的微生物含量高不利于微藻生长,需预处理除菌。Cho 等^[32]在利用二级出水大规模培养小球藻(*Chlorella* sp.)制备生物燃料生产过程中,使用 TN 为 19.10 mg/L, TP 为 1.20 mg/L, COD 为 15.30 mg/L 的二级出水,经过 0.2 μm 过滤器过滤后,微藻的生物量和脂肪的生产能力分别为 74.00 mg/(L·d) 和 22.90 mg/(L·d),远高于使用未过滤二级出水培养微藻,表明过滤降低了细菌和其他有害微生物,二级出水利用效果更好。

2.2.3 滤清/污泥液

活性污泥通过浓缩工艺得到滤清/污泥液,其氮、磷浓度很高,适宜培养微藻时的持续性消耗。比较原废水、一级出水、二级出水和滤清分别培养小球藻的效果,发现其在滤清中生长速率最高,原废水次之,表明微藻生长与养分去除及培养液中营养浓度正相关^[33]。另外,适应城市废水的小球藻(*Chlorella* sp.)可成功生长于滤清中^[34],小球藻(*Chlorella* sp.), *Heynigia* sp., *Hindakia* sp. (以上 2 种藻属国外藻种库,尚无中文名称),微芒藻(*Micractinium* sp.)和栅藻(*Scenedesmus* sp.)可在氨氮质量浓度 91.00 mg/L,正磷酸盐质量浓度 212.00 mg/L, COD 质量浓度 2324.00 mg/L 的滤清中培养,生长率达到 0.455~0.498/d,脂质为 74.50~77.80 mg/(L·d)^[31]。滤清中钠离子质量浓度达到 400.00 mg/L 时对淡水藻产生毒性^[35]。滤清除可以直接用于培养微藻外,还可作为二级出水的补充营养,同时也应注意滤清中盐分尤其是重金属高,微生物复杂,对微藻生长有一定副作用。

2.2.4 厌氧消化出水/消化离心分离液

废水经过厌氧消化和过滤器除去固体后,其分离液中仍含有大量有机物、氨氮、磷酸盐以及钾、钙、镁、铁、铜、锰等微量金属元素,可作为微藻营养源^[34,36-37]。Min 使用厌氧消化出水(其中氨氮、硝酸

盐、磷酸盐和 COD 的质量浓度分别为 113.00 mg/L, 0.35 mg/L, 215.00 mg/L 和 3027.00 mg/L)成功培养了微藻^[38]。Morales-Amaral 等^[37]在培养 *Muriellopsis* sp. 和 *Pseudokirchneriella subcapitata*。这 2 种微藻时加入 40%~50% 的厌氧消化出水作为唯一营养源,微藻生产能力分别达 1.13 和 1.02 g/(L·d),氮、磷分别去除了 90%, COD 质量浓度低于 100.00 mg/L。但是,使用厌氧消化出水时必须经过稀释,其质量分数高于 50% 时,其中的高浓度尿素、有机酸、酚类和杀虫剂等会产生毒性影响微藻生长^[39]。

因为金属离子的主要结合位点在细胞壁,不同微藻细胞的形状、大小和细胞壁组分存在差异,影响金属离子结合效率,表现出不同藻种对金属离子的耐性差异很大^[9]。即使是必需元素,质量浓度过高时也会干扰光合作用,抑制生长和脂质生成,所以藻种选择至关重要。注意耐盐藻株如盐生微球藻(*Nannochloropsis salina*)虽对高浓度重金属有适应性,但用于生产饲料添加剂时存在潜在风险^[36]。

畜禽养殖粪污水的有机物和氨氮含量很高,采用沼气发酵只能将部分有机污染物转化为沼气,却无法脱除高质量浓度的氨氮和无机磷,最终排出的沼液中仍含有大量有机物、高浓度氨氮、磷酸盐及钾、钙、镁、铁、铜、锰等金属元素,直接排放仍会造成污染^[35-40]。可将沼液或消化离心分离液与二级出水混合,一方面降低了离心分离液毒性,同时又解决了二级出水的营养缺乏问题。

3 结束语

来自于工农业和生活的原废水,其营养物浓度两极分化,不利于培养微藻;污水处理厂利用物理、化学和生物等方法处理后得到一级、二级或三级出水,浓缩了营养物质,同时有害物质的浓度也上升;因此必须采取一定措施(如不同废水的混合,微藻的驯化和基因工程改造)进行处理,以实现废水处理 and 生物质生产的有效耦合。我国是废水生产大国,利用微藻对废水进行深度无害化处理,可以实现水资源以及氮、磷等资源的多重循环利用,缓解水体污染和水资源短缺,有利于实现能源经济的可持续循环发展,因此加强微藻处理废水的研究是环保领域的重要发展方向,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] CATONE C M, RIPA M, GEREMIA E, et al. Bio-products from algae-based biorefinery on wastewater: A review [J/OJ]. Journal of Environmental Management, 2021. (2020-12-31)[2021-05-

- 28].<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112792>.
- [2]ALI S, PETER A P, CHEW K W, et al. Resource recovery from industrial effluents through the cultivation of microalgae: A review [J/OL]. *Bioresource Technology*, 2021. (2021-05-10) [2021-06-28]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125461>.
- [3]ZHOU X, JIN W B, WANG Q, et al. Enhancement of productivity of *Chlorella pyrenoidosa* lipids for biodiesel using co-culture with ammonia-oxidizing bacteria in municipal wastewater [J]. *Renewable Energy*, 2020, 151: 598-603.
- [4]GAO F, YANG H L, LI C, et al. Effect of organic carbon to nitrogen ratio in wastewater on growth, nutrient uptake and lipid accumulation of a mixotrophic microalgae *Chlorella* sp. [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 282: 118-124.
- [5]胡小夫,王凯亮,沈建永,等.基于生物固碳技术的CO₂资源化利用研究进展[J]. *华电技术*, 2021, 43(6): 79-85.
HU Xiaofu, WANG Kailiang, SHEN Jianyong, et al. Research progress of CO₂ resource utilization based on biological carbon sequestration technology [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(6): 79-85.
- [6]FALLAHI A, HAJINAJAF N, TAVAKOLI O, et al. Cultivation of mixed microalgae using municipal wastewater: Biomass productivity, nutrient removal, and biochemical content [J]. *Iran Journal of Biotechnol*, 2020, 18(4): 88-97.
- [7]JAMSA M, LYNCH F, SANTANA-SANCHEZ A, et al. Nutrient removal and biodiesel feedstock potential of green alga UHCC00027 grown in municipal wastewater under Nordic conditions [J]. *Algal Research*, 2017, 26: 65-73.
- [8]GONCALVES A L, PIRES J C M, SIMOES M. A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment [J]. *Algal Research*, 2017, 24: 403-415.
- [9]KOMOLAFE O, ORTA S B V, MONJE-RAMIREZ, et al. Biodiesel production from indigenous microalgae grown in wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 154(2): 297-304.
- [10]WANG L, MIN M, LI Y C, et al. Cultivation of green algae *Chlorella* sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant [J]. *Applied Biochemistry & Biotechnology*, 2010, 162(4): 1174-1186.
- [11]LU W D, WANG Z M, WANG X W, et al. Cultivation of *Chlorella* sp. using raw dairy wastewater for nutrient removal and biodiesel production: Characteristics comparison of indoor bench-scale and outdoor pilot-scale cultures [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 192: 382-388.
- [12]FARAG I, ZUKA Z, MCCONNELL B. Comparison of freshwater and wastewater medium for microalgae growth and oil production [J]. *Journal of American Science*, 2012, 8(2): 392-398.
- [13]JI M K, YUN H S, PARK S H, et al. Effect of food wastewater on biomass production by a green microalga *Scenedesmus obliquus* for bioenergy generation [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 179(7): 624-628.
- [14]ZHOU W G, LI Y C, MIN M, et al. Growing wastewater-born microalga *Auxenochlorella protothecoides* UMN280 on concentrated municipal wastewater for simultaneous nutrient removal and energy feedstock production [J]. *Applied Energy*, 2012, 98(5): 433-440.
- [15]于鹏飞. 纳米银对念珠藻的毒性效应及其机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [16]OLGUIN E J. Dual purpose microalgae-bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a biorefinery [J]. *Biotechnology Advances*, 2012, 30(5): 1031-1046.
- [17]WANG B, LAN C Q. Biomass production and nitrogen and phosphorus removal by the green alga *Neochloris oleoabundans* in simulated wastewater and secondary municipal wastewater effluent [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(10): 5639-5644.
- [18]SUN Z L, SUN L Q, CHEN G Z. Microalgal cultivation and nutrient removal from digested piggery wastewater in a thin-film flat plate photobioreactor [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2019, 187(4): 1488-1501.
- [19]ANSARI F A, SINGH P, GULDHE A, et al. Microalgal cultivation using aquaculture wastewater: Integrated biomass generation and nutrient remediation [J]. *Algal Research*, 2017, 21: 169-177.
- [20]ZHOU W G, CHEN P, MIN M, et al. Environment-enhancing algal biofuel production using wastewaters [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 36: 256-269.
- [21]CHEN G Y, ZHAO L, QI Y. Enhancing the productivity of microalgae cultivated in wastewater toward biofuel production: A critical review [J]. *Applied Energy*, 2015, 137: 282-291.
- [22]CAPORGNO M P, TALEB A, OLKIEWICZ M, et al. Microalgal cultivation in urban wastewater: Nutrient removal and biomass production for biodiesel and methane [J]. *Algal Research*, 2015, 10: 232-239.
- [23]MENNAA F Z, ARBIB Z, PERALES J A. Urban wastewater treatment by seven species of microalgae and an algal bloom: Biomass production, N and P removal kinetics and harvestability [J]. *Water Research*, 2015, 83: 42-51.
- [24]GULDHE A, KUMARI S, RAMANNA L, et al. Prospects, recent advancements and challenges of different wastewater streams for microalgal cultivation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 203: 299-315.
- [25]韩松芳,金文标,涂仁杰,等.基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理[J]. *环境科学*, 2017, 38(8): 3347-3353.
HAN Songfang, JIN Wenbiao, TU Renjie, et al. Selection of microalgae for biofuel using municipal wastewater as a resource [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(8): 3347-3353.
- [26]GODOS D I, MUNOZ R, GUIEYSSE B. Tetracycline removal

- during wastewater treatment in high-rate algal ponds [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 229-230(5): 446-449.
- [27] MATAMOROS V, UGGETTI E, GARCIA J, et al. Assessment of the mechanisms involved in the removal of emerging contaminants by microalgae from wastewater: A laboratory scale study [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 301: 197-205.
- [28] MATAMOROS V, GUTIERREZ R, Ferrer I, et al. Capability of microalgae-based wastewater treatment systems to remove emerging organic contaminants: A pilot-scale study [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 288: 34-42.
- [29] WANG T, YABAR H, HIGANO Y. Perspective assessment of algae-based biofuel production using recycled nutrient sources: The case of Japan [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 128: 688-696.
- [30] MAHAPATRA D M, CHANAKYA H N, RAMACHANDRA T V. Treatment efficacy of algae-based sewage treatment plants [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2013, 185(9): 7145-7164.
- [31] ZHOU W G, LI Y C, MIN M, et al. Local bioprospecting for high-lipid producing microalgal strains to be grown on concentrated municipal wastewater for biofuel production [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(13): 6909-6919.
- [32] CHO S, LUONG T T, LEE D, et al. Reuse of effluent water from a municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(18): 8639-8645.
- [33] LEDDA C, VILLEGAS G I R, ADANI F, et al. Utilization of centrate from wastewater treatment for the outdoor production of *Nannochloropsis gaditana* biomass at pilot-scale [J]. *Algal Research*, 2015, 12(4): 17-25.
- [34] LI Y C, CHEN Y F, CHEN P, et al. Characterization of a microalga *Chlorella* sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(8): 5138-5144.
- [35] OSUNDEKO O, PITTMAN J K. Implications of sludge liquor addition for wastewater-based open pond cultivation of microalgae for biofuel generation and pollutant remediation [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 152(1): 355-363.
- [36] DONG B F, HO N, OGDEN K L, et al. Cultivation of *Nannochloropsis salina* in municipal wastewater or digester centrate [J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2014, 103: 45-53.
- [37] MORALES-AMARAL M D M, GOMEZ-SERRANO C, ACIEN F G, et al. Production of microalgae using centrate from anaerobic digestion as the nutrient source [J]. *Algal Research*, 2015, 9: 297-305.
- [38] MIN M, WANG L, LI Y C, et al. Cultivating *Chlorella* sp. in a pilot-scale photobioreactor using centrate wastewater for microalgae biomass production and wastewater nutrient removal [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2011, 165: 123-137.
- [39] DJELAL H, TAHRANI L, FATHALLAH S, et al. Treatment process and toxicities assessment of wastewater issued from anaerobic digestion of household wastes [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2014, 21: 2437-2447.
- [40] 李亚丽, 赵国强, 武双, 等. 畜禽废水处理技术研究进展 [J]. *水处理技术*, 2021, 47(9): 18-22.
- LI Yali, ZHAO Guoqiang, WU Shuang, et al. Research progress of livestock and poultry wastewater treatment technology [J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, 47(9): 18-22.

(本文责编: 惠忻)

作者简介:

崔元捷(1997—), 男, 山西临汾人, 在读硕士研究生, 从事生物工程及水污染处理方面的研究(E-mail: 572258716@qq.com)。

张红兵*(1966—), 男, 河北枣强人, 教授, 硕士生导师, 博士, 从事生物工程及水污染处理方面的研究(E-mail: 335449264@qq.com)。

何恒(1975—), 男, 河南南阳人, 工程师, 从事水污染治理、水厂工艺设计、水厂运维等方面的研究(E-mail: heh@chec.com.cn)。

陈铁军(1985—), 男, 河北承德人, 高级工程师, 从事水污染治理及水污染治理方面的研究(E-mail: chentj@chec.com.cn)。

郭帆(1986—), 男, 河北石家庄人, 工程师, 从事水污染治理及水污染治理方面的研究(E-mail: 450826609@qq.com)。