



垃圾渗滤液培养微藻研究进展:向碳中和迈进

陈俊任¹,张立斌²,刘晴晴¹,任子安¹,韩庆祥¹,张立杰¹

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

[摘要] 高毒、高污染的垃圾渗滤液对自然水源造成了严重威胁,利用技术手段对其进行有效处理是解决环境问题的重中之重。采用垃圾渗滤液进行微藻培养,可以在实现垃圾渗滤液中碳、氮、磷高效去除的同时,提高微藻生物质产量并减少 CO₂ 排放量。然而,垃圾渗滤液高污染物含量、高浊度的特点决定了其必须经过一定的预处理才能够用于微藻培养。总结了垃圾渗滤液的特点,探讨了用于微藻培养的渗滤液的预处理方式及其存在的瓶颈,解析了利用垃圾渗滤液培养微藻所获得的生物质的用途,展望了利用微藻处理垃圾渗滤液技术在推动国家新旧动能转换和碳中和建设中发挥的作用及其未来的科技攻关方向,为实现垃圾渗滤液处理与微藻生物质的有效集成提供参考。

[关键词] 垃圾渗滤液;微藻;废水预处理;生物质;碳中和

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)11-0032-08

Research progress in the cultivation of microalgae with landfill leachate : A step change towards carbon neutrality

CHEN Junren¹, ZHANG Libin², LIU Qingqing¹, REN Zian¹, HAN Qingxiang¹, ZHANG Lijie¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China ;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Landfill leachate with high toxicity and high pollution poses a serious threat to natural water sources, and its effective treatment technology is the top priority for solving environmental problems. Cultivating microalgae with landfill leachate can not only achieve the efficient removal of carbon, nitrogen and phosphorus in landfill leachate, but also improve the production of microalgae biomass and reduce CO₂ emissions. However, pretreatment of landfill leachate before microalgae cultivation was indispensable due to the high pollutant content and high turbidity in the landfill leachate. In this paper, the characteristics of landfill leachate were summarized, the methods of wastewater pretreatment before culturing microalgae and their existing bottlenecks were discussed, and the use of microalgae biomass cultivated in landfill leachate was analyzed. At last, the role of using microalgae to treat landfill leachate in promoting the conversion of new and old kinetic energy and the construction of carbon neutrality in the country was prospected, and the direction of future scientific and technological research was pointed out. This paper could provide a reference for the treatment of landfill leachate and the effective integration of microalgae biomass.

Key words: landfill leachate; microalgae; wastewater pretreatment; biomass; carbon neutrality

随着全球人口的不断增长,人类活动越来越频繁,随之而来的便是堆积成山的城市固体垃圾废物^[1]。目前,城市垃圾最常用的处理方式包括卫生填埋、焚烧和堆肥等^[2-3]。垃圾在堆积过程中经过一系列的生物分解与物理化学过程,产生一种成分复杂、毒性较大的渗滤液^[3],这种高毒、高污染垃圾渗滤液已经严重威胁到了自然水源,采用高效的处理

技术对其进行处理是解决环境问题的重中之重。

近年来微藻以其生长周期短、光合作用强、油脂产率高等与碳中和目标相关的竞争性优势进入废水处理研究的主流技术领域^[4-6]。一方面,垃圾渗滤液中含有碳、氮、磷等营养物质,可以为微藻生长提供充足的营养源^[7],另一方面,微藻可以吸收去除渗滤液中的污染物,实现对垃圾渗滤液的有效净化,因此

[基金项目] 中国博士后科学基金第 67 批面上资助项目(2020 m672086);山东建筑大学博士科研基金项目(X20005Z)

利用垃圾渗滤液培养微藻实现废水处理与生物质生产有效集成的研究成为废水与能源研究领域的攻关热点。然而,截至目前,关于这方面的综述报道很少,相应地,对于该技术所面临的难题及技术瓶颈的讨论也较少。笔者从垃圾渗滤液的特点、渗滤液预处理技术、微藻培养的生物能源生产分析入手,梳理垃圾渗滤液培养微藻的各个环节存在的技术难点,挖掘切实可行的解决途径,提出“微藻全链条”新理念,以期实现微藻预处理—微藻培养—微藻能源积累的全链条响应机制。

1 垃圾渗滤液的特点

垃圾渗滤液是指来源于垃圾填埋场中垃圾本身含有的水分、进入填埋场的雨雪水及其他水分,扣除垃圾、覆土层的饱和持水量,并经历垃圾层和覆土层而形成的一种高浓度的有机废水,还有堆积的备用用于焚烧的垃圾渗漏出的水分。垃圾渗滤液具有有机物含量高、氨氮高(1 000~5 000 mg/L)^[8]、无机化合物种类多、重金属离子种类多等特点。渗滤液中的高营养物质、高浓度有机物以及其他有毒有害化合物,如重金属和异生物质(如酚类和农药)等,对人类和环境构成严重威胁^[9]。

利用垃圾渗滤液培养微藻实现垃圾渗滤液处理与微藻生物质的有效集成成为污水资源化新的突破点。然而,由于垃圾渗滤液高氨氮、高浊度等特点,不适合用于直接培养微藻,必须对其进行一定程度的预处理。

2 垃圾渗滤液预处理

垃圾渗滤液的高色度、高浊度、高盐含量等水质特点限制了微藻的高效生长,对其进行预处理后用于微藻培养成为废水培养微藻领域的主流^[10-11]。目前,针对垃圾渗滤液培养微藻的预处理方法主要有淡水稀释法、高级氧化法、混凝-过滤/吸附法等。

2.1 淡水稀释

由于垃圾渗滤液中的碳、氮及有害物质浓度过高,抑制了微藻生长,用淡水将渗滤液中的污染物稀释至合适的浓度来培养微藻有利于收获合适的生物量。Z. T. KHANZADA等^[12]采用淡水对垃圾渗滤液进行了不同比例的稀释预处理,得到垃圾渗滤液质量分数为10%~100%的系列溶液,并将其用于微藻菌株生长评估,结果显示,稀释后混合溶液中微藻生

物量明显上升,当渗滤液质量为混合溶液的50%时微藻生长最为理想。H. O. TIGHIRI等^[8]通过稀释得到不同浓度的垃圾渗滤液,采用光生物反应器序批式培养微藻,研究发现,最佳稀释比例下,微藻可将渗滤液中83.6%的总氮和90%的COD转化为生物质,所获取生物量大大提高。

利用淡水稀释实现垃圾渗滤液预处理后用于培养微藻,虽然在操作上简单易行,但当渗滤液成分特别复杂时微藻的培养效果往往不达预期。此外,采用大量淡水对垃圾渗滤液进行稀释造成了水资源的极大浪费,也使得该技术成本大大提高。未来研究中可以采用废水对渗滤液进行稀释来进一步优化该手段,以此降低渗滤液的预处理成本,避免水资源的浪费。

2.2 高级氧化

垃圾渗滤液中含有难降解有机物,利用淡水对其进行稀释仅仅是减轻了其对微藻生长的不利影响,并不能从根本上解除其对微藻生长的抑制。高级氧化工艺(AOPs)在去除难降解有机物方面效果较好,且其最终产物是CO₂、水和其他无机离子,对环境无害^[13],可考虑将经其预处理后的垃圾渗滤液直接用于微藻培养。

2.2.1 电化学氧化技术

电化学氧化技术是一种备受关注的绿色技术,其通过在电场作用下产生的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧自由基(O₂⁻)等活性氧来高效去除多种难降解污染物^[14],可有效缓解微藻处理垃圾渗滤液的压力。

H₂O₂、高锰酸盐、臭氧和过硫酸盐(PS)是AOPs中最常用的氧化剂^[15]。Weixuan ZHANG等^[16]通过过硫酸盐-铁碳微电解(PS-ICME)系统对垃圾渗滤液进行预处理,并采用响应面法确定3个独立变量(pH、铁碳质量比、过硫酸盐投加量)与响应值(COD)之间的关系,结果显示,在初始pH为7、铁碳质量比为3、过硫酸盐投加浓度为85 mmol/L时系统对垃圾渗滤液的处理效果最佳,COD去除率达到62.91%,微藻可以直接利用预处理后的垃圾渗滤液进行生长代谢。尽管利用微藻进行废水生物修复以去除有毒物质及回收营养物质的可行性已被证实^[17-18],但像高游离氨氮(FAN)、高色度、重金属、有毒的外源有机物、细菌和渗透压这些因素却依然制约着微藻处理技术的发展^[19]。Haixing CHANG等^[20]

通过对反渗透浓缩液(ROC)进行电氧化预处理,使 ROC 中 FAN 由 53 mg/L 锐减到 13.9 mg/L,色度由 1 600 倍降至 100 倍,极大地缓解了微藻处理的后续压力。

利用电化学氧化技术预处理垃圾渗滤液来培养微藻效果良好,然而一直存在的电极成本较高、能耗较大等电化学氧化技术的固有问题限制了该技术的规模化应用进程。

2.2.2 臭氧氧化技术

臭氧氧化是另一类常用的渗滤液高级氧化预处理方法,渗滤液中难降解有机物可在臭氧和 $\cdot\text{OH}$ 的联合作用下被降解甚至矿化^[21]。J. DERCO 等^[22]利用臭氧氧化法预处理新鲜的和成熟的 2 种垃圾渗滤液,结果表明,臭氧氧化技术对于成熟的垃圾渗滤液中有机物的去除效果较好,反应 2 h 后 COD、有机碳、氨氮的去除率分别达到 65%、43%、32%,可以为微藻生长提供合适的碳、氮浓度。但是因臭氧氧化后废水 $\text{BOD}_5 < 2 \text{ mg/L}$,可生化性较低,综合来讲依然不利于微藻后续的培养。

此外,将臭氧氧化与其他工艺技术相结合应用于垃圾渗滤液的处理成为新的攻关领域。Weiming CHEN 等^[23]将生物滤池(SAARB)与臭氧氧化技术相结合处理垃圾渗滤液,渗滤液可生化性大大提高。R. POBLETE 等^[24]以木屑作为活性炭材料,将吸附和臭氧氧化相结合对垃圾渗滤液进行净化研究,结果表明,木屑的形状和孔隙的不规则性导致其对渗滤液中的氨氮、铁和铜去除能力较强,解除了氨氮和重金属对微藻生长的抑制,缓解了微藻后续的生长压力。此外,在过滤、吸附、光 Fenton 与臭氧氧化相结合的综合处理技术中,渗滤液中 COD、色度、氨氮和腐殖酸的去除率均高达 95% 以上,碳、氮浓度,浊度,腐殖酸不再是微藻生长的限制因素。

臭氧氧化技术在反应前期对有机物的去除效果明显,但对渗滤液中难降解物质的降解没有明显的改善,预处理后的渗滤液用于微藻培养效果不是特别理想,而且还存在臭氧利用率低、成本高等缺点。未来研究应侧重于进一步提高臭氧氧化技术对于难降解有机物的处理性能。

2.3 混凝-过滤/吸附法

垃圾渗滤液中氮、有机物含量高,其高毒性和低生物降解性的特点使得微藻在吸收利用污染物方面

效率低下^[25-26],为解决此问题,研究人员将混凝和过滤、吸附等技术相结合,以期提高对垃圾渗滤液的预处理效果。

S. S. KAMALA 等^[27]将混凝和过滤技术相结合,以 $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2$ 为混凝剂对渗滤液进行混凝处理,之后采用改进的过滤系统对混凝处理后的渗滤液进行过滤净化,之后用于小球藻培养。结果显示,小球藻在预处理后的垃圾渗滤液中生长良好,可将 97% 的 COD 和 69% 的总氮转化为生物质。M. SOBRINHO 等^[28]将混凝/絮凝和吸附相结合,首先用熟石灰与蒸馏水制备“石灰乳”来凝结渗滤液中的污染物,然后用牡蛎粉作为吸附剂对渗滤液中凝结物进行吸附,使渗滤液中 95% 的 BOD 和 40% 的 COD 得到了有效的处理。

混凝、吸附这类综合技术在预处理垃圾渗滤液用于微藻培养方面,具有绿色环保、简单方便的优点,但其居高不下的成本限制了这类技术的发展。为了提高该技术的经济可行性,需要在开发新型天然活性剂、低成本活性剂、当地可获得的生物质、高比表面积纳米颗粒方面做出更大努力^[29]。

3 垃圾渗滤液培养微藻的生物物质集成

垃圾渗滤液经有效的预处理后可以用于微藻培养,微藻可以利用垃圾渗滤液中的无机盐(如氮、磷)作为营养源,以 CO_2 和废水中的有机碳作为碳源,通过光合作用产生生物能源,实现能源生产、垃圾渗滤液净化的有机统一^[30]。微藻细胞内的活性物质主要有油脂、多糖、蛋白质、色素等天然化合物,可广泛应用于生物柴油、生物制药、生物塑料、保健品等领域^[31]。

3.1 油脂

相较于一般柴油,微藻生物柴油氧、硫含量低,燃烧时排放的一氧化碳和硫化物也相对较少。因此,微藻制备的生物柴油作为一种可生物降解、可再生、无毒、低碳的环境友好型能源成为研究热点^[32]。

H. O. TIGHIRI 等^[8]发现垃圾渗滤液培养的微藻可以积累丰富的脂肪酸,其中 C16~C18 的积累量高达 85.47%~87.69%,这与 A. HERNANDEZ-GARCIA 等^[33]研究发现的微藻更易合成链长在 C16~C18 之间的脂肪酸相一致。G. V. TAGLIAFERRO 等^[34]通过自来水稀释垃圾渗滤液来培养小球藻,发现藻细胞内脂质积累可达到 $(96.6 \pm 7.8) \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 。Haixing CHANG 等^[20]采用经电氧化法预处理的渗滤液对

小球藻进行培养,与未经电氧化预处理的对照组相比,微藻生物量从0.98 g/L提高到1.27 g/L,同时微藻所积累的脂质质量浓度高达491.5 mg/L。

3.2 多糖

大量研究证实,微藻中提取的多糖品种多样,具有抑菌、抗氧化、抗病毒、增强免疫功能且毒副作用低^[35],利用渗滤液培养微藻可用于多糖生产。

A. HERNANDEZ-GARCIA 等^[33]利用不同配比的垃圾渗滤液与市政废水相混合所得的混合液培养微藻,微藻生物量达到了1.3 g/L,微藻在C、N元素营养限制条件下碳水化合物的积累量高达41%,这可能是由于渗滤液中含有的较高浓度的有机碳可以被微藻吸收转化为碳水化合物。此外,营养限制条件也会促进碳流转向碳水化合物的合成,这些结果与I. PANCHA 等^[36-37]研究所得的结论一致。

3.3 蛋白质

微藻可以将小分子物质(如CO₂或NH₃-N)转化为蛋白质等增值大分子^[38],表现出极强的蛋白质生产力^[39]。

R. LAKSHMIDEVI 等^[40]采用双室藻类辅助微生物燃料电池(AAMFC)将微藻培养与渗滤液处理相结合,在渗滤液被稀释为原浓度的50%时,可以获得更高的蛋白质产量[(580.78±0.03) mg/L]。实验同时还探究了盐度对AAMFC的影响,结果表明,当加入30 mmol/L NaCl时,体系最大功率和电流密度都有所增加,积累的蛋白质质量浓度增加到了(618.7±1.26) mg/L。C. VIEGAS 等^[41]采用生物质底

灰对垃圾渗滤液进行化学沉淀预处理,以处理后的渗滤液代替原始培养基进行生物修复与生产,渗滤液培养基与对照培养基中积累的蛋白质的质量浓度分别为0.42、0.52 g/L,这表明利用垃圾渗滤液培养的微藻与采用对照培养基所得微藻对蛋白质的生产能力相当。

3.4 光合色素

光合色素除了在光合作用中发挥着不可替代的作用,其本身也是一种高价值的资源,在生物制药、食品、化妆品及保健品等生产中有着巨大的商业价值和潜力。例如,叶绿素a具有抗氧化性,常被用作营养物质或者食品添加剂^[42],β-胡萝卜素是维生素A的前体,在视觉和免疫系统中发挥着重要的作用^[43]。

S. S. KAMALA 等^[27]利用预处理后的渗滤液培养小球藻,28 d后小球藻中产生的叶绿素和类胡萝卜素质量浓度分别达到4.62 μg/mL和1.99 μg/mL。Xin ZHAO 等^[44]采用城市污水和垃圾渗滤液的混合液进行高密度微藻培养,结果表明,在混合液中垃圾渗滤液质量分数为10%时,体系可以获得最大的叶绿素质量浓度(22 mg/L),比没有添加渗滤液的体系叶绿素产量提高33%。

笔者对微藻将垃圾渗滤液中的有机污染物转化为生物量、脂质、多糖、蛋白质及色素进行积累的相关研究进行了总结归纳,部分成果见表1。由表1可知,利用垃圾渗滤液培养微藻以同时实现微藻良好生长与能源积累具有切实可行性。

表1 微藻将垃圾渗滤液中的有机污染物转化为生物质进行积累的相关研究

Table 1 Study on microalgae transforming organic pollutants in landfill leachate into biomass for accumulation

预处理方式	生物质产量	主要污染物转化效果	文献
淡水稀释	生物量3.11 g/L,脂质(126.59±9.57) mg/L,碳水化合物(190.25±8.18) mg/L	总氮转化率84%以上;苯酚转化率76%以上;COD转化率90%以上	[8]
淡水稀释	生物量(1.67±0.04) g/L	NH ₄ ⁺ -N转化率100%	[12]
电化学氧化	实验组生物量1.27 g/L,脂质491.5 mg/L;对照组生物量489.1 mg/L,脂质248.7 mg/L	NH ₄ ⁺ -N转化率100%;NO ₃ ⁻ -N转化率92%	[20]
混凝沉淀	实验组叶绿素4.62 μg/mL,类胡萝卜素1.99 μg/mL;对照组叶绿素10.2 μg/mL,类胡萝卜素1.85 μg/mL	总有机碳转化率75%以上;浊度降低97%;电导率下降80%;COD转化率97%;总氮转化率69%	[27]
淡水稀释	生物量1.3 g/L	NH ₄ ⁺ -N转化率82%;正磷酸盐转化率43%	[33]
淡水稀释	生物量2.54 g/L,蛋白质(618.7±1.26) mg/L,脂质(1 079.76±2.19) mg/L	COD转化率76.5%;总磷转化率94.3%;总氮转化率90.2%	[40]
混凝沉淀	实验组生物量1.13 g/L,蛋白质0.42 g/L,脂质0.28 g/L;对照组生物量1.416 g/L,蛋白质0.54 g/L,脂质0.35 g/L	COD转化率74.3%;色度去除率98.5%;总氮转化率62.9%;苯酚去除率70.4%	[41]
淡水稀释	生物量1.58 g/L,脂质0.33 g/L	氨氮转化率95%;磷转化率96.1%	[44]

微藻在废水中的生长代谢见图1,微藻可以吸收废水中的C、N、P等营养元素,以及Cu、Zn、Mn等金属元素,在CO₂存在下,经过卡尔文循环产生3-磷酸甘油醛(C₃),3-磷酸甘油醛经过一系列反应可合成淀粉、脂质和蛋白。因此,微藻细胞内碳基化合物的合成共用一个碳前体3-磷酸甘油醛,存在竞争关系^[45]。垃圾渗滤液含有丰富的有机碳源、一定量的盐和金属离子,有利于调控碳流转化,促进微藻中油脂的积累。目前,利用垃圾渗滤液培养微藻用于生物能源生产的研究主要聚焦于藻细胞内脂质、多糖、蛋白质、色素等化合物的合成,其背后的合成机制研究较少,因此,探究微藻在垃圾渗滤液中的碳流转化和油脂合成机制是能源领域的前沿热点,也是未来利用垃圾渗滤液培养微藻用于生物能源生产领域需要努力的方向。

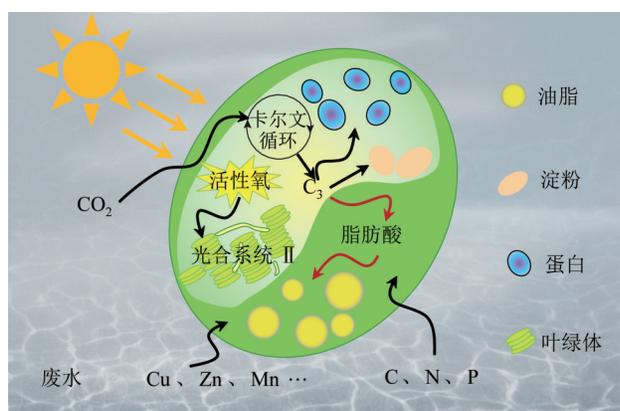


图1 微藻在废水中的生长代谢

Fig. 1 Growth and metabolism of microalgae in wastewater

4 助力碳中和目标的实现

全球气候变暖日渐引起人们的关注,目前全球已有120多个国家和地区提出了碳中和目标,社会发展正快速进入“低碳经济”发展轨道^[46]。从可持续发展的角度来看,生物固定CO₂技术是实现碳减排、推动碳中和的最主要、最有效的方式。在高效固定、转化CO₂的微生物物种中,微藻以其生命力顽强、生长速度快、产物丰富多样等优点成为固碳生物的典型代表。

垃圾渗滤液是不可忽视的CO₂排放体,主要在于:(1)对垃圾渗滤液进行降解处理会产生大量CO₂; (2)渗滤液中含有较高浓度的碳酸盐,其大量进入自然界后将有可能转化为CO₂进入大气,从而加剧温室效应; (3)垃圾渗滤液中含有大量有机碳,

渗滤液中微生物菌群的生长代谢可以将丰富的有机碳转化为CO₂,据报道我国每年垃圾渗滤液处理量达1亿t,因菌群代谢产生的CO₂约为3700万t,位居前10大碳排放行业^[47]。

对于垃圾降解产生的大量CO₂,微藻可通过光合作用将其固定并转化为有机物,其对太阳光的单位面积利用率可以达到普通高等植物的10倍以上。研究表明,微藻细胞内碳的质量分数高达50%以上,每生产1g的微藻大约消耗4.52g的CO₂^[48]。更重要的是,微藻作为高效的太阳能转换器,通过在水中悬浮生长可以更加高效地利用水、CO₂和其他营养物质合成油脂,且所合成的油脂多为中性脂,可用于生物柴油的制备,极大地缓解传统化石燃料的压力^[49]。

除了通过光合作用吸收利用气态CO₂以外,微藻同样可以利用垃圾渗滤液中的碳酸盐、有机盐进行生长和能源积累。渗滤液中无机碳的主要存在形式为重碳酸盐,藻类拥有活跃的碳酸盐清除机制,可以将自身细胞内的碳酸氢盐浓缩,随后,细胞内的碳酸酐酶又会自发脱水或自然脱水产生CO₂,最后通过卡尔文循环将CO₂以生物量的形式捕获^[50]。据统计,每生产1g的微藻可以固定2.42g的HCO₃⁻^[51]。

此外,研究表明,微藻可以将渗滤液中70%~97%的有机碳转化为胞内的糖类、脂质、蛋白质等能源活性物质,避免了垃圾渗滤液中的微生物菌群将有机物代谢转化为CO₂(每去除1g碳可以产生3.7g的CO₂)^[47],有效推动了减污降碳协同增效,可助力实现碳达峰、碳中和。

5 未来技术设想:微藻全链条模式

针对前文所述的几种主要垃圾渗滤液预处理方式及所存在的问题,笔者所在团队提出了一种新型的预处理方式,大胆设想仅利用微藻培养实现废水预处理。虽然直接利用垃圾渗滤液培养微藻并不理想,但随着第1批直接培养的微藻的收获,垃圾渗滤液生化废水的浊度、氨氮、重金属含量都将大大降低,即第1批微藻培养仅用于实现预处理;然后接种第2批新鲜的微藻到收获后的垃圾渗滤液中,微藻将会迎来生长的鼎盛时期;收获后紧接着接种第3批、第4批,实现循环利用垃圾渗滤液培养微藻,建立“微藻全链条”新模式,实现微藻预处理—微藻培养—微藻能源积累的全链条响应机制,其示意图图2。

对目前主要的几种预处理方式及微藻全链条模式进行成本估算,结果见表2。

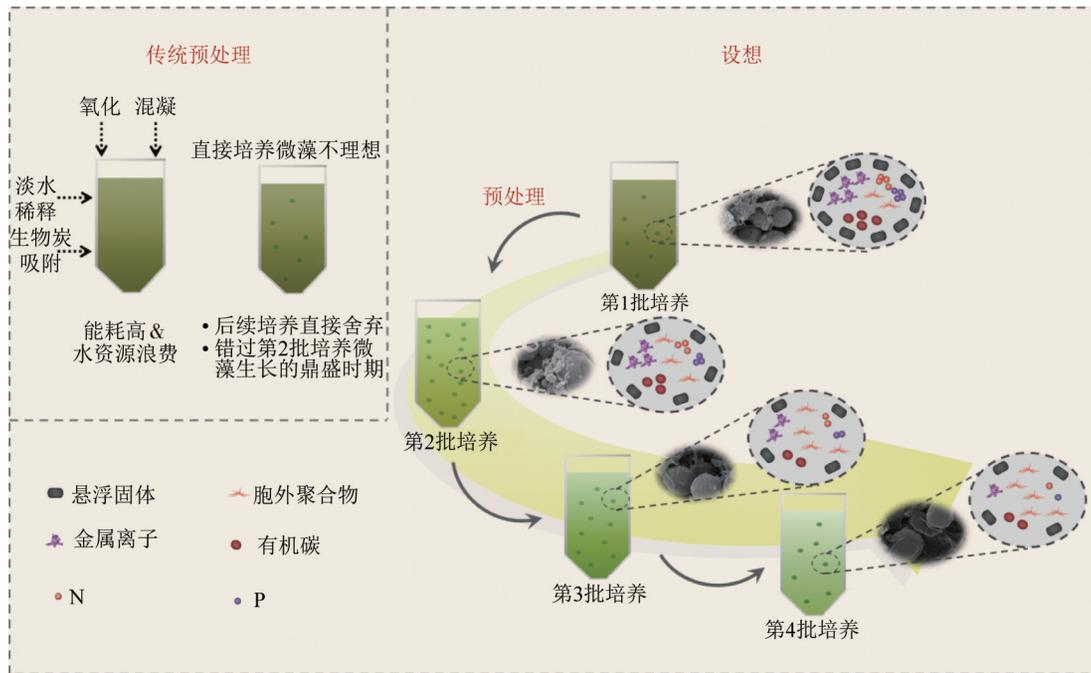


图2 “微藻全链条”模式示意

Fig. 2 Schematic diagram of “microalgae whole chain” mode

表2 预处理方式成本估算

Table 2 Cost estimation of the pretreatment methods

预处理方式	体系	材料/药剂	微藻生产成本/(元·kg ⁻¹)	文献
淡水稀释	淡水系统	淡水+磷(P)	6.2	[12]
电化学氧化	Pt/Ti电解系统	Pt电极、Ti电极	300	[52]
臭氧氧化	臭氧系统	臭氧	3 125.6	[53]
混凝沉淀	石灰介导沉淀	石灰	38	[54]
微藻全链条	外加磷	磷	4.0	[45]

由表2可知,高级氧化法成本普遍偏高,其中臭氧氧化方式仅电能消耗就是一笔不小的开销;淡水稀释的方法虽然成本不是很高,但会造成大量淡水资源浪费;混凝沉淀的方式想要达到理想的污染物去除效果通常也需要较高的成本;而由于垃圾渗滤液中磷含量相对较低,“微藻全链条”新模式下微藻的培养需外加磷,其成本仅为磷药剂的成本,经计算每生产1 kg微藻生物质仅需要消耗4.0元。因此,采用“微藻全链条”实现微藻预处理—微藻培养—微藻能源积累的新模式,一方面可以降低微藻培养成本,另一方面还能大大节约淡水资源,是一种最具潜力的技术手段。

6 结论与展望

(1)微藻培养前需对垃圾渗滤液进行预处理,现有垃圾渗滤液预处理技术,如淡水稀释、电化学氧

化、臭氧氧化、混凝吸附等,存在着成本高、对渗滤液处理效果不理想等问题。对此,笔者所在团队提出建立“微藻全链条”新模式的设想,可大大降低废水预处理成本,切实推动国家碳减排事业的发展。

(2)利用垃圾渗滤液培养微藻用于生物能源生产的研究主要聚焦于藻细胞内脂质、多糖、蛋白质、色素等化合物的合成上,其背后的合成机制研究很少涉及。如能探明微藻在垃圾渗滤液的复杂生境下的代谢调控机制,将对实现能源产出最大化提供重要的理论指导。

(3)在全国大力推动新旧动能转换和碳中和的大背景下,充分利用垃圾渗滤液废水资源化来生产绿色、环保、可再生的微藻生物质,用微藻生物柴油逐渐代替传统化石燃料,可切实推动传统工业向环境友好和可持续发展的新局面转化,为我国的生物能源和CO₂减排事业拓宽道路,推动碳中和国家建设。

参考文献

- [1] DOGARIS I, AMMAR E, PHILIPPIDIS G P. Prospects of integrating algae technologies into landfill leachate treatment [J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2020, 36(3): 39.
- [2] INSEL G, DAGDAR M, DOGRUEL S, et al. Biodegradation characteristics and size fractionation of landfill leachate for integrated membrane treatment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 260: 825-832.

- [3] KURNIAWAN T A, LO W H. Removal of refractory compounds from stabilized landfill leachate using an integrated H_2O_2 oxidation and granular activated carbon (GAC) adsorption treatment[J]. *Water Research*, 2009, 43(16):4079-4091.
- [4] ZHOU Xin, ZENG Yue, TANG Yongyan, et al. Artificial regulation of state transition for augmenting plant photosynthesis using synthetic light-harvesting polymer materials [J]. *Science Advances*, 2020, 6(35):eabc5237.
- [5] LI Dawei, BALAMURUGAN S, YANG Yufeng, et al. Transcriptional regulation of microalgae for concurrent lipid overproduction and secretion[J]. *Science Advances*, 2019, 5(1):eaau3795.
- [6] SUTHERLAND D L, RALPH P J. Microalgal bioremediation of emerging contaminants: Opportunities and challenges [J]. *Water Research*, 2019, 164: 114921.
- [7] 李攀荣, 邹长伟, 万金保, 等. 微藻在废水处理中的应用研究[J]. *工业水处理*, 2016, 36(5):5-9.
LI Panrong, ZOU Changwei, WAN Jinbao, et al. Research of microalgae processing wastewater[J]. *Industrial Water Treatment*, 2016, 36(5):5-9.
- [8] TIGHIRI H O, ERKURT E A. Biotreatment of landfill leachate by microalgae-bacteria consortium in sequencing batch mode and product utilization[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 286:121396.
- [9] GHOSH P, THAKUR I S, KAUSHIK A. Bioassays for toxicological risk assessment of landfill leachate: A review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 141:259-270.
- [10] STRÖM E. Leachate treatment and anaerobic digestion using aquatic plants and algae[D]. Linköping: Linköping University, 2010.
- [11] ZHAO Xianda, MUSLEH R, MAHER S, et al. Start-up performance of a full-scale bioreactor landfill cell under cold-climate conditions[J]. *Waste Management*, 2008, 28(12):2623-2634.
- [12] KHANZADA Z T, ÖVEZ S. Microalgae as a sustainable biological system for improving leachate quality [J]. *Energy*, 2017, 140:757-765.
- [13] ZHANG Chao, ZHOU Minghua, YU Xinmin, et al. Modified iron-carbon as heterogeneous electro-Fenton catalyst for organic pollutant degradation in near neutral pH condition: Characterization, degradation activity and stability[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 160:254-262.
- [14] 黄艳娥, 琚行松, 刘会媛. 电化学催化降解水中有机污染物技术[J]. *化工生产与技术*, 2002, 9(2):14-17.
HUANG Yane, JU Xingsong, LIU Huiyuan. Technologies of electrochemically and catalytically degradation of organic pollutants in water[J]. *Chemical Production and Technology*, 2002, 9(2):14-17.
- [15] ZHOU Zhiyong, ZHANG Xiaying, LIU Ying, et al. Treatment of azo dye (Acid Orange II) wastewater by pulsed high-voltage hybrid gas-liquid discharge[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(88):71973-71979.
- [16] ZHANG Weixuan, LI Xiaoming, YANG Qi, et al. Pretreatment of landfill leachate in near-neutral pH condition by persulfate activated Fe-C micro-electrolysis system [J]. *Chemosphere*, 2019, 216:749-756.
- [17] CHANG Haixing, FU Qian, ZHONG Nianbing, et al. Microalgal lipids production and nutrients recovery from landfill leachate using membrane photobioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 277:18-26.
- [18] CHEAH W Y, LING T C, SHOW P L, et al. Cultivation in wastewaters for energy: A microalgae platform [J]. *Applied Energy*, 2016, 179:609-625.
- [19] QUAN Xuejun, HU Rui, CHANG Haixing, et al. Enhancing microalgae growth and landfill leachate treatment through ozonation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 248:119182.
- [20] CHANG Haixing, HU Rui, ZOU Yajun, et al. Highly efficient reverse osmosis concentrate remediation by microalgae for biolipid production assisted with electrooxidation [J]. *Water Research*, 2020, 174:115642.
- [21] HOU Meifang, CHU Yaofei, LI Xiang, et al. Electro-peroxone degradation of diethyl phthalate: Cathode selection, operational parameters, and degradation mechanisms [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 319:61-68.
- [22] DERCO J, GOTVAJN A, ZAGORC-KONČAN J, et al. Pretreatment of landfill leachate by chemical oxidation processes [J]. *Chemical Papers*, 2010, 64(2):237-245.
- [23] CHEN Weiming, ZHANG Aiping, JIANG Guobin, et al. Transformation and degradation mechanism of landfill leachates in a combined process of SAARB and ozonation[J]. *Waste Management*, 2019, 85:283-294.
- [24] POBLETE R, PÉREZ N. Use of sawdust as pretreatment of photo-Fenton process in the depuration of landfill leachate[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 253:109697.
- [25] KLEIN K, KIVI A, DULOVA N, et al. A pilot study of three-stage biological-chemical treatment of landfill leachate applying continuous ferric sludge reuse in Fenton-like process[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2017, 19(2):541-551.
- [26] LI Wei, HUA Tao, ZHOU Qixing, et al. Treatment of stabilized landfill leachate by the combined process of coagulation/flocculation and powder activated carbon adsorption [J]. *Desalination*, 2010, 264(1/2):56-62.
- [27] KAMALA S S, TEY L H, SIM Y L. Combined chemical, physical and biological treatment using *Chlorella vulgaris* sp. on landfill leachate[C]// 2nd International Conference on Chemistry: Chemical Process and Engineering (IC3PE). Indonesia Yogyakarta, 2018, 2026:020006-1.
- [28] DA MOTTA SOBRINHO M A, PAULINO P M, DE OLIVEIRA D E B. Pós-tratamento de lixiviados coagulados por adsorção em resíduos da ostreicultura[J]. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 2019, 24(5):897-907.
- [29] AHMED M B, ZHOU J L, NGO H H, et al. Adsorptive removal of antibiotics from water and wastewater: Progress and challenges[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 532:112-126.
- [30] AWFA D, ATEIA M, FUJII M, et al. Photodegradation of pharmaceuticals and personal care products in water treatment using carbonaceous-TiO₂ composites: A critical review of recent literature[J]. *Water Research*, 2018, 142:26-45.

- [31] GULDHE A, ANSARI F A, SINGH P, et al. Heterotrophic cultivation of microalgae using aquaculture wastewater: A biorefinery concept for biomass production and nutrient remediation[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 99: 47-53.
- [32] 聂煜东, 耿媛媛, 张贤明, 等. 产油微藻胁迫培养策略研究综述[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(8): 3853-3866.
NIE Yudong, GENG Yuanyuan, ZHANG Xianming, et al. A review on stress cultivation strategies of oleaginous microalgae[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(8): 3853-3866.
- [33] HERNÁNDEZ-GARCÍA A, VELÁSQUEZ-ORTA S B, NOVELO E, et al. Wastewater-leachate treatment by microalgae: Biomass, carbohydrate and lipid production[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 174: 435-444.
- [34] TAGLIAFERRO G V, FILHO H J I, CHANDEL A K, et al. Continuous cultivation of *Chlorella minutissima* 26a in landfill leachate-based medium using concentric tube airlift photobioreactor[J]. *Algal Research*, 2019, 41: 101549.
- [35] 李洁琼, 刘红全, 袁莎. 微藻多糖的研究进展[J]. *现代化工*, 2016, 36(6): 60-62.
LI Jieqiong, LIU Hongquan, YUAN Sha. Research progress of microalgae polysaccharide[J]. *Modern Chemical Industry*, 2016, 36(6): 60-62.
- [36] PANCHAI I, CHOKSHI K, GEORGE B, et al. Nitrogen stress triggered biochemical and morphological changes in the microalgae *Scenedesmus* sp. CCNM 1077[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 156: 146-154.
- [37] SAMORÌ G, SAMORÌ C, GUERRINI F, et al. Growth and nitrogen removal capacity of *Desmodesmus communis* and of a natural microalgae consortium in a batch culture system in view of urban wastewater treatment: Part I[J]. *Water Research*, 2013, 47(2): 791-801.
- [38] AMORIM M L, SOARES J, COIMBRA J S D R, et al. Microalgae proteins: Production, separation, isolation, quantification, and application in food and feed[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(12): 1976-2002.
- [39] CHEN Jiabin, LI Ji, DONG Wenyi, et al. The potential of microalgae in biodiesel production[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 90: 336-346.
- [40] LAKSHMIDEVI R, GANDHI N N, MUTHUKUMAR K. Carbon neutral electricity production from municipal solid waste landfill leachate using algal-assisted microbial fuel cell[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2020, 191(2): 852-866.
- [41] VIEGAS C, NOBRE C, MOTA A, et al. A circular approach for landfill leachate treatment: Chemical precipitation with biomass ash followed by bioremediation through microalgae[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(3): 105187.
- [42] CHO M, LEE H S, KANG I J, et al. Antioxidant properties of extract and fractions from *Enteromorpha prolifera*, a type of green seaweed[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(3): 999-1006.
- [43] KUMAR D, DHAR D W, PABBI S, et al. Extraction and purification of C-phycoerythrin from *Spirulina platensis* (CCC540)[J]. *Indian Journal of Plant Physiology*, 2014, 19(2): 184-188.
- [44] ZHAO Xin, ZHOU Yan, HUANG Sheng, et al. Characterization of microalgae-bacteria consortium cultured in landfill leachate for carbon fixation and lipid production[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 156: 322-328.
- [45] ZHANG Lijie, CHENG Juan, PEI Haiyan, et al. Cultivation of microalgae using anaerobically digested effluent from kitchen waste as a nutrient source for biodiesel production[J]. *Renewable Energy*, 2018, 115: 276-287.
- [46] 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.
- [47] NGUYEN T K L, NGO H H, GUO Wenshan, et al. Assessing the environmental impacts and greenhouse gas emissions from the common municipal wastewater treatment systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 801: 149676.
- [48] CHISTI Y. Biodiesel from microalgae[J]. *Biotechnology Advances*, 2007, 25(3): 294-306.
- [49] 刘建国, 龙元蕾, 黄园, 等. 微藻生物柴油研究现状与发展策略[J]. *海洋科学*, 2013, 37(10): 132-141.
LIU Jianguo, LONG Yuanru, HUANG Yuan, et al. The research status, problems and developmental strategies in culture microalgae for biodiesel[J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(10): 132-141.
- [50] SAYRE R. Microalgae: The potential for carbon capture[J]. *BioScience*, 2010, 60(9): 722-727.
- [51] HERZOG H, GOLOMB D. Carbon capture and storage from fossil fuel use[J]. *Encyclopedia of Energy*, 2004, 51(4): 277-287.
- [52] WANG Mengzi, ZHU Zhiwei, CAO Wei, et al. Effect of synthetic wastewater by electrochemical pretreatment on *Chlorella vulgaris* growth and nutrients removal[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 666: 33-42.
- [53] CHENG Jun, YE Qing, XU Jiao, et al. Improving pollutants removal by microalgae *Chlorella* PY-ZU1 with 15% CO₂ from undiluted anaerobic digestion effluent of food wastes with ozonation pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 216: 273-279.
- [54] PHASEY J, VANDAMME D, FALLOWFIELD H J. Harvesting of algae in municipal wastewater treatment by calcium phosphate precipitation mediated by photosynthesis, sodium hydroxide and lime[J]. *Algal Research*, 2017, 27: 115-120.

[作者简介] 陈俊任(1998—), 硕士研究生。E-mail: 1454112928@qq.com。通讯作者: 张立杰, 博士, 副研究员, 硕士生导师。E-mail: Zhanglj1104@163.com。

[收稿日期] 2022-06-12(修改稿)