

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.13.015

不同比例葡萄糖和蛋白质对微生物电解池产氢影响

鄢胜韩^{1,2}, 黄恒旭¹, 卓桂华³, 曾艺芳⁴, 江娟⁵, 刘常青⁶,
甄广印⁷, 郑育毅^{1,2}

(1. 福建师范大学环境与资源学院、碳中和现代产业学院 福建省污染控制与资源循环利用重点实验室, 福建 福州 350007; 2. 城市废物资源化技术与工程福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350007; 3. 福建省环境科学研究院, 福建 福州 350013; 4. 福建省闽环试验检测有限公司, 福建 福州 350012; 5. 福建省厦门环境监测中心站, 福建 厦门 361022; 6. 福建师范大学 地理科学学院、碳中和未来技术学院, 福建 福州 350007; 7. 华东师范大学 生态与环境科学学院, 上海 200241)

摘 要: 微生物电解池(MEC)能有效降解污泥有机质并获取清洁能源,其产氢效能受底物性质的影响显著。通过以葡萄糖与牛血清白蛋白(BSA)为碳水化合物与蛋白质的模拟底物开展MEC批式循环试验,探究不同比例(1:0、5:1、1:1、1:5、0:1,以COD计)的葡萄糖和BSA基质在MEC中的产氢性能。结果表明:葡萄糖较BSA更易被产电菌利用,产氢性能更优,在葡萄糖和BSA比例为1:0的试验组中产氢量最高可达(28.96±3.45) mL;随着BSA的增加,氢气产率明显降低,葡萄糖的去除率也有所降低,从(98.65±0.70)%下降至(92.24±1.84)%。在以BSA为主的试验组(葡萄糖和BSA比例为1:5、0:1)中发现所产氢气更快速地转化为CH₄,同时葡萄糖影响了BSA的降解效率,其降解率为(38.49±4.31)%~(44.96±5.13)%;葡萄糖也影响了BSA的转化途径,具体表现为蛋白质降解副产物NH₄⁺-N的产量降低。

关键词: 微生物电解池(MEC); 产氢; 葡萄糖; 蛋白质

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)13-0095-08

Effect of Different Mixing Ratio of Glucose and Protein in Substrate on Hydrogen Production in Microbial Electrolytic Cell

YAN Sheng-han^{1,2}, HUANG Heng-xu¹, ZHUO Gui-hua³, ZENG Yi-fang⁴,
JIANG Juan⁵, LIU Chang-qing⁶, ZHEN Guang-yin⁷, ZHENG Yu-yi^{1,2}

(1. Fujian Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental and Resource Sciences and College of Carbon Neutral Modern Industry, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Fujian College and University Engineering Research Center for Municipal <Solid> Waste Resourcization and Management, Fuzhou 350007, China; 3. Fujian Academy of Environmental Sciences, Fuzhou 350013, China; 4. Fujian Minhuan Test and Detection Co. Ltd., Fuzhou 350012, China; 5. Xiamen City Environmental Monitoring Center Station, Xiamen 361022, China; 6. School of Geographical Sciences and School of Carbon

基金项目: 福建省科技厅对外合作项目(2021H0010); 福建省科技厅高校产学研合作项目(2020N5015)

通信作者: 郑育毅 E-mail: yuyi_1974@sina.com

Neutrality Future Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 7. School of Ecological and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Hydrogen production from microbial electrolysis cell (MEC) can effectively degrade sludge organic matters to obtain clean energy, and its hydrogen production efficiency is significantly affected by substrate properties. A batch cycle experiment was carried out to investigate the effect of mixing ratio (1:0, 5:1, 1:1, 1:5 and 0:1, calculated by COD) of glucose to bovine serum albumin (BSA) on hydrogen production in MEC. The simulated substrate consisted of glucose (carbohydrate) and BSA (protein). Glucose in MEC was more easily utilized than BSA, and had better hydrogen production performance. In the experimental group with glucose to BSA ratio of 1:0, the hydrogen production reached (28.96 ± 3.45) mL. With the increase of BSA, the hydrogen yield decreased significantly, and the glucose removal rate decreased from $(98.65 \pm 0.70)\%$ to $(92.24 \pm 1.84)\%$. In the experimental groups dominated by BSA (the ratios of glucose to BSA were 1:5 and 0:1), hydrogen was more rapidly converted to CH_4 . In addition, glucose affected the degradation efficiency of BSA, and the degradation rate ranged from $(38.49 \pm 4.31)\%$ to $(44.96 \pm 5.13)\%$. Glucose also affected the conversion pathway of BSA, which could be proved by the decreasing production of ammonia nitrogen (a by-product of protein degradation).

Key words: microbial electrolytic cell (MEC); hydrogen production; glucose; protein

H_2 的热值高且燃烧产物单一,是公认最理想的清洁能源。然而目前 H_2 主要通过化石燃料的热化学过程制备,能量输入高且会加剧温室效应。微生物电解池(MEC)作为一种新兴的制 H_2 手段,其仅需较低的能量输入(启动电压为0.3~0.8 V),同时可以降解有机废物,因此受到了广泛关注^[1]。

MEC已被证实可以利用餐厨垃圾、垃圾渗滤液、剩余污泥等多种底物产 H_2 。我国污水处理厂剩余污泥年产量达 $1.12 \times 10^4 \text{ t}$ ^[2],其出路一直以来都备受关注。剩余污泥中富含N、P等营养物质及可降解有机物,以其为底物产 H_2 ,既能减少对生态环境的污染,又可以实现资源化利用。关于剩余污泥进行MEC产 H_2 已有一定的研究^[3-6],但由于体系的能量回收效率总体仍然较低,限制了该领域的研究与发展。

底物是MEC能量的来源,其特性对MEC的产 H_2 过程有很大影响。蛋白质和碳水化合物是剩余污泥的主要有机质,两者占比为40%~70%,若被有效利用就能更好地提升环境效益。Yu等^[7]在以剩余污泥为底物的产 H_2 研究中,推测多糖类和蛋白质在MEC中的降解机制并不相同。为了进一步提高MEC的产 H_2 性能,底物污泥中各组分如何被利用成为关键。以暗发酵中间产物——挥发性脂肪酸(VFAs)作为底物已进行了大量研究^[8-10],而NaAc作

为常见的暗发酵产物,在MEC中应用最为广泛^[11]。但关于蛋白质和碳水化合物等纯物质的MEC产 H_2 较少见文献报道。在蛋白质方面,Lu等^[12]证实了蛋白质可以作为MEC产 H_2 的基质,其降解后N主要以 NH_4^+-N 的形式存在;Zhao等^[13]采用蛋白质作为MEC的底物时认为,与传统厌氧发酵相比,蛋白质的水解并没有得到促进。在以碳水化合物为基质的研究中,以纤维素和葡萄糖最多。Wang等^[14]以纤维素为基质,比较单独厌氧发酵以及厌氧发酵、微生物燃料电池(MFC)和MEC三者联用的产 H_2 性能,发现后者提高了41%的产氢量。Zhang等^[15]以葡萄糖为底物,发现其能被完全降解,主要中间产物为乙酸和乙醇。关于碳水化合物和蛋白质混合后进行MEC产 H_2 的研究很少,鲜见有相关文献报道,两者在MEC中是否存在相互作用、如何相互作用需要探讨。

剩余污泥发酵液中可溶蛋白和碳水化合物的浓度会随处理方法不同而变化,总体表现为可溶蛋白的浓度高于可溶碳水化合物,两者比值在1~8^[16]之间。为了探究碳水化合物和蛋白质在MEC产 H_2 体系中的作用,以葡萄糖和牛血清白蛋白(BSA)为相应代表,探究其不同混对比对 H_2 产量的影响,分析底物的降解过程,旨在为以剩余污泥为基质的MEC产 H_2 体系提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 接种物和底物

接种物取自福州市某污水处理厂的回流污泥,过60目筛置于4℃冰箱中静置24 h后去上清液待用,污泥SCOD含量为103.8 mg/L,TS质量分数为3.19%,可溶碳水化合物、可溶蛋白浓度(以COD计)分别为11.82、35.55 mg/L。底物为5种配比(1:0.5:1、1:1:1、1:5和0:1,以COD计)的葡萄糖和BSA混合溶液,均稀释至1 000 mg/L。

1.2 MEC的启动和运行

构建的单室MEC见图1。容器采用100 mL的玻璃血清瓶,其有效工作容积为80 mL。阳极材料采用3 cm×3 cm的导电碳纤维刷,使用前进行预处理以去除表面杂质并增加比表面积,碳刷预处理步骤:先以1 mol/L的NaOH浸泡24 h,再以1 mol/L的HCl浸泡24 h,之后用去离子水浸泡12 h,最后置于马福炉在450℃下烘烤30 min;阴极材料采用面积为8 cm²的W1S1005碳布,以20%的Pt/C催化剂涂布于微孔层,涂布量为0.5 mg/cm²;两个电极通过外部电路连接,串联一个10 Ω的电阻。构建完毕的MEC按接种比为1:1加入1 g/L的乙酸钠(NaAc)底物和80 mL回流污泥,通入氮气2 min以保证厌氧状态,而后施加0.8 V电压于(35±1)℃的恒温培养箱中运行。当底物消耗完毕时,开盖更换底物并重新通入氮气,以此为一个周期。当电流密度连续几个周期表现为上升到峰值后持续一段时间再下降的稳定状态时,意味着MEC启动成功。

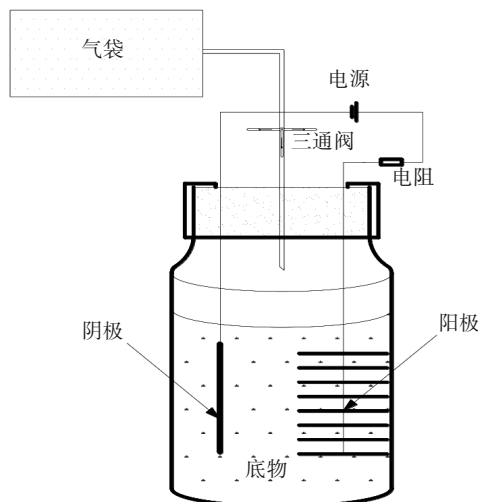


图1 MEC试验装置

Fig.1 MEC experimental set-up

MEC启动成功后,将底物更换为上述混配比的葡萄糖与BSA混合物进行试验,周期为48 h。每个周期结束测试底物的变化,为保证数据的可靠性,做3组平行试验。

1.3 气体及其他指标测试方法

电压通过数据采集器自动监测;气体由气袋收集,其成分和浓度采用气相色谱测定,手动进样;污泥TS采用烘干法测定,VS采用重量法测定,pH采用pH计测定。测定SCOD、可溶碳水化合物、可溶蛋白和NH₄⁺-N等溶解性指标时,将样品以8 000 r/min离心10 min后的上清液经0.45 μm滤膜过滤,SCOD采用COD快速测定仪检测,NH₄⁺-N采用纳氏试剂分光光度法测定,可溶碳水化合物采用苯酚-硫酸法测定,可溶蛋白采用Folin-酚试剂法测定。

1.4 MEC性能评价指标

通过电流密度、产氢速率和能量效率评估MEC性能,其中电流密度采用单位阴极面积的电流变化表征;产氢速率为单位时间内MEC反应器单位体积的产氢量;能量效率为回收H₂获得的能量占由外加电压带来总输入电能的百分比。

2 结果与分析

2.1 启动阶段结果分析

图2(a)为电流密度变化。可知,本试验历时8个周期,完成以NaAc为底物的MEC快速启动。第1周期电流密度小且不稳定,峰值仅为0.23 A/m²,这是由于起始时反应器内部接种的微生物群落还处于原始状态,且阳极碳刷上的生物膜尚未稳定附着。经过一个周期的驯化,阳极上完成了微生物富集,所以从第2~8周期电流密度大幅度提升至峰值1.00 A/m²左右,在保持一定时间后再下降,表现很稳定。

图2(b)是MEC启动阶段产H₂情况。第1周期的气体体积为27.25 mL,H₂体积为6.67 mL。第2周期H₂产量有较大幅度提升(22.03 mL),这是由于电极上富集了外电菌等相关产H₂功能菌。但第3周期H₂突然下降至1.24 mL,这是由于MEC阴极上可能存在产甲烷菌,在电解产H₂的同时产CH₄过程也在进行,这在单室无膜电解池中尤为明显。一方面,CO₂可以直接接收电子,并与质子结合生成CH₄,该过程消耗产H₂的原料进而抑制产H₂过程;另一方面,由于氢营养型产甲烷菌的存在,会将已生成的

H_2 用于产 CH_4 ,其中生成1 mol CH_4 需消耗4 mol的 H_2 ^[17],因此这一途径对 H_2 产量的影响不容忽视。为减少氢营养型产甲烷菌在运行后期对 H_2 的消耗,将一个周期内气体体积采集频率由原先的1次调整为3次,即前24 h每间隔12 h采集一次,后24 h采集一次,如此可将产生的 H_2 及时分离。COD的降解情况与电流密度较为一致,第1周期的降解率较低,仅为65.22%,而第4~8周期的降解率稳定在82%以上。这些现象均意味着MEC成功启动。

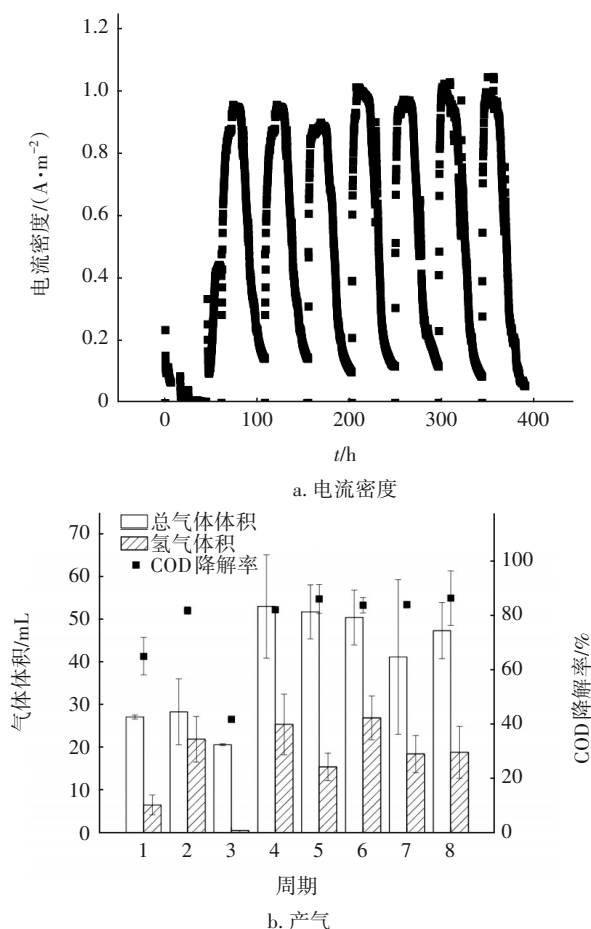


图2 MEC启动阶段电流密度和产气情况

Fig.2 Current density and gas production during MEC start-up phase

2.2 运行阶段结果分析

2.2.1 电流密度

图3是以不同混配比葡萄糖和BSA为底物的MEC电流密度随时间的变化。第1周期,含有葡萄糖的4个试验组电流密度与启动阶段差异不大,但从第2周期开始下降,以BSA为底物(混配比为0:1)的试验组电流密度仅为启动阶段的一半。自第4周期开始,各试验组的电流密度都趋于稳定,其大小

总体表现为1:0>5:1>1:1>1:5>0:1,即电流密度随着葡萄糖浓度的增加而增大,最高可达1.22 A/m^2 ,表现为电流密度与底物中葡萄糖浓度呈极显著正相关($R=0.99, P<0.01$),而与蛋白质浓度呈负相关($R=-0.88, P>0.05$)。与其他试验组不同的是,混配比为0:1试验组的电流密度自第4周期起便稳定在峰值直至更换底物,这可能是由于BSA的分子结构较复杂,降解所需时间较长,因此电流密度在观察周期(24 h)内未出现下降。与NaAc、葡萄糖单组分为底物的电流密度随时间变化的平滑曲线不同,以葡萄糖和BSA混合物为底物的电流密度随时间变化曲线会出现多个峰值,而且各个峰值之间存在明显差异,猜测是由于葡萄糖和BSA在MEC中存在梯级利用现象,且葡萄糖优先于BSA。

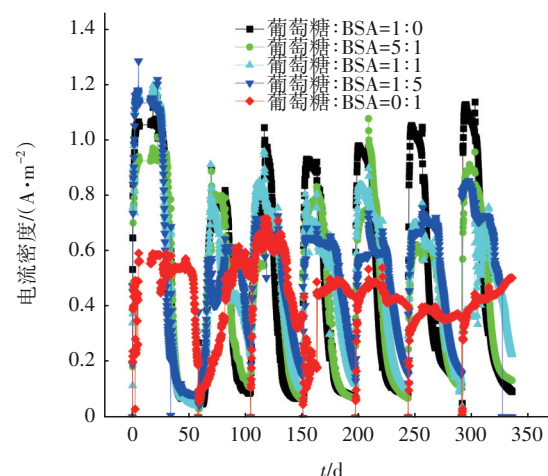


图3 不同混配比底物的MEC中电流密度的变化

Fig.3 Change in current density of MEC with different mixing ratios of substrates

2.2.2 产氢速率及能量效率

图4是以不同混配比葡萄糖和BSA为底物的MEC产气情况。可知,含有葡萄糖底物的各试验组在第1、2周期的产 H_2 量(11.14~27.01 mL)都大于产 CH_4 量(0~15.55 mL),其中以单一葡萄糖为底物(混配比为1:0)的试验组在后续各周期的产 H_2 量(11.13~28.96 mL)依然大于产 CH_4 量(6.56~27.96 mL);而以不同比例葡萄糖与BSA混合物为底物(混配比为5:1、1:1与1:5)的试验组从第4周期开始,其产 CH_4 量(8.15~24.94 mL)大于产 H_2 量(0~12.56 mL);以单一BSA为底物(混配比为0:1)的试验组则一开始就以产 CH_4 为主,除了在第2、5、7周期检测到少量 H_2 外,其他时间均未有 H_2 生成。同时发现,

以单一葡萄糖为底物(混配比为1:0)的试验组产 H_2 量明显高于其他4个试验组,即整体表现为随着底物中蛋白质浓度的增加,产 H_2 总量减少。

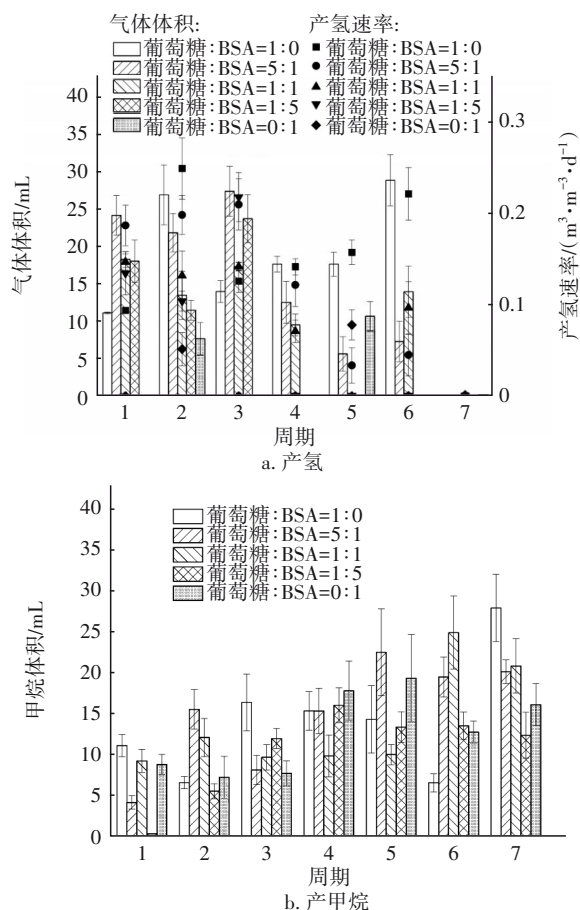


图4 不同混配比底物的MEC产气情况

Fig.4 Gas production of MEC with different mixing ratios of substrates

由此可知,葡萄糖更利于产 H_2 ,而蛋白质则利于产 CH_4 ,这可能是由于葡萄糖和蛋白质在MEC系统中的降解机制不一致。MEC中水解细菌、发酵细菌和产电菌通常是共存的,大多数产电菌无法直接利用碳水化合物,而是利用其水解或发酵的产物,但仍有少数(如还原铁红矾菌、肺炎克雷伯菌、嗜水气单胞菌等)^[18]可直接利用碳水化合物。MEC中蛋白质的降解过程往往伴随着水解、酸化、乙酰化,而后通过乙酸型产甲烷菌产 CH_4 。Lu等^[12]研究发现,当蛋白质浓度在700 mg/L以下时,MEC只产 H_2 而不产 CH_4 ;然而当浓度提升至1 000 mg/L时,则只产 CH_4 而不产 H_2 。造成这种波动现象的原因一方面是葡萄糖和BSA的分子结构不同,BSA结构复杂且其降解产物存在不确定性,从而引起产电产 H_2 的不同

步;另一方面可能是由于将产甲烷菌暴露于空气以抑制活性,导致其利用 H_2 的情况不稳定,因而产 H_2 量也呈现出不稳定性。

不同混配比底物的MEC平均能量效率为1:0>5:1>1:1>1:5>0:1,相应的能量效率分别为(66.79±26.94)%、(47.05±21.45)%、(42.89±8.95)%、(27.18±11.23)%和(9.29±5.21)%。即能量效率随着混合溶液中葡萄糖浓度的减少而降低,这与电流密度的情况一致,也说明了葡萄糖可能更有利于产 H_2 。

2.3 底物降解效果分析

2.3.1 可溶蛋白与 NH_4^+-N

图5(a)为MEC中可溶蛋白的降解情况,对单一葡萄糖底物(混配比为1:0)的试验组不进行探讨。在不同周期,不同混配比的可溶蛋白利用情况存在波动,4组可溶蛋白降解率基本稳定在(82.59±3.76)%、(86.85±8.96)%、(38.49±4.31)%、(44.96±5.13)%。这与先前Lu等^[12]的蛋白质去除率可达87%~97%的结果有所不同,究其原因,可能是由于水力停留时间(HRT)不同:Lu等^[12]以电流数值降至0.5 mA为标志(即底物中的可降解物质几乎被完全利用),而本试验的HRT仅为48 h。但是同样在HRT为48 h的条件下,Zhao等^[13]探究不同浓度蛋白质(0.5、4、20 g/L)对MEC产 CH_4 的影响,前两者分别降解了76%、20%,而浓度为20 g/L的蛋白质几乎没有得到降解,这说明除了HRT,蛋白质浓度对其降解率的影响也很明显。本研究中各体系蛋白质的初始浓度(以COD计)分别为167、500、833、1 000 mg/L,降解率的整体趋势也是随着浓度的增加而下降。

图5(b)为MEC中蛋白质降解副产物 NH_4^+-N 的产生情况。可知, NH_4^+-N 随着蛋白质混配比例的增加而提高,与蛋白质降解量呈正相关,但未呈线性关系。 NH_4^+-N 产生量分别占蛋白质降解量的19.7%、15.8%、29.5%、28.1%,说明当葡萄糖浓度较高时,体系中蛋白质的 NH_4^+-N 转化率较低,由此可以推测葡萄糖改变了蛋白质的降解途径,从而影响体系对蛋白质的利用效率。Nam等^[19]采用MEC处理纤维素发酵废水,当HRT为24 h时,蛋白质降解率仅为29%,说明了以碳水化合物为主的体系会影响蛋白质利用。另有研究发现,在 NH_4^+-N 的影响下, CH_4 的产量会被抑制^[20]。但研究也表明,当

NH_4^+-N 仅为 0.2 g/L 时,以葡萄糖为底物的 MEC 产 CH_4 受抑制并不明显,只有当 NH_4^+-N 达到 2 g/L 以上时, CH_4 的产生才被明显抑制^[21]。根据图 7(b)可知,试验中 NH_4^+-N 的最高浓度也仅为 $(205.77 \pm 29.31) \text{ mg/L}$,故各试验组仍有较高的产 CH_4 量。

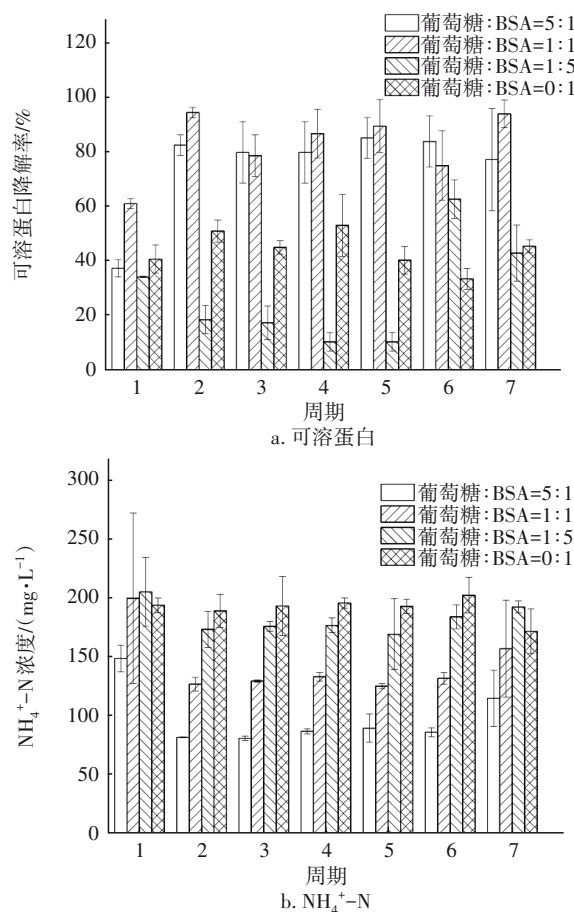


图5 不同混配比底物的MEC中可溶蛋白和 NH_4^+-N 的变化
Fig.5 Change in soluble protein and NH_4^+-N of MEC with different mixing ratios of substrates

2.3.2 可溶碳水化合物和COD

图 6(a)为 MEC 中可溶碳水化合物的降解情况,对单一 BSA 底物(混配比为 0:1)的试验组不进行探讨。可知,其他 4 组不同混配比的可溶碳水化合物均得到了充分利用,降解率均在 90% 以上,其中单一葡萄糖底物(混配比为 1:0)的试验组在第 1 周期的降解率更是高达 99.05%。试验中各周期的葡萄糖降解效果稳定,基本表现为随着底物中含糖量的降低,可溶碳水化合物的降解效果也减弱。各体系葡萄糖初始浓度(以 COD 计)分别为 $1\ 000$ 、 833 、 500 和 167 mg/L ,相应降解率分别为 $(98.65 \pm 0.70)\%$ 、 $(96.66 \pm 1.32)\%$ 、 $(95.43 \pm 2.66)\%$ 和 $(92.24 \pm$

$1.84)\%$ 。Lee 等^[22]的研究也发现葡萄糖初始浓度影响 MEC 的降解性能,当葡萄糖初始浓度低于 4 g/L 时,降解率随着初始浓度的增大而提高,而当大于 4 g/L 时则随着初始浓度的升高而降低。试验中各组底物的葡萄糖初始浓度均低于 4 g/L ,结果表现为降解率随着初始浓度的减小而下降,与 Lee 等的研究结果一致。当然,鉴于各体系为不同配比的葡萄糖与 BSA 混合溶液,也不排除由于蛋白质的存在影响葡萄糖降解的可能。

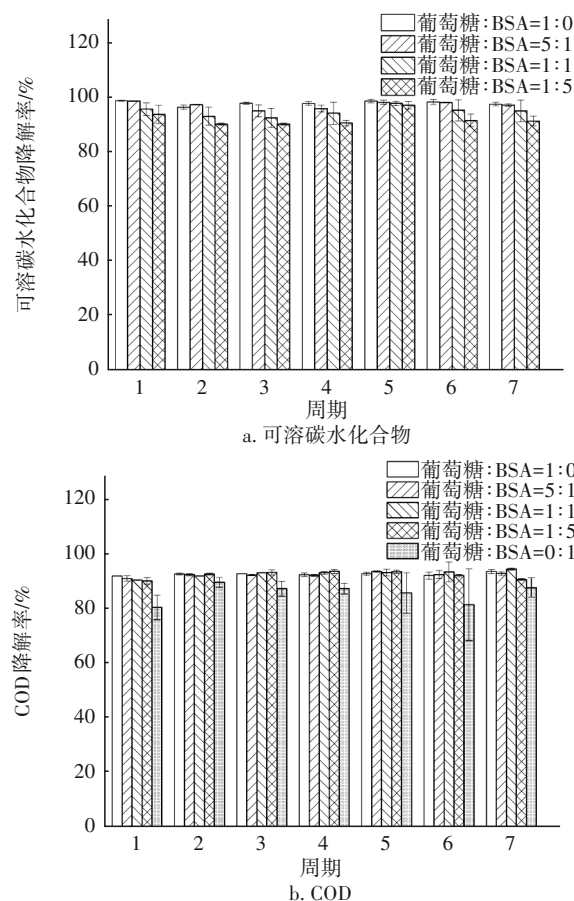


图6 不同混配比底物的MEC中可溶碳水化合物和COD的变化
Fig.6 Change of soluble carbohydrates and COD of MEC with different mixing ratios of substrates

图 6(b)为 MEC 中 COD 的降解效果。可知,所有试验组的 COD 降解率均大于 80%,其中混配有葡萄糖的试验组 COD 降解率几乎一致,为 $(92 \pm 2)\%$;而单一 BSA 底物的 COD 降解率在运行的 7 个周期中均低于其他试验组,且降解效果波动相对较大,降解率为 $(85.9 \pm 3.92)\%$ 。结果表明,以葡萄糖为底物的 COD 降解效果优于 BSA,这与电流密度的结果

相类似。在 Lu 等^[23]的研究中也认为,在相同条件下葡萄糖相较于蛋白质更容易被去除。

2.3.3 相关性分析

不同混配比底物各类指标的相关性热图如图7所示。可知, H_2 产量与葡萄糖降解量呈显著正相关($R=0.92, P<0.05$),与BSA降解量呈负相关($R=-0.83, P>0.05$),说明葡萄糖相较于BSA更利于产氢;能量效率与 H_2 产量呈显著正相关($R=0.99, P<0.05$),与可溶碳水化合物降解量也呈极显著正相关($R=0.96, P<0.01$),与蛋白质的降解量呈负相关($R=-0.84, P>0.05$),说明葡萄糖作为底物被利用时更利于 H_2 的回收,能量损失较低;而蛋白质与产 H_2 性能的相关性都不显著,表明其对产 H_2 性能的影响较小。蛋白质的降解与葡萄糖的降解呈显著负相关($R=-0.90, P<0.05$),同时 NH_4^+-N 浓度也与葡萄糖降解量呈极显著负相关($R=-1.00, P<0.01$),说明葡萄糖的存在抑制了BSA的降解,改变了蛋白质的降解途径,影响了蛋白质降解副产物 NH_4^+-N 的生成。

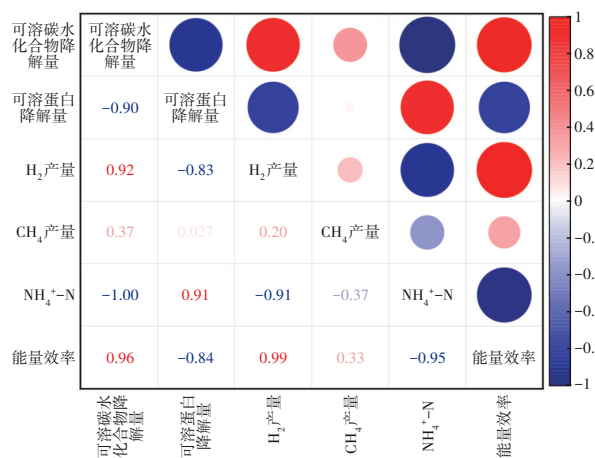


图7 产氢效能与底物变化的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between hydrogen production efficiency and substrate change

3 结论

① 采用NaAc作为底物可快速启动MEC,电流密度达到 $1.00 A/m^2$,COD降解率达到82%以上;缩短 H_2 停留时间和暴露阴极可明显改善 H_2 产量。

② 随着底物中葡萄糖浓度的减少,MEC的电流密度和能量效率会相应降低,说明葡萄糖较蛋白质更容易被产电菌所利用。

③ 葡萄糖表现出更优的产 H_2 性能,单一葡萄

糖试验组产 H_2 量最高可达 $(28.96 \pm 3.45) mL$;BSA则更利于产 CH_4 ,单一BSA试验组几乎没有 H_2 生成。随着MEC周期数增加, H_2 被利用生成 CH_4 的情况仍较为严重,这也是今后研究需要解决的难点。

④ 在MEC中葡萄糖可被有效地降解,降解率均达到 $(92.24 \pm 1.84)\%$ 以上;葡萄糖会影响BSA的利用,抑制蛋白质向 NH_4^+-N 的转化,具体机制有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 胡少刚,任天成,李珍,等. 类芬顿调理污泥用于微生物电解池产氢与磷回收的研究[J]. 环境科学学报, 2019,39(2):447-458.
HU Shaogang, REN Tiancheng, LI Zhen, et al. Study on Fenton-like conditioning of sludge for hydrogen production and phosphorus recovery in microbial electrolysis cells [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019,39(2): 447-458(in Chinese).
- [2] YANG J N, LIU X R, WANG D B, et al. Mechanisms of peroxymonosulfate pretreatment enhancing production of short-chain fatty acids from waste activated sludge [J]. Water Research, 2019, 148: 239-249.
- [3] ZHOU A J, LIU Z H, WANG S F, et al. Bio-electrolysis contribute to simultaneous bio-hydrogen recovery and phosphorus release from waste activated sludge assisted with prefermentation[J]. Energy, 2019, 185: 787-794.
- [4] SUN R, XING D F, JIA J N, et al. Optimization of high-solid waste activated sludge concentration for hydrogen production in microbial electrolysis cells and microbial community diversity analysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39 (35): 19912-19920.
- [5] ZHOU A J, ZHANG J G, CAI W W, et al. Comparison of chemosynthetic and biological surfactants on accelerating hydrogen production from waste activated sludge in a short-cut fermentation-bioelectrochemical system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(14): 9044-9050.
- [6] MITOV M, CHORBADZHIYSKA E, NALBANDIAN L, et al. Nickel-based electrodeposits as potential cathode catalysts for hydrogen production by microbial electrolysis [J]. Journal of Power Sources, 2017, 356: 467-472.
- [7] YU Z, LIU W Z, SHI Y J, et al. Microbial electrolysis

- enhanced bioconversion of waste sludge lysate for hydrogen production compared with anaerobic digestion [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767: 144344.
- [8] YANG N, HAFEZ H, NAKHLA G. Impact of volatile fatty acids on microbial electrolysis cell performance [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 193: 449–455.
- [9] CALL D, LOGAN B E. Hydrogen production in a single chamber microbial electrolysis cell lacking a membrane [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 (9): 3401–3406.
- [10] ZAKARIA B S, GUO H, KIM Y, *et al.* Molecular biology and modeling analysis reveal functional roles of propionate to acetate ratios on microbial syntrophy and competition in electro-assisted anaerobic digestion [J]. *Water Research*, 2022, 216: 118335.
- [11] KADIER A, SIMAYI Y, KALIL M S, *et al.* A review of the substrates used in microbial electrolysis cells (MECs) for producing sustainable and clean hydrogen gas [J]. *Renewable Energy*, 2014, 71: 466–472.
- [12] LU L, XING D F, XIE T H, *et al.* Hydrogen production from proteins via electrohydrogenesis in microbial electrolysis cells [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2010, 25(12): 2690–2695.
- [13] ZHAO L, WANG X T, CHEN K Y, *et al.* The underlying mechanism of enhanced methane production using microbial electrolysis cell assisted anaerobic digestion (MEC-AD) of proteins [J]. *Water Research*, 2021, 201: 117325.
- [14] WANG A J, SUN D, CAO G L, *et al.* Integrated hydrogen production process from cellulose by combining dark fermentation, microbial fuel cells, and a microbial electrolysis cell [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(5): 4137–4143.
- [15] ZHANG J N, BAI Y X, FAN Y T, *et al.* Improved bio-hydrogen production from glucose by adding a specific methane inhibitor to microbial electrolysis cells with a double anode arrangement [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2016, 122 (4): 488–493.
- [16] 吕丰锦, 韩云平, 刘俊新, 等. 污泥有机成分与污泥厌氧消化潜能的研究进展 [J]. *环境工程*, 2016, 34(S1): 780–785, 467.
- LÜ Fengjin, HAN Yunping, LIU Junxin, *et al.* Research progress on the characteristics of sewage sludge and its anaerobic digestion performance [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34 (S1): 780–785, 467 (in Chinese).
- [17] WANG X T, ZHANG Y F, WANG B, *et al.* Enhancement of methane production from waste activated sludge using hybrid microbial electrolysis cells-anaerobic digestion (MEC-AD) process—a review [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 346: 126641.
- [18] HU K, JIA S Q, YANG C, *et al.* Combined freezing-thawing pretreatment and microbial electrolysis cell for enhancement of highly concentrated organics degradation from dewatered sludge [J]. *Bioengineered*, 2020, 11(1): 301–310.
- [19] NAM J Y, YATES M D, ZAYBAK Z, *et al.* Examination of protein degradation in continuous flow, microbial electrolysis cells treating fermentation wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171: 182–186.
- [20] JIANG Y, MCADAM E, ZHANG Y, *et al.* Ammonia inhibition and toxicity in anaerobic digestion: a critical review [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, 32: 100899.
- [21] MAHMOUD M, TORRES C I, RITTMANN B E. Changes in glucose fermentation pathways as a response to the free ammonia concentration in microbial electrolysis cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(22): 13461–13470.
- [22] LEE M, REDDY C N, MIN B. In situ integration of microbial electrochemical systems into anaerobic digestion to improve methane fermentation at different substrate concentrations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(4): 2380–2389.
- [23] LU L, XING D F, LIU B F, *et al.* Enhanced hydrogen production from waste activated sludge by cascade utilization of organic matter in microbial electrolysis cells [J]. *Water Research*, 2012, 46(4): 1015–1026.
-
- 作者简介: 鄢胜韩 (1999–), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 主要研究方向为固废资源化利用。
E-mail: 541582825@qq.com
收稿日期: 2022-11-14
修回日期: 2023-03-02

(编辑: 沈靖怡)