

绿色生物制造

谭天伟 苏海佳 陈必强 王萌 蔡的 肖刚 崔子恒

(北京化工大学 生命科学与技术学院 国家能源生物炼制研发中心, 北京 100029)

摘要:介绍了生物经济与绿色生物制造的概念以及二者之间的关系,分析讨论了生物制造在国际上的发展现状和趋势,结合我国国情讨论了我国经济社会发展对绿色生物制造的迫切需求,指出了绿色生物制造将在未来经济社会发展中起到重要作用,并围绕生物质高效利用制备乙醇和丁醇、油脂原料生物炼制制备燃料与增塑剂以及低值生物质资源高值化三大方面,详细介绍了其背景、发展趋势及团队成果。

关键词:生物经济;绿色生物制造;生物质;乙醇;丁醇;生物液体燃料;增塑剂;高值化利用

中图分类号:TQ923 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2018.05.013

引言

生命科学和生物技术的发展推动了生物经济概念的形成与发展。生物技术领域(如基因组学等)新的发现与应用正在促使医药、健康、农业、食品、营养、能源、环境等产业发生重组和融合,进而导致世界经济发生深刻变化。生物经济是基于现有生物技术及其外延技术的发展而产生的新经济模式,是以物质的自然循环为出发点,基于现有技术对生物资源(各种自然和可再生的陆地和海洋生物资源、生物多样性和生物材料如植物、动物和微生物)进行利用、改造、生产并得到满足用户需求的产品而产生的所有经济活动。

绿色生物制造是生物经济发展的关键。绿色生物制造使用可持续的生物质,如糖、淀粉、木质纤维素、动植物油等作为生产的基础原料,同时充分利用工业化过程的侧线产品(CO_2 、CO、合成气、甲烷等)以及工业过程废弃物,通过多种物理、化学、生物等加工处理过程将其转化为具有更高附加值的生物基产品,包括食品、饲料、药物、复合材料、能源燃料等。正是由于绿色生物制造在生物经济中的重要地位,世界范围内多国发布了生物制造发展规划以持续加强生物经济顶层设计。近5年来,生物产业的基本目标被纳入了30多个国家的战略规划,包括世界上

主要国家和地区,例如美国的“国际生物经济联盟(2012)”、欧盟委员会的“欧洲生物经济(2012)”、加拿大的“加拿大蓝图(2011)”、英国的“英国生物能源战略(2011)”、德国的“生物经济国际政策(2013)”、印度的“国际生物技术发展战略(2014)”以及日本的“生物质工业化战略(2013)”等。

我国经济社会的可持续发展对绿色生物制造同样具有重大需求。目前,我国经济社会可持续发展面临的主要问题有二:一是能源及化工行业过渡依赖石油、煤炭等不可持续高污染的化石资源;二是生产过程中大量使用有毒有害化学原料及有机溶剂。绿色生物制造能够帮助解决这些问题,主要手段包括:实现关键技术的颠覆性创新,打破技术壁垒;抢占行业制高点,改变产业格局,实现产品结构与制造方式的改变,培育新的增长点;改善生态环境,实现人民健康生活,助推绿色中国。为了实现这一目标,我校北京市生物加工重点实验室和国家能源生物炼制研发中心依靠平台优势与学科交叉,建设一流创新团队,围绕重大化工产品的绿色生物制造,从基础研究、共性关键技术到产业应用示范进行一体化部署,攻克了一批技术瓶颈,为生物产业和化工行业存在的结构性问题提出创新解决方案,以满足我国发展清洁生产、绿色低碳技术和循环经济的战略需求。

1 生物质高效利用制备乙醇、丁醇

1.1 背景意义

生物质液体燃料是唯一的以液体为储能方式的可再生能源形式。利用农业秸秆生物质资源生产生

收稿日期:2018-07-30

第一作者:男,1964年生,中国工程院院士,教授,博士生导师

E-mail:twtan@mail.buct.edu.cn

物醇类燃料并实现能源化利用,是推动能源生产和消费革命、突破能源和环境约束以及增加能源供给的重要手段。在不同种类的生物质液体燃料中,乙醇已成为全球应用最为广泛的一种生物能源。近年来,随着产品规模不断扩大,以粮食为基础的乙醇生产模式受到限制,以低值纤维质农林废弃物为基础的第二代生物燃料乙醇的开发受到世界各国的重视。相比之下,丁醇作为另一种生物替代燃料,在能量密度和相容性等方面比乙醇更具优势,也成为近年来相关领域研发的热点。

1.2 国内外研究进展

燃料乙醇的相关技术研发与产业建设作为生物燃料产业的主要技术研发方向和产业组成部分,受到世界各国的重视与推动。现阶段,有纤维素资源生产燃料乙醇技术已进入产业化示范阶段,伴随纤维乙醇关键技术的开发,世界主要国家不同程度上开始开发技术的商业化生产尝试,纤维素酶、戊糖己糖共发酵菌株构建方面的技术已进入工业验证阶段。美国在纤维乙醇生产技术方面的研究走在了世界前列,欧洲燃料乙醇原料正处于由第一代到第二代过渡阶段。尽管纤维乙醇产业发展受到原油价格波动的影响,但近年来依然涌现出多项商业化试生产项目,如 2012 ~ 2015 年前后,意大利、巴西、美国等国家先后建立了至少 6 家纤维乙醇示范工厂,年生产规模达到 3 ~ 9 万 t。

除解决秸秆原料季节性、分散性、储运困难等问题,在现阶段研究中还迫切需要开发 3 类关键核心技术:①在低化学品、低能耗和低废水排放下高效破坏植物细胞壁并分离出纤维素、半纤维素和木质素等组分,以显著提高纤维素酶解效率;②纤维素酶复配和就地生产关键技术;③构建高抑制物耐受性的、戊糖、己糖共发酵的稳定基因工程菌。由于相比乙醇具有更高的碳氢比,丁醇在作为液体燃料使用时具有能量密度高、与汽油互溶性好等诸多优点,是一种具有前景的生物燃料^[1]。近年来,随着可再生能源技术开发不断得到重视和发展,发酵法制备丙酮-丁醇-乙醇(acetone-butanol-ethanol, ABE)重获关注。国际方面,Gofo 公司通过改造一代燃料乙醇生产线;国内尽管部分厂家也积极推动了纤维丁醇的产业化示范,但受制于国际原油价格,目前世界范围内多数生物丁醇产能无法实现生产。

造成生物丁醇原料成本高的主要原因是 ABE 发酵副产物溶剂产物较多^[2]。理论上,葡萄糖底物对

ABE 发酵的总溶剂转化率为 0.4 g/g,其中丁醇的转化率仅为 0.24 g/g 左右,远低于乙醇的理论转化率 0.51 g/g^[3]。由于严重的丁醇产物细胞毒性,生物丁醇制备过程中的能量消耗主要集中在产物分离阶段;多种副产物的存在也进一步增加了 ABE 发酵下游分离的技术难度;此外,产物的毒性使得 ABE 发酵的溶剂时空产率较低。在生产规模上,生产单位质量纤维丁醇产能的设备投入和生产规模远超纤维乙醇。

为解决上述生产瓶颈,目前生物丁醇的技术发展趋势主要有:①在原料的选择上,面向非粮生物质资源,选择低值底物进行发酵,从生产源头控制生物丁醇的生产成本;②构建高耐受性和高产丁醇的发酵菌株,提高底物对生物丁醇的转化率;③通过发酵过程强化和发酵分离耦合,提升溶剂产率,减小生产装置规模,实现溶剂产物的低成本原位分离和浓缩;④构建生物炼制系统和延伸产业链,通过高附加值副产物的制备和生产,提高 ABE 发酵的产物经济性和生产可行性。

1.3 团队工作

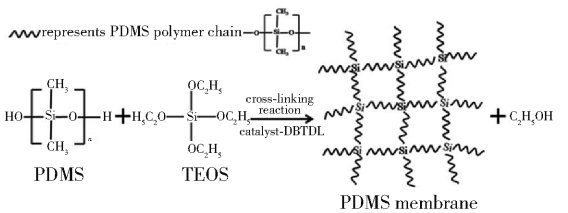
研究了新的木薯直接糖化和发酵耦合工艺(SSF),选育了新的高产菌种,乙醇发酵水平达到 17% (体积分数),高于目前厂家生产工艺 13% (体积分数)。目前已和国内燃料生产企业(如中粮等)合作,采用过程优化软件如 Aspen、Unisim 等,进行整个燃料乙醇的工艺优化^[4-8],设计了 20 万 t 食用酒精和燃料乙醇联产工艺,在中粮安徽丰原集团一次试车成功,实现了蒸汽消耗节约 30%,循环水节约 10%,经济效益年增 1 200 余万元。

开发了新型甜高粱联产乙醇、丁醇和木塑材料新工艺,可以将甜高粱中糖汁用于生产乙醇,将半纤维素转化为丁醇,利用木质素生产木塑材料^[9]。目前,该工艺系统已完成千吨级秸秆转化的中试研究。针对秸秆发酵过程中存在需外加营养元素和秸秆水解液需进行脱毒处理等问题,开发了碱性溶剂绿色预处理工艺^[10-12]。同时提出了诱变-进化工程联合菌株筛选技术,梭菌丁醇耐受性达到 20 g/L 以上,糠醛及衍生物耐受性达到 5 g/L,水解液总酚耐受性达到 2 g/L 左右;该菌种可直接利用纤维糖水溶液在无脱毒、无外加营养元素添加情况下高效发酵制备纤维乙醇、丁醇,有效降低了发酵成本^[13-15]。在此基础上,开发了半同步糖化高效制备纤维丁醇工艺,实现了 5 t 发酵规模的发酵生产,发酵醪液中

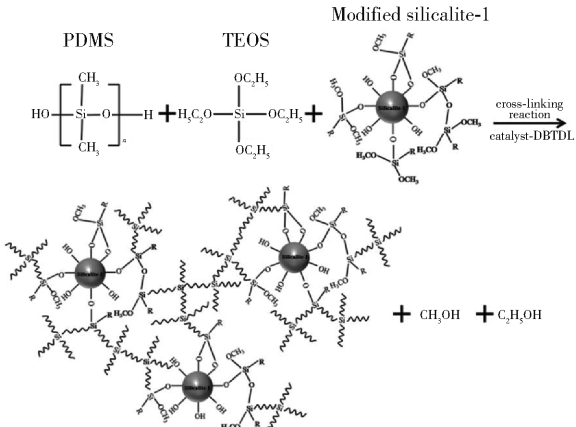
总溶剂浓度达到 13 g/L。

针对生物丁醇产物浓度低造成分离过程能耗高的问题,开发了一种水相法制备优先透醇渗透汽化膜的制备方法,克服了目前利用有机溶剂制备渗透汽化疏水膜的环境污染问题;在此基础上进行了渗透汽化的连续化绿色制备研究,实现了高通量、高选择性有机无机材料复合渗透汽化膜的绿色生产。利用新型的渗透汽化制备和分离技术实现了丁醇发酵产物的分离,在纤维丁醇发酵液分离过程中,膜的丁醇分离因子达到 72.9,总通量 1 156 g/(m²·h) (图 1)^[16-18]。

将渗透汽化技术和气提技术等多种原位技术相结合,实现了生物乙醇、丁醇的细胞固定化发酵与分离过程耦合,稳定发酵时长近 300 h^[19-24];在此基础上提出气提-蒸汽渗透整合分离模块,用于乙醇、丁醇、糠醛等挥发性有机质的分离^[25-26],并结合不同原位分离技术的特点提出了多级联分离系统,充分利用了渗透汽化的高选择性及气提分离过程的清洁性,获得了高达 707 g/L 的 ABE 溶剂,大大降低了分离过程的能耗,与传统精馏相比,能耗降低达 70% 以上。集成系统的渗透汽化膜较集成前分离指数 (pervaporation separation index , PSI) 提高了 9.6 倍,较文献报道最高水平^[27-30]提高了 2.13 倍(图 2)。



(a) PDMS膜和Silicalite-1/PDMS膜交联反应机理



(b) 改性Silicalite-1/PDMS膜的交联机理

图 1 改膜应用于气提-蒸汽渗透整合分离过程^[18]

Fig. 1 Schematic representation of crosslinking reaction of (a) PDMS membrane (or unmodified silicalite-1/ PDMS membrane) and (b) modified silicalite-1/ PDMS membrane. R represents an alkyl chain^[18]

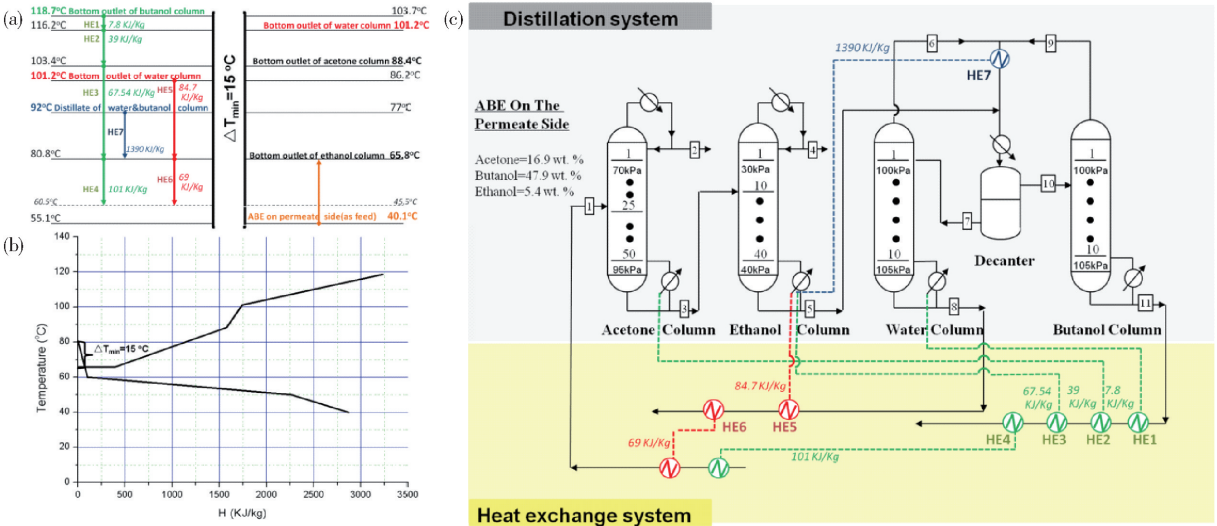


图 2 发酵耦合气提-渗透汽化集成分离模块的精馏系统构建^[29]

Fig. 2 Heat exchange for the distillation system after GS-PV integration process. (a) Grid diagram of the heat exchange system; (b) grand composite curve; (c) basic structure of the heat exchange system for the distillation unit after GS-PV process^[29]

面向生物质液体燃料的清洁化生产,针对纤维乙醇、丁醇高废水排放等问题,开发出两段法双菌发酵工艺,实现了发酵废水的超低排放;提出生物法降解有机废水耦合原位分离技术,实现了生物燃料一步生产、分离、废水处理的集成化生产和双菌发酵过程的菌体代谢协同和互补,使预处理黑液中的化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)降低了 40% 左右,发酵液废水中的 COD 降低了 70% 以上^[31-32]。为实现生物炼制系统固相废渣的高效回收利用,达到对秸秆“吃干榨尽”的目的,开发了发酵残渣制备木塑复合材料工艺,木塑材料中的残渣添加量达到 55% 以上,并成功试产出木塑四孔板、桑拿板、立柱、门框、木塑日用盆等木塑材料制品,其力学性能达到拉伸强度 15.3 MPa、弹性模量 3 174 MPa、弯曲强度 31.7 MPa、断裂伸长率 2.7%、密度 1.2 g/cm³、吸水率 0.6%,各项技术指标均高于国家行业标准^[33-36],有效提高了过程的经济性(图 3)。

为进一步提升生物炼制系统的经济性,开发了发酵-原位分离-化学(生物)催化级联技术,实现了高水含量的原位浓缩醇类混合物的高值化催化转化,从而规避了能耗较大的溶剂产物脱水过程,简化下游分离和转化工艺。分别通过耐水性 Ni/MgO-

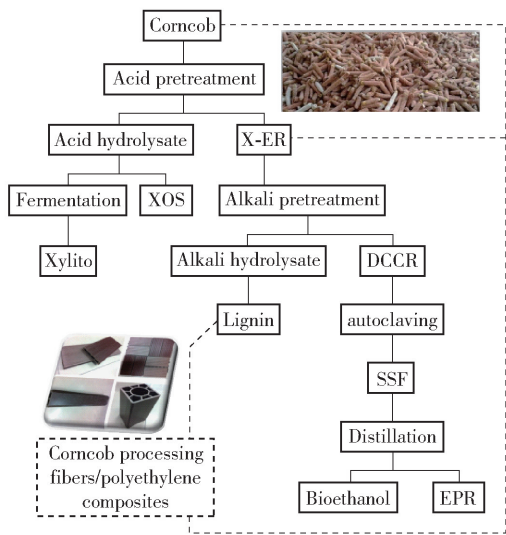


图 3 以生物炼制残渣为填充剂的木塑复合材料制备^[34]
Fig.3 Flow chart of the wood-plastic composite preparation using solid residual from biorefinery process^[34]

SiO₂ 催化剂和 MgO-SiO₂ 催化剂利用 ABE 混合物醛缩合制备了航空燃料前体及生物基丁二烯^[37-38],其中以 478.6 g/L 原位分离得到的乙醇溶液作为反应底物时,生物基丁二烯的选择性达到 75.8%,收率达到 64.1% (图 4)^[39]。利用耐水性脂肪酶全细胞催化技术,将原位分离醇类混合物催化转化制备了生物柴油和生物基增塑剂^[40-42]。

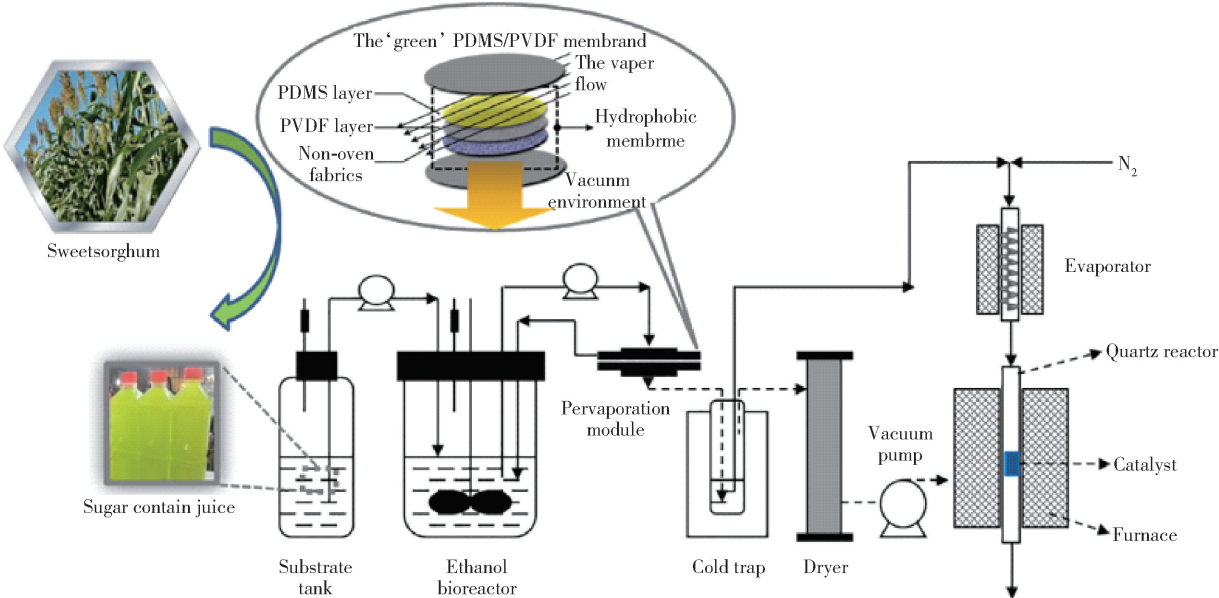


图 4 乙醇发酵-渗透汽化-催化级联制备生物基丁二烯工艺路线示意图^[39]
Fig.4 Flowchart of the FPC process for the production of bio-butadiene^[39]

2 油脂生物炼制制备生物液体燃料及生物基增塑剂

2.1 背景意义

生物酶催化合成化学品是绿色合成工艺的一个重要发展方向和前沿技术,目前绿色化工领域对新型酶催化转化技术的迫切需求使得越来越多的脂肪酶被应用到生物柴油及油脂基的精细化学品合成的领域。脂肪酶也被认为是继蛋白酶、糖化酶之后的又一大工业用酶。目前世界范围内主要的几个酶制剂公司,如丹麦诺维信公司(Novozymes A/S Co.)和日本天野酶制品株式会社(Amano Enzyme Inc.)等公司都推出了许多不同用途的商业化脂肪酶,但是商业酶制剂的高成本也限制了酶法工艺的工业化应用。与国外相比,国内只有作为洗涤剂的碱性脂肪酶,而能够用于化学品合成的脂肪酶数量不多或者催化活力不高,从而限制了油脂基化工产品的生物合成产业^[43]。

2.2 国内外研究进展

我国用酯化和转酯化反应生产的化学品有100多种,产值上百亿元。传统的合成方法全部采用酸和碱作为催化剂,该方法选择性差、环境污染问题严重。在非水相中,脂肪酶能催化酯化合成、酯交换反应、聚酯合成以及酰胺合成等反应,其中有些产品往往是用化学方法难以得到的,而在常温、常压下利用脂肪酶催化却能一举成功。脂肪酶催化以其高效性、高选择性、环境友好性以及催化底物广泛(酯、酸、醇、酰胺等都可以成为它的底物)的优势成为国内外研究的热点领域,并在酯化产品合成、油脂改性、手性拆分以及生物柴油合成等方面有广泛的应用。但是酶的高成本和低使用寿命等局限仍然是脂肪酶应用中的关键问题。根据国际标准的统计数据,大约20%左右的化学加工过程可以用酶法取代,而我国的酶法过程不到5%,主要的限制因素是酶制剂的过高成本。因此,要真正实现脂肪酶催化合成绿色化学品的工业应用,必须解决酶的活性、稳定性以及绿色催化工艺等关键问题^[44]。

2.3 团队工作

本团队开发脂肪酶的生产新技术,采用新型的合成培养基替代传统发酵培养基,降低了发酵液的杂蛋白含量,发酵酶活达到16 000 U/mL,并且生产周期缩短一半,大幅提高了生物酶的生产效率。通过生物酶分子的交联技术改善了生物催化剂的稳定

性和耐受性,并且通过流化干燥技术实现了规模化的快速制备,相关技术已申请了国家发明专利^[45]。

开发了基于酶催化的无溶剂酯化合成工艺,提出了基于酶微环境水活度控制的脂肪酶催化酯化无溶剂体系过程控制的策略;建立并首先发表了基于水活度的脂肪酶催化反应动力学模型^[46],研发了新型水活度智能控制酶反应器,并获得国家发明专利授权;该酶反应器已应用于脂肪酸酯、多元醇酯、植物甾醇酯等多种酯化产品的无溶剂体系合成,相比传统有机相中合成,可节省有机溶剂10 m³/t产品,过程更加绿色环保,设备时空产率提高8~10倍^[46]。

为了解决当前增塑剂合成过程中绿色化程度不高、产品不环保的问题,以可再生的亚麻籽油、棕榈仁油等油脂及葡萄糖为初始原料,采用具有自主知识产权的生物酶催化剂,建立了从酶的发酵、固定化到无溶剂体系的酶法催化生物基增塑剂合成的工艺路线,生物酶在常温常压下催化,并且合成中不使用任何挥发性有机溶剂,工艺过程绿色环保^[47]。其中关键核心技术如酶催化剂、酶反应器均具有自主知识产权,酶的成本远低于国外的商业酶。目前已经建立了年产万t的生物基增塑剂工业示范装置,并且通过了科技部组织的国家“863”项目现场验收;所开发产品已在儿童玩具、特种纺织、医用制品等多个下游行业得到应用,可100%替代传统邻苯二甲酸二辛酯(DOP)、邻苯二甲酸二异壬酯(DINP)等邻苯类增塑剂^[48],并且产品入选了2017年工信部《重点新材料首批次应用示范指导目录》,已实现产值3 000多万元。

针对原有生物柴油(脂肪酸甲酯)生产工艺能耗高、过程污染大的问题,团队建立了以低成本餐饮废弃油脂为原料,自主知识产权生物酶为催化剂的生物柴油反应体系及配套生产工艺,并以此为基础建立了30 000 t/a的工业生产线,生物柴油转化率稳定在90%以上,精馏分离后的生物柴油产品符合GB/T 20828—2015标准要求^[49]。在此基础上,针对油脂及生物柴油(脂肪酸甲酯)加氢转化,开发了介孔ZSM-5、介孔ZSM-22、介孔SAPO-11和IZM-2等一系列以新型多孔材料为载体的双功能催化剂^[50-51];通过油脂原料与催化剂的协同作用开发了一系列油脂原料生物航空燃料的制备方法,使航空燃料收率大幅提升,从目前的40%提高到60%,并实现了中试验证,生产出符合ASTM 7566标准的航

空燃料样品^[52]。

3 低值生物质资源的高值转化

3.1 背景意义

我国是世界上有机废弃物产生量最大的国家,大量的固体有机废弃物未被资源化利用,而是被随意焚毁、丢弃或直接排放到环境中,造成严重的环境污染和资源浪费,使资源成为污染源。废弃生物质材料作为一类重要的固体有机废弃物,主要来源于植物、动物、微生物等生物质资源,例如农林废弃物、废弃微生物菌渣、餐饮有机废弃物等^[53]。废弃生物质材料富含多糖、蛋白、核酸等生物大分子,以其为原料可以获得能源化学品、精细化学品、生物基功能材料等多种高附加值产品^[54]。世界各国都十分重视并开展有机生物质残渣资源化与高值化方面的基础和应用基础研究,强化废弃物减量化、资源化利用与安全处置,提高生物质残渣资源的有效利用率。因此研发和建设有机生物质残渣无害化和资源化技术,是一项提升我国有机废弃物资源处理与利用水平、发展循环经济的重要途径,具有明显的经济效益、环境效益和社会效益。

3.2 国内外研究进展

近年来,针对植物来源的农林废弃物的高值转化得到了研究者的广泛关注并取得了显著的进展,例如生物乙醇、生物质重整制氢、纤维素基平台化合物等^[55]。但是,同样作为大宗低值生物质材料的废弃微生物菌渣和餐饮有机废弃物则得到关注较少,因其成分相比农林废弃物而言更加复杂,转化和利用的难度也更大。

我国发酵工业每年产生废弃微生物菌渣超过 8 000 万 t,目前主要作为固体废弃物直接排放,少量进行了低价值的饲料化和堆肥处理^[56]。废弃微生物菌渣以微生物菌体为主要成分,富含多糖、蛋白、核酸等生物大分子,而其中不乏一些高附加值产品,其中最具代表性的当属壳聚糖。壳聚糖作为一种重要的生物活性多糖,在生物医用材料、吸附材料、食品等领域都具有重要的用途,目前主要通过虾壳、蟹壳、食用真菌提取的方法进行生产,成本较高。研究者已从青霉、曲霉等发酵废菌渣中成功实现了壳聚糖的提取,证明这些低值微生物生物质同样可以作为壳聚糖提取的原料^[57-58]。此外,亦有研究者开发出由发酵废菌渣提取红曲色素、粗蛋白、麦角固醇等有效成分的新工艺^[59],

但是目前以废弃微生物菌渣为原料进行的高值成分提取仍集中在单一或少数几种产品上,难以对其进行充分的资源化利用。

微生物菌体表面富含羟基、氨基、羧基等功能基团,对废水中的重金属、染料等多种污染物具有优异的吸附性能,以废弃微生物菌渣为原料制备水处理剂,不仅能实现其高值转化,同时可以用于废水中污染物的治理,达到“以废治废、变废为宝”的目的。不同种类的低值微生物生物质均可用于制备生物吸附材料,例如以酿酒酵母废弃菌丝体、褐藻废弃菌体为主要原料制备的生物吸附剂能够用于重金属、贵金属、放射性金属、有机染料等污染物的吸附去除或回收^[60-61]。然而直接以废弃微生物菌体作为生物吸附剂,其机械强度和吸附性能往往不尽如人意;此外,基于废弃微生物菌体的生物吸附作用仍然是一种污染物转移的物理过程,无法实现彻底去除,容易造成严重的二次污染。

餐饮有机废弃物在存放、收集、转运及垃圾填埋过程中,由于其含水率和有机物含量较高,极易在较短时间内腐烂发臭和滋生蚊蝇等,极大地污染了周围环境。与其他生活垃圾相比,餐厨垃圾含水量、有机物含量、油脂含量及盐分含量高,营养成分丰富,具有很高的回收利用价值。目前通常采用的焚烧、填埋等处理手段都会导致大量有机物的浪费,随着人们环保意识的提高,以及餐厨垃圾便于单独收集的特点,完全可以逐步实现餐厨垃圾单独收集与处置,从而减轻城市生活垃圾的处理难度。北京市已将餐厨垃圾处理列入《北京市 2010 年节能节水减排技术推荐目录》,并明确提出高校、宾馆等餐厨垃圾高产单位建设餐厨垃圾集中处理项目,可获得一次性政府资金补贴。

3.3 团队工作

本团队主要针对低值生物质废弃物组分复杂、经济性差、环境污染严重等关键共性问题,基于学科交叉与过程集成,以生物化学转化与过程耦合为主要手段,围绕低值有机生物质资源的高值/高效利用与生态环境的有效治理,重点开展“低值生物质原料的高效转化”的基础性、前瞻性研究工作,建立了低值微生物生物质资源高效利用和转化关键技术平台,以物尽其用、变废为宝为原则,使废弃有机生物质变废为宝,实现低值生物质功能化和生物资源利用最大化。

3.3.1 复杂低值有机生物质资源高效/定向转化机制与过程优化

以废弃或低值生物质如秸秆、酒糟等为原料,以不同原料生物质特征的优化利用与原料转化机制为关键科学问题,围绕不同生物基产物的反应和传递行为的过程耦合,探讨生物质原料的功能转化机制。重点研究方向包括以下内容。

(1)废弃微生物菌渣的高值转化。以青霉素、柠檬酸等发酵工业废菌渣为原料,首先成功开发了从发酵废菌丝体中提取壳聚糖、麦角固醇、氨基葡萄糖、粗蛋白以及油脂的新工艺,将菌丝体有效成分“吃干榨尽”,相比原有的以虾、蟹壳为原料生产壳聚糖和酵母发酵法生产麦角固醇,成本大大降低^[62]。

(2)提出了菌丝体表面分子印迹新思想。深入研究其亲和吸附机制;形成了菌丝体表面分子印迹吸附剂制备新技术(图 5),实现了废菌体的高值转化^[63];该菌丝体表面分子印迹吸附剂制备技术(1 000 t/a)及应用已实现了工业化。

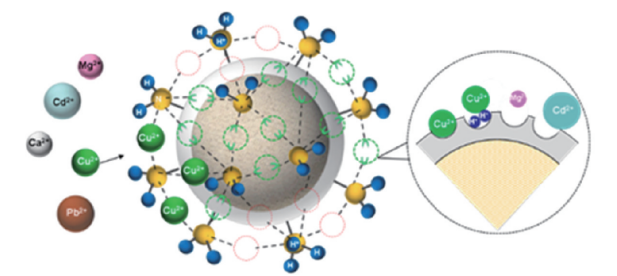


图 5 菌丝体表面分子印迹生物吸附剂设计思路与选择性识别机理^[63]

Fig. 5 Design ideas and selective recognition mechanism of the mycelium surface molecular imprinted biosorbent^[63]

(3)构建基于金属螯合作用的新型超分子分离介质。以生物质为原料,利用耦合生物亲和吸附技术、分子印迹技术以及纳米 TiO₂ 光催化技术,针对多组份复杂生物分离体系,通过计算机分子模拟进行新型分离介质的分子设计,构建了基于金属螯合作用的新型超分子分离介质^[62-67],并成功应用于有机污染物降解、重金属离子高效吸附等方面^[68-71]。

(4)生物质全量利用的可降解生物材料。以废弃或低值生物质为原料,通过深入探讨适合于生物质特征的优化控制原理和不同原料的利用效率、预处理工艺优化改进、生物质的全过程利用等科学问题,形成了废弃生物质资源高值利用生产生物可降

解农用地膜制备技术,建立了中试制备装置,并与北京农业大学合作进行了农田实验,玉米、棉花、花生等农作物的产量均可提升 8% ~ 12%^[72-74]。

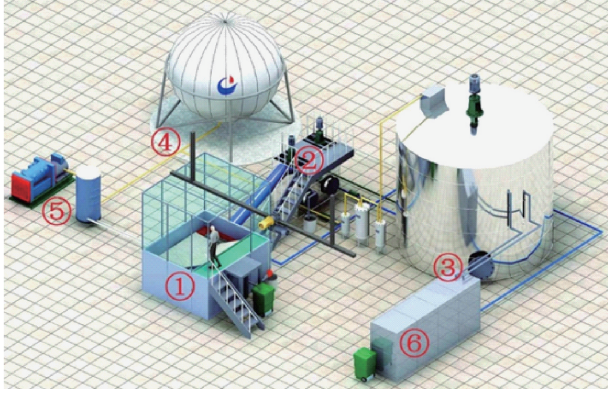
3.3.2 复杂生物原料的高效转化机制

针对低劣生物质原料组分复杂、特定时空下复杂组分降解速率不同步、天然菌群利用率低、多细胞交互作用机制不清晰等问题,通过研究细胞间物质流、能量流和信息流的适配性及其优化机制,人工构建了高效微生物多细胞体系,阐明了复杂生物原料高效转化与多细胞体系协同效应机制。重点研究方向包括以下内容。

(1)复杂原料关键菌群人工构建。以有机物降解过程中特定低劣组分复杂体系同步利用效率为关键科学问题,针对餐厨垃圾组分复杂、高 COD、高盐、高油脂特性,以及纤维素、半纤维素、油脂等成分降解速率慢的问题,通过复杂原料关键菌群人工构建,与天然多细胞体系互利共生,强化特定低劣组分复杂体系同步利用效率,研究人工多细胞共生耦合系统的可控构建^[75-78]。

(2)多细胞体系协同作用机制。基于 C/N 物质流调控与多细胞体系协同作用机制,揭示了多菌群之间的代谢互补性和物质、信息、能量调控机制,以及多菌群之间的代谢互补性;通过多细胞体系协同作用以及细胞间物质流的适配策略,深入研究多细胞体系的协同作用机制,建立复杂降解过程动力学模型来量化描述多污染物降解和多细胞群体协同效应及调控机制^[79-81]。

(3)建立低劣生物质高效利用平台。餐饮有机废弃物的高值转化方面,团队针对其组分复杂、高 COD、高盐、高油脂的特性,以及特定时空下复杂组分降解速率不同步和有机质转化效率低的瓶颈,通过多细胞体系协同作用以及细胞间物质流的适配策略,构建高效人工共生多细胞体系,实现了餐厨垃圾高效利用和高值转化生产天然气、生物柴油和沼液沼渣有机肥^[82-84]。在北京化工大学“优势学科创新平台中试基地暨国家大学科技园昌平园”建成了主体消化罐 100 m³ 的餐厨垃圾综合利用示范基地(图 6),利用北京化工大学昌平校区食堂及周边餐饮单位可单独收集的餐厨与果蔬垃圾,集中进行厌氧消化,日处理能力(原始物料)1 ~ 2 t,日产天然气 120 ~ 200 m³ (甲烷含量 55% ~ 70%),日产固体有机肥 0.7 ~ 1.4 t,提取粗油脂 60 ~ 100 kg,生物柴油原料油提取率超过 60%,稳定运行 1 年以上。



①—接收分选平台;②—匀浆调节池;③—厌氧消化罐;④—储气设备;⑤—沼气提纯精制装置;⑥—沼液沼渣池。

图6 餐厨垃圾厌氧消化一体化设备示意图

Fig.6 Schematic diagram of the integrated equipment for anaerobic digestion of food waste

参考文献:

- [1] BHARATHIRAJA B, JAYAMUTHUNAGAI J, SUDHARSANAA T, et al. Biobutanol – an impending biofuel for future: a review on upstream and downstream processing techniques[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 788–807.
- [2] JIANG Y, LIU J, JIANG W, et al. Current status and prospects of industrial bio-production of n-butanol in China[J]. *Biotechnology Advances*, 2015, 33 (7): 1493–1501.
- [3] ZHANG B, SUN H, LI J, et al. High-titer-ethanol production from cellulosic hydrolysate by an engineered strain of *saccharomyces cerevisiae* during an in situ removal process reducing the inhibition of ethanol on xylose metabolism[J]. *Process Biochemistry*, 2016, 51 (8): 967–972.
- [4] BAEYENS J, KANG Q, APPELS L, et al. Challenges and opportunities in improving the production of bio-ethanol[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, 47: 60–88.
- [5] KANG Q, APPELS L, BAEYENS J, et al. Energy-efficient production of cassava-based bio-ethanol[J]. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 2014, 5 (12): 925–939.
- [6] KANG Q, APPELS L, TAN T, et al. Bioethanol from lignocellulosic biomass: current findings determine research priorities[J/OL]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 298153. [2018-08-15]. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/298153>.
- [7] KANG Q, BRYGGEN B V D, DEWIL R, et al. Hybrid operation of the bio-ethanol fermentation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 149: 322–330.
- [8] KANG Q, BAEYENS J, TAN T, et al. A novel sintered metal fiber microfiltration of bio-ethanol fermentation broth[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2015, 32 (8): 1625–1633.
- [9] YU J, ZHANG T, ZHONG J, et al. Biorefinery of sweet sorghum stem[J]. *Biotechnology Advances*, 2012, 30 (4): 811–816.
- [10] LI P, CAI D, ZHANG C, et al. Comparison of two-stage acid-alkali and alkali-acid pretreatments on enzymatic saccharification ability of the sweet sorghum fiber and their physicochemical characterizations[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 221: 636–644.
- [11] CAI D, LI P, LUO Z, et al. Effect of dilute alkaline pretreatment on the conversion of different parts of corn stalk to fermentable sugars and its application in acetone-butanol-ethanol fermentation[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 211: 117–124.
- [12] LI P, CAI D, LUO Z, et al. Effect of acid pretreatment on different parts of corn stalk for second generation ethanol production[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 206: 86–92.
- [13] CAI D, ZHANG T, ZHENG J, et al. Biobutanol from sweet sorghum bagasse hydrolysate by a hybrid pervaporation process[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 145: 97–102.
- [14] CAI D, CHEN C, ZHANG C, et al. Fed-batch fermentation with intermittent gas stripping using immobilized *clostridium acetobutylicum* for biobutanol production from corn stover bagasse hydrolysate[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2017, 125: 18–22.
- [15] CAI D, DONG Z, WANG Y, et al. Biorefinery of corn cob for microbial lipid and bio-ethanol production: an environmental friendly process[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 211: 677–684.
- [16] LI S, QIN F, QIN P, et al. Preparation of PDMS membrane using water as solvent for pervaporation separation of butanol-water mixture[J]. *Green Chemistry*, 2013, 15 (8): 2180–2190.
- [17] SI Z, HU S, CAI D, et al. Performance enhancement of a polydimethylsiloxane membrane for effective n-butanol pervaporation by bonding multi-silyl-functional MCM-41[J]. *RSC Advances*, 2018, 8 (10): 5127–5135.
- [18] HU S, REN W, CAI D, et al. A mixed matrix membrane for butanol pervaporation based on micron-sized silicalite-1 as macro-crosslinkers[J]. *Journal of Membrane Science*,

- 2017, 533: 270–278.
- [19] CAI D, WANG Y, CHEN C, et al. Acetone-butanol-ethanol from sweet sorghum juice by an immobilized fermentation-gas stripping integration process[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 211: 704–710.
- [20] CAI D, LI P, CHEN C, et al. Effect of chemical pre-treatments on corn stalk bagasse as immobilizing carrier of *Clostridium acetobutylicum* in the performance of a fermentation-pervaporation coupled system[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 220: 68–75.
- [21] FU C, CAI D, HU S, et al. Ethanol fermentation integrated with PDMS composite membrane: an effective process[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 648–657.
- [22] CHANG Z, CAI D, WANG Y, et al. Effective multiple stages continuous acetone-butanol-ethanol fermentation by immobilized bioreactors: making full use of fresh corn stalk[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 205: 82–89.
- [23] CHANG Z, CAI D, WANG C, et al. Sweet sorghum bagasse as an immobilized carrier for ABE fermentation by using *Clostridium acetobutylicum* ABE 1201[J]. *RSC Advances*, 2014, 4(42): 21819–21825.
- [24] CAI D, CHANG Z, GAO L, et al. Acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation integrated with simplified gas stripping using sweet sorghum bagasse as immobilized carrier[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 277: 176–185.
- [25] HU S, GUAN Y, CAI D, et al. A novel method for furfural recovery via gas stripping assisted vapor permeation by a polydimethylsiloxane membrane[J/OL]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9428. [2018-08-15]. <http://10.1038/srep094288>.
- [26] SI Z, SHAN H, HU S, et al. Recovery of ethanol via vapor phase by polydimethylsiloxane membrane with excellent performance[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, 136: 324–333.
- [27] WEN H, GAO H, ZHANG T, et al. Hybrid pervaporation and salting-out for effective acetone-butanol-ethanol separation from fermentation broth[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2018, 2: 45–52.
- [28] WEN H, CHEN H, CAI D, et al. Integrated in situ gas stripping-salting-out process for high-titer acetone-butanol-ethanol production from sweet sorghum bagasse[J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2018, 11(1): 134.
- [29] CAI D, CHEN H, CHEN C, et al. Gas stripping-pervaporation hybrid process for energy-saving product recovery from acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation broth[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 287: 1–10.
- [30] CAI D, HU S, MIAO Q, et al. Two-stage pervaporation process for effective in situ removal acetone-butanol-ethanol from fermentation broth[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224: 380–388.
- [31] CAI D, DONG Z, HAN J, et al. Co-generation of bio-butanol and bio-lipids under a hybrid process[J]. *Green Chemistry*, 2016, 18(5): 1377–1386.
- [32] CAI D, DONG Z, WANG Y, et al. Co-generation of microbial lipid and bio-butanol from corn cob bagasse in an environmentally friendly biorefinery process[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 216: 345–351.
- [33] LUO Z, LI P, CAI D, et al. Comparison of performances of corn fiber plastic composites made from different parts of corn stalk[J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 95: 521–527.
- [34] CHEN B Q, CAI D, LUO Z, et al. Corncob residual reinforced polyethylene composites considering the biorefinery process and the enhancement of performance[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 198: 452–462.
- [35] CHEN B, SHEN X, LUO Z, et al. Feasibility of polyethylene composites reinforced by distillers dried fibers with solubles (DDFS) after different generations of ethanol fermentation[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(45): 25602–25610.
- [36] CHEN B, LUO Z, CHEN H, et al. Wood plastic composites from the waste lignocellulosic biomass fibers of bio-fuels processes: a comparative study on mechanical properties and weathering effects[J/OL]. *Waste and Biomass Valorization*, 2018. (2018-07-26). <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0413-8>.
- [37] ZHU Q, SHEN C, WANG J, et al. Upgrade of solvent-free acetone-butanol-ethanol mixture to high-value biofuels over Ni-containing MgO-SiO₂ catalysts with greatly improved water-resistance[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(9): 8181–8191.
- [38] ZHU Q, WANG B, TAN T. Conversion of ethanol and acetaldehyde to butadiene over MgO-SiO₂ catalysts: effect of reaction parameters and interaction between MgO and SiO₂ on catalytic performance[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2016, 5(1): 722–733.
- [39] CAI D, ZHU Q, CHEN C, et al. Fermentation-pervaporation-catalysis integration process for bio-butadiene production using sweet sorghum juice as feedstock[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2018, 82: 137–143.
- [40] CHEN C, CAI D, QIN P, et al. Bio-plasticizer produc-

- tion by hybrid acetone-butanol-ethanol fermentation with full cell catalysis of *Candida* sp. 99-125[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 257: 217–222.
- [41] CHEN C, CAI D, CHEN H, et al. Simultaneous acetone-butanol-ethanol fermentation, gas stripping, and full-cell-catalyzed esterification for effective production of butyl oleate[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2018, 41(9): 1329–1336.
- [42] CHEN C, CHEN H, SUM G, et al. Oleate esters production by bridging *Clostridium acetobutylicum* fermentation and *Candida* sp. 99-125 full-cell catalysis based on gas stripping-pervaporation unit[J]. *Process Biochemistry*, 2018, 71: 12–17.
- [43] TREICHEL H, OLIVERIA D, MAZUTTI M A, et al. A review on microbial lipases production[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2010, 3(2): 182–196.
- [44] TAN T W, LU J, NIE K, et al. Biodiesel production with immobilized lipase: a review[J]. *Biotechnology Advances*, 2010, 28(5): 628–634.
- [45] CUI C, TAO Y, LI L, et al. Improving the activity and stability of *Yarrowia lipolytica* lipase Lip2 by immobilization on polyethyleneimine-coated polyurethane foam[J]. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 2013, 91: 59–66.
- [46] TAO Y, CHEN G, PAVLIDIS I V, et al. A water-dependent kinetics guide for complex lipase-mediated synthesis of biolubricants in a water activity control reactor[J]. *Catalysis Science & Technology*, 2015, 5(12): 5120–5128.
- [47] CUI C, ZHANG Z, ZENG Q, et al. Insight into the synthesis of isosorbide diester plasticizer using immobilized lipases[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(110): 108180–108186.
- [48] CUI C, ZHEN Y, QU J, et al. Synthesis of biosafe isosorbide dicaprylate ester plasticizer by lipase in a solvent-free system and its sub-chronic toxicity in mice[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(15): 11959–11966.
- [49] YUN H, WANG M, FENG W, et al. Process simulation and energy optimization of the enzyme-catalyzed biodiesel production[J]. *Energy*, 2013, 54: 84–96.
- [50] WANG M, HE M, FANG Y, et al. The Ni-Mo/ γ - Al_2O_3 catalyzed hydrodeoxygenation of FAME to aviation fuel[J]. *Catalysis Communications*, 2017, 100: 237–241.
- [51] WANG M, CHEN M, FANG Y, et al. Highly efficient conversion of plant oil to bio-aviation fuel and valuable chemicals by combination of enzymatic transesterification, olefin cross-metathesis, and hydrotreating[J/OL]. *Bio-technology for Biofuels*, 2018, 11: 30. [2018-08-15]. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1020-4>.
- [52] ZHOU Y, HUANG Y, FANG Y, et al. Selective conversion of castor oil derived ricinoleic acid methyl ester into jet fuel[J]. *Green Chemistry*, 2016, 18(19): 5180–5189.
- [53] 何玉凤, 钱文珍, 王建凤, 等. 废弃生物质材料的高附加值再利用途径综述[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(15): 1–8.
- HE Y F, QIAN W Z, WANG J F, et al. High value-added reutilization approach for waste biomass materials[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(15): 1–8. (in Chinese)
- [54] KOUTINAS A A, VLYSIDIS A, PLEISSNER D, et al. Valorization of industrial waste and by-product streams via fermentation for the production of chemicals and biopolymers[J]. *Chemical Society Reviews*, 2014, 43(8): 2587–2627.
- [55] ZHOU C H, XIA X, LIN C X, et al. Catalytic conversion of lignocellulosic biomass to fine chemicals and fuels[J]. *Chemical Society Reviews*, 2011, 40(11): 5588–5617.
- [56] XIAO G, ZHANG X, SU H, et al. Plate column biosorption of Cu(II) on membrane-type biosorbent (MBS) of penicillium biomass: optimization using statistical design methods[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 143: 490–498.
- [57] 李士坤, 谭天伟. 从青霉菌丝体中提取核糖核酸的研究[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2005, 32(6): 23–26.
- LI S K, TAN T W. Extraction of RNA from waste *Penicillium* biomass[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science)*, 2005, 32(6): 23–26. (in Chinese)
- [58] 孙永巧, 张家祥, 刘建军. 葡萄糖酸钠发酵废弃菌丝体提取壳聚糖的研究[J]. *中国酿造*, 2016, 35(12): 158–162.
- SUN Y Q, ZHANG J X, LIU J J. Extraction of chitosan from wasted mycelium of sodium gluconate fermentation[J]. *China Brewing*, 2016, 35(12): 158–162. (in Chinese)
- [59] 董晔, 杨姿, 贾梦琦, 等. 红曲废菌渣中有效成分的综合提取工艺[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(3): 158–166.
- DONG Y, YANG Z, JIA M Q, et al. The integrated extraction process of effective ingredients from monascus mycelium[J]. *Science and Technology of Food Industry*,

- 2018, 39(3): 158–166. (in Chinese)
- [60] WANG J, CHEN C. Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: a review[J]. *Biotechnology Advances*, 2006, 24(5): 427–451.
- [61] VOLESKY B. Biosorption and me[J]. *Water Research*, 2007, 41(18): 4017–4029.
- [62] WANG T Q, LI H X, WANG M Y, et al. Integrative extraction of ergosterol, (1→3)- α -D-glucan and chitosan from penicillium chrysogenum mycelia[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2007, 15(5): 725–729.
- [63] ZHANG X, SU H, TAN T W, et al. Study of thermodynamics and dynamics of removing Cu (II) by biosorption membrane of penicillium biomass[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 193: 1–9.
- [64] SU H, WANG Z, TAN T W. Adsorption of Ni^{2+} on the surface of molecularly imprinted adsorbent from penicillium chrysogenum mycelium [J]. *Biotechnology Letters*, 2003, 25(12): 949–953.
- [65] SU H, CHEN S, TAN T. Surface active site model for Ni^{2+} adsorption of the surface imprinted adsorbent[J]. *Process Biochemistry*, 2007, 42(4): 612–619.
- [66] JIANG W, SU H, HUO H, et al. Synthesis and properties of surface molecular imprinting adsorbent for removal of Pb^{2+} [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2010, 160(2): 467–476.
- [67] 占金宝, 苏海佳. 青霉菌丝体分子印迹吸附膜对 Cr (III) 的吸附性[J]. *北京化工大学学报 (自然科学版)*, 2010, 37(4): 94–97.
- ZHAN J B, SUN H J. Adsorption of Cr (III) by a membrane molecularly imprinted with Penicillium mycelium [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*, 2010, 37(4): 94–97. (in Chinese)
- [68] LI Q, SU H, TAN T. Synthesis of ion-imprinted chitosan- TiO_2 adsorbent and its multi-functional performances[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2008, 38(2): 212–218.
- [69] CHEN E, SU H, ZHANG W, et al. A novel shape-controlled synthesis of dispersed silver nanoparticles by combined bioaffinity adsorption and TiO_2 photocatalysis[J]. *Powder Technology*, 2011, 212(1): 166–172.
- [70] XIAO G, ZHANG X, ZHANG W, et al. Visible-light-mediated synergistic photocatalytic antimicrobial effects and mechanism of Ag-nanoparticles@ chitosan- TiO_2 organic-inorganic composites for water disinfection[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 170: 255–262.
- [71] XIAO G, SU H, TAN T. Synthesis of core-shell bioaffinity chitosan- TiO_2 composite and its environmental applications[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 283: 888–896.
- [72] AO L, QIN L, KANG H, et al. Preparation, properties and field application of biodegradable and phosphorus-release films based on fermentation residue[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, 82: 134–140.
- [73] SHI L, AO L, KANG H, et al. Evaluation of biodegradable films made of waste mycelium and poly (vinyl alcohol) on the yield of Pak-Choi[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2012, 20(2): 492–500.
- [74] MA Z, MA Y, QIN L, et al. Preparation and characteristics of biodegradable mulching films based on fermentation industry wastes[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, 111: 54–61.
- [75] ZHANG C, SU H, BAEYENS J, et al. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38: 383–392.
- [76] WANG Q, PENG L, SU H. The effect of a buffer function on the semi-continuous anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 139: 43–49.
- [77] ZHANG C, SU H, TAN T. Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid-liquid system[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 145: 10–16.
- [78] ZHANG C, XIAO G, PENG L, et al. The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 129: 170–176.
- [79] SU H J, LIU L, WANG S J, et al. Semi-continuous anaerobic digestion for biogas production: influence of ammonium acetate supplement and structure of the microbial community[J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2015, 8(1): 13.
- [80] WANG S, MA Z, ZHANG T, et al. Optimization and modeling of biohydrogen production by mixed bacterial cultures from raw cassava starch[J]. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2017, 11(1): 100–106.
- [81] WANG S, MA Z, SU H. Two-step continuous hydrogen production by immobilized mixed culture on corn stalk [J]. *Renewable Energy*, 2018, 121: 230–235.
- [82] PENG L, BAO M, WANG Q, et al. The anaerobic digestion of biologically and physicochemically pretreated oily wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 151: 236–243.
- [83] WANG S, PENG L, JIANG Y, et al. Evaluation of a novel split-feeding anaerobic/oxic baffled reactor (A/OBR) for foodwaste anaerobic digestate: performance, modeling

and bacterial community[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 34640.

[84] PENG L, APPELS L, SU H. Combining microwave irradiation with sodium citrate addition improves the pre-

treatment on anaerobic digestion of excess sewage sludge [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 213: 271-278.

Green bio-manufacturing

TAN TianWei SU HaiJia CHEN BiQiang WANG Meng CAI Di XIAO Gang CUI ZiHeng

(National Energy Biorefinery Research and Development Center, College of Life Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The concepts of bio-economy and green bio-manufacturing and the relationship between them are introduced. The development status and trends in bio-manufacturing in different countries are analyzed and discussed. The urgent needs of China's economic and social development for green bio-manufacturing are discussed in the light of China's national conditions. We demonstrate that green bio-manufacturing will play an important role in future economic and social development. This article focuses on the preparation of ethanol and butanol from biomass, use of biorefineries to prepare fuels and plasticizers and high valuebiomass resources, and we describe some of the achievements of researchers in the National Energy Biorefinery Research and Development Center in Beijing University of Chemical Technology in these areas.

Key words: Bio-economy; green bio-manufacturing; biomass; ethanol; butanol; bio-liquid fuel; plasticizer; high value utilization

(责任编辑:汪 琴)

团队简介



团队负责人:谭天伟院士

国家能源生物炼制研发中心由国家能源局批准设立,致力于从非粮生物质资源出发制备液体燃料及重要化学品,为降低能源结构中化石资源比例及 CO₂ 减排提供技术支撑。研发中心拥有优秀的科研团队,包括中国工程院院士 1 人,长江学者 1 人,杰出青年基金获得者 2 人,新世纪人才 3 人,教授 15 人,海外兼职教授和特聘专家 10 人。

中心在生物质转化制备生物能源、生物基化学品、生物材料等技术研究领域取得诸多研究成果,并在 *Angewandte Chemie International Edition*、*PNAS*、*Biotechnology Advances*, *Chemical Science*、*Green Chemistry*、*ACS Catalysis* 等国际知名期刊上发表 300 多篇论文,获得国家技术发明二等奖两项、省部级技术发明和科技进步一等奖 5 项。团队以秸秆、木薯、米糠、废弃油脂等非粮生物质为原料,建立了利用生物炼

制生产丁醇、乙醇、生物液体燃料、生物基增塑剂等具有重大战略意义的大宗化学品的创新路线及产业示范,并在低值生物质资源高值化方面取得多项重大突破,对我国经济、社会发展具有重大意义。