

我国生物燃料乙醇产业新进展*

林海龙, 林 鑫, 岳国君[†]

(国投生物科技投资有限公司, 北京 100034)

摘 要: 燃料乙醇产业发展近 20 年来, 为支持国家三农事业、改善大气环境、减少原油进口做出多重贡献。近年来, 在国家政策推动下, 我国生物燃料乙醇产业引起各界高度关注。产业链相关的生产企业、科研机构、石化和汽车行业等从不同视角做了大量实践和研究。本文从生物燃料乙醇技术进步、炼油产业的关联效应、对汽车行业的影响三方面进行概述, 分析当前发展生物燃料乙醇产业呈现的新趋势。技术进步方面, 从研究到生产实际, 已更多地着眼于开发多种原料灵活加工的方式, 构建新的产品结构, 并采用技术手段降低过程能耗、发掘净能量提升空间、降低生产成本, 开辟纤维素乙醇技术的新途径; 此外, 在产品转化率的科学评价方式、建立可持续综合效益评估模型以及设计新型对称双阴极结构解决乙醇燃料电池稳定性问题有更深入的研究。炼油产业关联效应方面, 大量研究分析了油品升级、乙醇的加入对尾气污染物排放的影响; 而燃料乙醇对炼油行业的影响涉及油库的改造、对组分油品质的要求、产品结构优化等诸多层面。汽车行业对新燃料系统的关注度也在不断提高, 在乙醇汽油的燃烧效率、喷射策略和非常规污染物排放控制等方面有新的方案和比较。整体产业链的研发活力不断加强, 正带动产业向着高质量方向发展。

关键词: 生物燃料乙醇; 产业链; 乙醇汽油; 技术进步; 发展趋势

中图分类号: TK6; U473.1+4 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2020.03.001

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



New Advances in China's Biofuel Ethanol Industry

LIN Hai-long, LIN Xin, YUE Guo-jun

(SDIC Biotech Investment Co. Ltd., Beijing 100034, China)

Abstract: Over the past two decades, the development of fuel ethanol industry has made multiple contributions supporting the national agriculture, rural areas and farmers, improving atmospheric environment and reducing crude oil imports. In recent years, under the promotion of national policies, China's biofuel ethanol industry has attracted great attention from related circles. Production enterprises, scientific research institutions, petrochemical and automobile industries related to the industrial chain have done a lot of practice and research from respective perspectives. This paper summarizes the technical progress of biofuel ethanol, the correlation effect of oil refining industry and the influence on gasoline vehicle industry, and analyzes the emerging trends in the development of biofuel ethanol industry. In terms of technical progress, from research to production practice, more attention has been paid to the development of flexible processing methods for various raw materials, construction of new product structures, and adoption of technical approaches to reduce process energy consumption, explore potential for net energy increase, as well as cost reduction. New approaches of cellulosic ethanol technology have been explored. In addition, there are more in-depth researches on the scientific evaluation of product conversion rate, the establishment of a sustainable comprehensive benefit evaluation model, and the new design of symmetrical double cathode structure to solve the stability problem of ethanol fuel cells. As for the correlation effect of the refining industry, a large number of studies have analyzed the impact of oil upgrading and the addition of ethanol on exhaust pollutants. However, the impact of fuel ethanol on the refining industry involves many aspects such as the renovation of oil depots, the quality requirements for blend oil, product structure optimization, etc. The attention of the automobile industry to the new fuel system is also continuously increasing, and there are new schemes and comparisons in the combustion efficiency of ethanol gasoline, injection strategy and unconventional pollutant emission control. The research and development vitality of the overall industrial chain has been continuously strengthened, which is driving the industry towards high-quality development.

Key words: biofuel ethanol; industrial chain; ethanol gasoline; technical progress; development trends

* 收稿日期: 2020-03-05 修订日期: 2020-05-06
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB1501700)
[†] 通信作者: 岳国君, E-mail: yueguojun@sdic.com.cn

0 引 言

我国自 2002 年开始推广车用乙醇汽油以来,在不到 20 年时间内,诞生了生物燃料乙醇这一绿色新兴产业。

我国历年燃料乙醇产量如表 1 所示。截至 2019 年底,累计生产了 2 841 万吨生物燃料乙醇产品,消化以陈化粮为主的原料约 9 200 万吨,联产各类高蛋白饲料、油脂等产品约 2 800 万吨,调和出约 2.7 亿吨车用乙醇汽油,替代原油约 8 600 万吨。燃料乙醇产业为支持国家三农事业、改善大气环境、减少原油进口做出多重贡献。

表 1 中国燃料乙醇历年产量

Table 1 Historic China fuel ethanol production

年度	产量 / 万吨
2002	3
2003	6
2004	21
2005	77
2006	133
2007	145
2008	166
2009	172
2010	181
2011	190
2012	207
2013	220
2014	227
2015	217
2016	202
2017	185
2018	205
2019	284

注:数据来自国家能源局行业统计。

2002 年到 2012 年期间,国内燃料乙醇行业发展迅速,年产量从 3 万吨增长到 207 万吨,而后的产量增长一直未如人意,产业发展遇到瓶颈。2017 年 9 月,《关于扩大生物燃料乙醇生产和推广使用车用乙醇汽油的实施方案》发布,提出 2020 年全国范围推广车用乙醇汽油,基本实现全覆盖;2018 年 8 月国务院常务会议又确定了《全国生物燃料乙醇产业总体布局方案》,为产业发展带来新契机。

两个“方案”的发布和落实正在推动我国生物燃料乙醇产业发展步入一个新阶段,这也引起产业链相关的生产企业、科研机构、石化和汽车等行业的高度关注,做了大量实践和研究,从不同视角探

讨新阶段下生物燃料乙醇行业带来的影响及发展趋势。本文尝试从技术进步、与炼油产业的关联效应、对汽车行业的影响三个交汇点进行概述和分析。

1 生物燃料乙醇技术进步

1.1 利用多种原料生产燃料乙醇

近年来,伴随着陈化粮库存量逐年攀升,除使用玉米、木薯为原料生产燃料乙醇外,生物燃料乙醇行业更多地开始开发多种原料灵活加工的方式,逐步将大量陈化水稻、陈化小麦等用于生产。而使用目前粮食原料中未被利用的纤维成分(如玉米种皮)、秸秆等木质纤维素类生物质作为原料,仍是研发的关注重点。这涉及原料配比、加工方式调整、产品结构重构等问题。

小麦原料中蛋白质约占小麦粒的 14%,其中麦胶蛋白、麦谷蛋白等这些面筋的成分约占到总蛋白含量的 80%。组成的不同会带来工艺上的一些问题,如原料质量波动带来生产波动、高浓度蛋白造成发酵醪液产泡沫严重,影响生产效率等,研究发现可通过原料精制、严控指标、品质分级、提高蛋白提取率的方式进行解决^[1]。

除使用多元化单一原料外,多种原料配合使用也是一个方向。原料预处理在混合原料的使用中非常关键。不同的原料处理方式可能有很大差异,而稳定配比的混合原料是保证生产稳定的基本要素。更换原料后需要对生产有系统性的优化,包括预处理效果、对不同成分和杂质的分离程度、辅料添加品种及加量等,才能真正实现生产效率的提高和过程的节能减排^[2]。在燃料乙醇生产的辅料中,酶制剂的成本占比最大,也是产品转化率的决定因素之一。采用多种淀粉质原料后,原料中淀粉、蛋白、纤维等的组分会有较大变化,需要对酶制剂的配比和种类做相应调整。这些新的成分变化可能涉及直链和支链淀粉比例的不同、蛋白种类或含量的变化、纤维素或非淀粉多糖类别或含量的差异等。刘燕^[3]对相关的酶制剂在玉米、木薯、小麦三种原料进行了配比研究,发现酸性蛋白酶、普鲁兰酶、木聚糖酶、纤维素酶、植酸酶对三种原料发酵转化率有不同的促进作用,而添加点可能在酒母。

张先楚等^[4]选取大米生料发酵过程中的粉碎粒度、配料浓度、酶制剂加量、酵母接种量、营养盐添加量等为主要因素,以发酵成熟乙醇含量为评

价指标,得到工艺优化条件;孙振江等^[5]对小麦为原料的工艺条件进行了类似的优化探索。混合原料,如陈化水稻、脱壳大米及木薯等的配比也需要优化以达到最好的发酵效率,其中的影响因素可能还涉及水稻是否脱壳、配料固形物含量、装置设备的实际运行能力等^[6]。

联产品方面,有工厂已开发出全水稻干酒糟饲料和玉米/水稻混合干酒糟饲料。在功能上,玉米干酒糟饲料适用于家畜,水稻干酒糟适用于家禽。若改水稻作原料,对联产的混合干酒糟饲料需要开发新的饲料市场。联产大米蛋白、米糠油及稻壳综合利用等研究也受到重视^[7]。

使用多种原料可以灵活应对市场变化,为企业带来更大效益。罗虎等^[8]对全水稻发酵生产食用酒精及副产品进行了分析,较玉米原料降低约17%的总生产成本。净能量分析是经济测算之外对环境效益的一种评价方式。研究表明,装置的净能量消耗为11.99 MJ/L(以1 L乙醇计),其中乙醇转化环节的能量投入占总能量投入的44.73%,而精馏消耗的蒸汽占乙醇转化环节蒸汽消耗的83.24%。副产品提供的能量可补偿17.68 MJ/L(以1 L乙醇计)^[9]。可见,原料的综合利用以及精馏工序的节能改造是更换原料后提高能源利用效率的重要措施。

对于木质纤维素乙醇技术的开发,我国已进行了二十余年的工业探索。大多研究采用汽爆预处理、酶解-发酵的生物化学方法制备,但预处理效率及收率、酶制剂效率、抑制物毒性等关键问题至今尚没有成功的商业化方案,技术经济性受到严峻挑战。LIU等^[10]另辟蹊径,通过化学催化路线来进行纤维素向乙醇的转化,通过使用精确调控的Ni@C和磷酸催化剂,可实现纤维素在水相体系一步氢解转化为乙醇,收率达69%,乙醇质量浓度达到8.9%,为高效、低成本纤维素乙醇的工业化生产带来希望。此外,如何将现有粮食原料中的纤维素转化为乙醇也是未来发展方向之一。李冬敏等^[11]的研究表明,相比秸秆等木质纤维素原料,玉米籽粒纤维从原料的可获得性、工艺难易程度、灵活嵌入、成本等方面具有明显优势。

1.2 工艺优化及节能降耗

产品转化率的科学评价方式是高效对比生产条件变化带来的效益变化的基础。叶俊芳等^[12]在实验室条件下模拟干法研磨工艺的研究结果,对玉米乙

醇发酵指标评价得到更深入的理解。研究测定了59份玉米样品生产燃料乙醇的发酵特性,比较分析以淀粉含量和以完全水解淀粉(complete hydrolyzed starch, CHS)含量作为玉米乙醇发酵评价指标的合理性。CHS排除了不能被液化酶及糖化酶水解的淀粉部分。结果发现,虽然玉米样品的淀粉含量与乙醇产量呈极显著正相关,但仅能解释81%的乙醇产量差异,而CHS含量与乙醇产量之间的决定系数为0.9096,表明使用CHS含量预测乙醇产量比淀粉含量更可靠。采用激光扫描共聚焦显微镜(confocal laser scanning microscope, CLSM)对液糖化后玉米样品中蛋白质的微观结构进行观察,蛋白质在此过程形成高度交联的网络结构,并且交联程度越高,淀粉乙醇转化效率越低。对高粱样品的现有研究表明,液糖化后高度交联的蛋白网络包裹着小部分淀粉,限制了酶对淀粉的水解及后续转化。

许多研究在关注提升发酵效率、降低精馏和醪液处理工序的能耗。发酵作为燃料乙醇工厂的核心单元,如何在保证发酵效率,即原料单耗的同时提升成熟醪的乙醇浓度始终是实现节能降耗的重要目标之一。许多研究对浓醪发酵^[13]、超高浓醪发酵^[14]及生料发酵^[15-16]进行了探索,从原料处理开始,到酵母品种选育、酒母及发酵条件优化都变化参数,涉及全流程的优化。而若已建成装置,则会受到设备及公用工程等硬件条件的约束。我国在近年新建或扩建装置中,间歇发酵普遍的发醇浓度已经可以稳定达到15%~16%,但距离超高浓醪发酵(>17%)还有一定距离。在产品分离和干燥方面,有研究对比了使用分子筛膜进行乙醇分离的技术经济可行性^[17-18],具有一定的应用前景。而对醪液分离、干燥方面,通过调整离心机运行参数、将干燥二次蒸汽耦合再利用、热风输送管道的合理改造等方式,可以取得明显的节能效果^[19]。

1.3 经济、社会、环境效益

生物质燃料乙醇的可持续性研究一直是各界关注的重要课题,其生产和使用产生显著社会经济和环境影响,其中对国家粮食安全的影响最受关注,此外,还包括温室气体排放、自然资源消耗等影响。近期对生物燃料乙醇效益的研究已从经济贡献、环境评价、能效分析三大方面,扩展到综合可持续性研究。从生物燃料乙醇的全生命周期进行可持续性分析,不仅有助于预防和减少环境污染,而且还有

助于提高产品功能质量,对研究产业发展方向及政策制定具有参考意义。近期开展的全生命周期可持续性研究中,在通常包括环境影响、经济效益和社会影响的评价框架基础上,增加了能源效益和资源利用两个维度,建立的评价模型结果显示,玉米燃料乙醇在我国主流价值观下的可持续性较好^[20]。

1.4 乙醇燃料电池

乙醇燃料电池是乙醇新应用的一个国际前沿课题。国内也有研究报道了乙醇在新型对称双阴极结构固体氧化物燃料电池中直接内重整反应的研究进展^[21]。结果显示,将乙醇以一定的水醇比通入到电池中,在输出功率密度为 $0.137 \text{ W/cm}^2@0.8\text{V}$ 下,运行超过 100 h 依然保持稳定,电池内部发生轻微的积碳现象,表明该新型结构电池可进行碳基燃料直接内重整运行,具有较好的应用前景。

2 炼油产业的关联效应

两个“方案”的逐步实施,带动燃料乙醇产业链相关的炼油产业对乙醇汽油推广的影响进行深入的研究。中国石油、中国石化等企业高度关注我国乙醇汽油的发展,对未来发展趋势、影响及企业对策进行多层次分析^[22-23]。

这些研究和分析均肯定乙醇汽油的推广应用符合世界能源发展趋势,是突破能源和环境约束、有效增加清洁能源供给、解决三农问题、实现经济社会可持续发展的战略性举措。

在此基础上,研究分析了油品升级、乙醇的加入对尾气污染物排放的影响。此外,燃料乙醇对炼油行业的影响还涉及油库的改造、对组分油的品质要求、产品结构优化等诸多方面。

2.1 排放标准升级加速

从 2010 年 1 月 1 日,开始执行国 III 标准,升级速度加快,到 2019 年 1 月 1 日起,全面供应国 VIa 标准车用汽油(含 E10 乙醇汽油),在不到 10 年的时间内,连续跃升四个台阶。其中,生物燃料乙醇起了积极作用。

众所周知,燃料乙醇是不含烯烃和芳烃的含氧辛烷值增加剂。加入汽油后产生稀释作用,而使乙醇汽油中烯烃和芳烃含量降低。燃料乙醇辛烷值高,与普通汽油相比,可减少有毒物质(如苯和 1,3-丁二烯)和 PM_{2.5} 的排放^[24]。

刘菊荣等^[25]介绍了我国车用汽油质量标准升级过程中关键指标的改进趋势,提出我国生产国 VI 车用汽油的建议与未来汽油质量标准的发展方向。

2.2 甲基叔丁基醚快速发展

甲基叔丁基醚(methyl tertiary butyl ether, MTBE)是汽油重要的增氧剂和辛烷值添加剂,其装置投资相对较少,行业准入门槛较低,市场投资热情高涨。我国 MTBE 的生产能力由 2015 年的 1 680.5 万吨/年快速增加至 2019 年的 2 205.0 万吨/年^[26]。

然而,MTBE 对环境有不利影响,主要由于其可溶于水,长距离迁移污染面积大,可能影响地下水源。添加 MTBE 引起的环境问题,国外早已关注^[27-28]。进入 21 世纪初,美国将 MTBE 认定为有害污染物,将乙醇作为替代,在实施可再生燃料标准(renewable fuel standard, RFS)中 E10 乙醇汽油推广计划后,炼油企业已采取措施,转产如异辛烷等其他产品^[29]。我国从 2002 年开始逐步推广 E10,在添加乙醇的汽油中禁止 MTBE 等高辛烷值含氧化合物的使用。

令人鼓舞的是,国内高度重视 MTBE 转产,提出一些可行的解决办法,例如利用闲置 MTBE 装置改造生产乙基叔丁基醚(ethyl tertiary butyl ether, ETBE)、异丁烯或异辛烷^[30-31]。

2.3 油品销售企业油库改造

针对我国全面推广使用乙醇汽油,油品销售企业大量油库储运设施需要改造的状况,程琪^[32]结合近年来油库乙醇汽油储运设施改造的实际,依据相关设计规范和此前多年油库改造的经验,对增加乙醇汽油储运设施后油库改造的平面布置、汽油储存、接卸发油等设施改造、油品质量以及安全环保管理等进行了分析,提出了相应的建议。

2.4 对炼油业的综合影响

实施乙醇汽油将会使我国汽油池结构发生一定的变化。MTBE 组分将无法继续加入汽油当中,辛烷值和蒸气压调节手段减少;10%乙醇加入国 VI 汽油组分中会导致产品蒸气压增加 7 kPa 左右,炼厂所产调合组分油蒸气压限值范围缩窄^[33]。王天潇等^[34]应用 ASPEN PIMS 软件,选取两家汽油池结构不同的炼油企业开展乙醇汽油调合组分油生产测算分析。结果表明,全面生产乙醇组分油将会影响部分炼油企业的汽油总量、高标号比例、加工流程等方面,这与各企业所用调合组分油的组成相关。为确保乙醇汽油供应,炼油企业必须做好推广应对工作、

优化国VI组分油生产方案、合理配置烷基化油等生产资源。

另外，曹国庆等^[35]综合分析了乙醇汽油推广政策对中国炼油行业汽油市场、汽油质量升级、现有装置产能利用、炼厂全流程加工等方面的重大影响。结合国内宏观经济发展新常态以及我国炼油行业面临的诸多挑战，为统筹炼油行业提质增效升级和转型发展，实现乙醇汽油推广的预期目标，提出了炼厂在产品结构优化调整、适度投入兼顾乙醇汽油和国VI油品升级、存量资产最大化利用的应对措施和相关行业建议。

除燃料乙醇外，其他替代液体燃料也会对国内车用成品油市场产生影响。罗艳托等^[23]分析测算了生物质液体燃料（燃料乙醇、生物柴油）、电动和氢能、煤基液体燃料（煤制油、燃料甲醇）、车用燃气（CNG、LNG和LPG）4类车用替代燃料带来的影响，预计替代总量在2020年将达到6500万吨左右，占全国汽油、柴油消费量的20%以上，其中燃料乙醇将显著增长。由此带来的关联效应还会包括国内柴油、汽油的消费比例等。

3 对汽车行业的影响

在车用乙醇汽油推广之初，国家有关部门即组织了行车试验，随着我国环保法规的加速严格，当前排放法规已由国III进入实施国VIa阶段。为了提高燃料效率和有效控制排放，小型化、大压缩比和新喷油策略等技术成熟度不断提高并得到广泛应用。同时，汽车行业对新燃料系统关注度提高，在乙醇汽油的燃烧效率、喷射策略和排放控制等方面取得新的研究成果。

3.1 E10乙醇汽油优化燃烧和排放控制的研究更加深入

马亚勤^[36]应用仿真计算数据库、发动机仿真建模和汽油机台架试验等方法，研究了乙醇含量、扭矩以及HC、NO_x和CO等污染物排放的影响关系，为进一步完善乙醇汽油混合燃料在汽油机上的综合性能研究提供了一定的参考。

为了提高汽油机的燃料效率，增压缸内直喷技术已成为一种发展趋势，技术逐步成熟并得到广泛应用。李瑞晨等^[37]在研究乙醇汽油在增压直喷发动机中引发低速早燃现象和超级爆震的规律时，建立了针对不同乙醇掺混比例的爆震强度计算模型。以

小缸径增压直喷发动机为研究对象，建立了用于数值解析的几何模型与网格模型。通过解析不同发动机转速（1200 r/min、1600 r/min）和乙醇掺混比例（E0、E10、E20、E30、E50、E85）下，由缸内机油液滴引发低速早燃及爆震的过程，发现提高乙醇掺混比例可明显降低早燃和爆震的发生概率。

吴涛阳等^[38]建立了燃料特性影响汽油机颗粒物排放的新模型，提出了简化PN指数（SPNI）概念。该指数包括T70（70%蒸馏温度）、重芳烃（碳数≥9）含量、终馏点温度和烯烃含量4个关键的燃料参数。通过对20种模型燃料进行统计学检验和发动机试验，结果表明，发动机实际颗粒物数量（particulate number, PN）排放均与SPNI呈现高度的相关性。与详细颗粒物（particulate matter, PM）指数相比，新模型计算更简便，可操作性强，可用于工程上评价不同汽油燃料的颗粒物排放潜势。

3.2 双燃料、双喷射系统

为充分发挥乙醇汽油的优势，研究人员对乙醇汽油双燃料双喷射系统发动机进行了研究。双喷射系统结合了进气道喷射（port fuel injection, PFI）和缸内直喷（direct injection, DI）两种喷射方式的优势，为优化燃烧过程，提高燃油经济性，降低微粒排放提供了可能。

迟昊^[39]利用计算流体力学（computational fluid dynamics, CFD）三维数值模拟软件，模拟乙醇缸内直喷+汽油进气道喷射（ethanol direct injection + gasoline port injection, EDI+GPI）双燃料发动机的工作过程，分析比较了不同乙醇喷射正时下缸内流场的变化规律、缸内当量比分布和缸内压力变化。结果表明，乙醇喷射时刻在250°CA BTDC时，缸内流场最合适乙醇的蒸发雾化，能够形成较均匀的缸内混合气，产生最佳的燃烧相位。

此外，王玉凤等^[40]研究对比了进气道喷射乙醇+缸内直喷汽油（ethanol port injection + gasoline direct injection, EPI+GDI）和EDI+GPI两种燃烧模式在乙醇浓度增加条件下的性能变化。在所有转速下，纯乙醇燃烧具有最低QE值（燃油能量消耗基础上的油耗）。在EDI+GPI燃烧模式下，QE最低值为241 g/(kW·h)。赵乐文^[41]详细报道了这两种燃烧模式的燃油经济性、气态常规排放物和微粒排放特性。结果表明，比油耗 b_{ESFC} 随着乙醇比例的增加而降低；EDI+GPI燃烧模式比EPI+GDI节油效果更明显；乙

醇汽油双燃料双喷射系统可大幅度降低微粒排放。

3.3 非常规污染物排放的研究引起重视

近些年,对总烃含量(total hydrocarbon content, THC)、CO、NO_x和颗粒物等常规污染物的研究广受关注,而对醇、醛、不饱和烃等非常规污染物研究也逐渐受到重视^[24]。

4 总结与展望

近几年来,炼油、汽车等相关企业与燃料乙醇企业共同努力落实两个“方案”,取得初步成效。据粗略统计,2019年我国生物燃料乙醇产量达284万吨,较上年增长31.5%。

由于燃料乙醇产业在经济、社会、环境中的多重贡献,政策上得到有力支持,产业持续受到各方关注,整体产业链的研发活力不断加强,正带动产业向着高质量方向发展。

燃料乙醇企业正通过从开发灵活原料加工方式、采用技术手段降低过程能耗、发掘净能量提升空间、开辟纤维素乙醇技术的新途径,不断提升内生活力。炼油产业在积极应对燃料乙醇使用带来的多种变化,从基础设施建设到产品结构优化做了大量细致研究和实践工作。汽车行业也在不断关注引进使用燃料乙醇的新燃料系统,积极设计高效、环保方案,而乙醇燃料电池的开发应用也在不断取得新成果。另外,从全产业链角度出发,各界还在不断探索有效衔接生物燃料生产和销售的方式^[42-45]。

2020年7月1日我国将全面实施国VIa标准,为发展生物燃料乙醇进一步增添了良好的产业发展氛围。相信在产业链各环节的继续通力研究、实践中,燃料乙醇产业将为农业发展、空气污染治理、降低石油对外依存度等方面发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 韩家林. 淀粉质燃料乙醇发酵的原料精制与工艺优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [2] 陈鑫. 淀粉质原料发酵预处理工艺应用优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [3] 刘燕. 混合原料燃料乙醇生产中复合酶制剂的应用研究[D]. 南阳: 南阳师范学院, 2019.
- [4] 张先楚, 夏敏, 丁朋举, 等. 大米生料发酵产乙醇工艺条件优化[J]. 中国酿造, 2019, 38(12): 130-134. DOI: 10.11882/j.issn.0254-5071.2019.12.026.
- [5] 孙振江, 佟毅, 梁坤国, 等. 小麦发酵产酒精及酒糟蛋
- [6] 白饲料工艺的研究[J]. 中国酿造, 2019, 38(6): 140-143. DOI: 10.11882/j.issn.0254-5071.2019.06.027.
- [7] 黄锦, 李永恒, 王康, 等. 不同淀粉质原料发酵生产燃料乙醇[J]. 酿酒, 2019, 46(6): 59-62. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8110.2019.06.021.
- [8] 刘晓峰. 陈水稻燃料乙醇生产技术进展[J]. 生物加工过程, 2019, 17(5): 509-513. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3678.2019.05.011.
- [9] 罗虎, 梁坤国, 孙振江, 等. 全水稻发酵生产食用酒精工艺研究[J]. 中国酿造, 2018, 37(3): 107-110. DOI: 10.11882/j.issn.0254-5071.2018.03.022.
- [10] 王康, 潘忠, 李永恒, 等. 陈化水稻燃料乙醇全生命周期净能量分析[J]. 生物加工过程, 2019, 17(4): 359-364. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3678.2019.04.005.
- [11] LIU Q Y, WANG H Y, XIN H S, et al. Selective cellulose hydrogenolysis to ethanol using Ni@C combined with phosphoric acid catalysts[J]. ChemSusChem, 2019, 12(17): 3977-3987. DOI: 10.1002/cssc.201901110.
- [12] 李冬敏, 沈乃东, 冯鹏, 等. 玉米纤维乙醇技术研究进展与应用现状[J]. 生物产业技术, 2019(1): 95-101.
- [13] 叶俊芳, 赵仁勇. 玉米生产燃料乙醇的发酵品质评价[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(06): 47-52. DOI: 10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2019.06.008.
- [14] 郑丽曼. 浓醪发酵在酒精生产中的应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [15] 韩翠波. 玉米原料超高浓度酒精发酵[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(12): 192-193. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6490.2018.12.170.
- [16] 林鑫, 何太波, 佟毅. 生料淀粉制乙醇研究及产业化进展[J]. 当代化工, 2018, 47(3): 544-547, 551. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0460.2018.03.027.
- [17] 俞建良, 熊强, 张永新, 等. 燃料乙醇生料发酵技术现状[J]. 酿酒科技, 2019(10): 84-90. DOI: 10.13746/j.njkj.2019120.
- [18] 李贝贝, 林鑫, 林海龙, 等. 分子筛膜在生物燃料乙醇生产中的应用[J]. 生物产业技术, 2018(4): 45-55. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0319.2018.04.007.
- [19] 余从立, 郭海超, 纪祖焕. 透水性分子筛膜在生物燃料乙醇生产中应用的经济性分析[J]. 现代化工, 2019, 39(9): 192-194. DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.09.041.
- [20] 孙喜庆. 燃料乙醇生产中醪液处理环节的节能降耗研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [21] 刘恒. 生物质燃料乙醇生命周期可持续性评价研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [22] 汝艳雷, 王建新, 李卓斌, 等. 基于对称双阴极结构固体氧化物燃料电池乙醇燃料内重整的电化学性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(3): 442-446. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20190371.
- [23] 阳国军. 燃料乙醇发展趋势及我国石油化工企业对策研究[J]. 酿酒科技, 2019(11): 60-64. DOI: 10.13746/j.njkj.2019178.
- [24] 罗艳托, 仇玄. 各种车用替代燃料影响下的国内成品油市场[J]. 石油商技, 2019, 37(1): 48-55. DOI:

- 10.3969/j.issn.1006-1479.2019.01.008.
- [24] 瞿国凡, 姚春德, 吴涛阳, 等. 乙醇汽油与普通汽油非常规污染物排放特性对比研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(1): 111-118. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0361.
- [25] 刘菊荣, 宋绍富. 我国车用汽油质量标准升级特征与国VI汽油生产对策[J]. 石油化工应用, 2018, 37(12): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5285.2018.12.001.
- [26] 谭捷. 我国甲基叔丁基醚的市场分析[J]. 精细与专用化学品, 2019, 27(12): 13-15. DOI: 10.19482/j.cn11-3237.2019.12.04.
- [27] 朱春雷. MTBE 技术及发展前景[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(4): 82. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6490.2018.04.079.
- [28] 韩伊琳. 电芬顿法处理甲基叔丁基醚污染水的效能及条件探究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [29] 饶兴鹤. 加拿大成功完成 MTBE 改产异辛烷工业装置[J]. 炼油技术与工程, 2003(11): 34.
- [30] 王鹏成. 乙醇汽油来袭, 异丁烯下游路在何方[J]. 化工管理, 2019(35): 4-5.
- [31] 雷建彬. 甲基叔丁基醚装置的发展方向探讨[J]. 化工管理, 2018(20): 1-2. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2018.20.001.
- [32] 程琪. 油品销售企业乙醇汽油油库改造的分析与建议[J]. 石油库与加油站, 2019, 28(3): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2263.2019.03.002.
- [33] 韩璐. 乙醇汽油实施对汽油池影响以及应对措施[C]//西安石油大学, 陕西省石油学会, 北京振威展览有限公司. 2019 国际石油石化技术会议论文集. 北京: 西安华线网络信息服务有限公司, 2019: 149-157.
- [34] 王天潇, 刘灵丽, 王华, 等. 全面推广使用车用乙醇汽油对炼油企业汽油生产的影响[J]. 当代石油石化, 2019, 27(1): 32-37. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6809.2019.01.006.
- [35] 曹国庆, 曹东学, 黄顺贤. 乙醇汽油推广政策分析及炼厂应对建议[J]. 石油石化绿色低碳, 2019, 4(3): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0942.2019.03.001.
- [36] 马亚勤. 乙醇汽油混合燃料发动机性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [37] 李瑞晨. 乙醇—汽油混合燃料增压直喷发动机早燃现象及爆震过程机理的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- [38] 吴涛阳, 姚安仁, 王辉, 等. 基于燃料特性的汽油机颗粒物排放预测关系式[J]. 环境科学学报, 2020, 40(1): 102-110. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0304.
- [39] 迟昊. 喷射时刻对乙醇/汽油双燃料发动机缸内流场和性能的影响[J]. 南方农机, 2019, 50(13): 108-110. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3872.2019.13.083.
- [40] 王玉凤. 转速对乙醇汽油双燃料喷射系统油耗和排放物的影响[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2019, 48(1): 74-77. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0630.2019.01.016.
- [41] 赵乐文. 乙醇汽油双燃料双喷射系统发动机经济性和排放特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [42] 康利平, EARLEY R, 安锋, 等. 美国可再生燃料标准实施机制与市场跟踪[J]. 生物工程学报, 2013, 29(3): 265-273. DOI: 10.13345/j.cjb.2013.03.001.
- [43] 安林红. RINs 简介及对炼油商的影响[J]. 当代石油石化, 2013, 21(10): 16-21. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6809.2013.10.004.
- [44] 康利平, 崔璨. 美国可再生燃料标准实施与市场发展 2018[R]. 北京: 能源与交通创新中心, 2018.
- [45] 林鑫, 林海龙, 岳国君. 衔接生物燃料产销的有效机制——RINs 码[J]. 化工进展, 2019, 38(8): 3621-3630. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2018-2489.

作者简介:

林海龙(1976-), 男, 博士, 高级工程师, 总工程师, 主要从事生物能源与化工方面的研究。

岳国君(1963-), 男, 博士, 中国工程院院士, 首席科学家, 主要从事生物能源与化工方面的研究。