



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Green Industrial Processes—Feature Article

## 有机固液废弃物生物炼制的突破性技术

Paul Chen<sup>a</sup>, Erik Anderson<sup>a</sup>, Min Addy<sup>a</sup>, Renchuan Zhang<sup>a</sup>, Yanling Cheng<sup>a</sup>, Peng Peng<sup>a</sup>, Yiwei Maa, Liangliang Fan<sup>a</sup>, Yaning Zhang<sup>a</sup>, Qian Lu<sup>a</sup>, Shiyu Liu<sup>a</sup>, Nan Zhou<sup>a</sup>, Xiangyuan Deng<sup>a</sup>, Wenguang Zhou<sup>a</sup>, Muhammad Omar<sup>a</sup>, Richard Griffith<sup>a</sup>, Faryal Kabir<sup>a</sup>, Hanwu Lei<sup>a</sup>, Yunpu Wang<sup>b</sup>, Yuhuan Liu<sup>b</sup>, Roger Ruan<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup> Center for Biorefining and Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, St. Paul, MN 55108, USA

<sup>b</sup> MOE Biomass Engineering Research Center, Nanchang University, Nanchang 330047, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 11 December 2017

Revised 20 April 2018

Accepted 26 April 2018

Available online 20 July 2018

#### 关键词

城市固体废物  
城市废水  
热解  
气化  
厌氧消化  
微藻  
生物柴油  
生物炼制

### 摘要

有机固液废弃物包含大量能量、养分和水分，不应仅视其为废物。数十年来，人们一直对城市固体废物进行回收、堆制和燃烧，并从中提取能量和有价值的物质。污水的首要管理策略是治理和排放。随着技术的进步，通过新方法使利用固体废物和废水成为可能。考虑到废物特殊的化学、物理和生物性质，需要整合多种技术以使废物的能量和价值回收最大化。为此，生物炼制是完全利用废物中的能量和价值的一个合适的方法。研究证明，不可回收废弃物和生物固体可通过不同方法转化为可利用的热能、电能、燃料和化学品，并且液体废物能帮助农作物和藻类的成长，为能量回收和食物生产提供不同的选择。本文针对有机固液废弃物提出新型生物炼制方案，这些废物来源于城市废料、食品和生物加工厂以及动物生产设施。四大新型突破性科技——真空辅助高温厌氧消化、扩展鱼菜共生系统、含油废物经甘油裂解制取生物柴油和微波辅助热化学转化，均可运用于生物炼制方案中，从而成功将废物转化，用以生产化学品、化肥、能量（沼气、合成气、生物柴油和生物油）、食物、饲料，得到干净的水并显著减少污染物的排放。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

全球范围内，家庭、商业、工业、建筑和农业每年产生大量固液废弃物。每年全球的城市固体废物（MSW）超过 $2 \times 10^9$  t。发达国家人均产生的MSW是发展中国家的五倍多。然而，作为最大的发展中国家，仅中国就产生了超过 $2 \times 10^8$  t MSW，该数值超过全球总额的10%。如果处理不得当，MSW会对环境产生巨大的威胁。目前，垃圾堆肥、填埋和焚烧是处理不可回收

MSW的主要方法。中国的不可回收MSW的处理方法主要是填埋（65.5%）和焚烧（32.5%）[1]，且两者都有可能造成意想不到的地下水污染[2]和空气污染[3]。

中国在2012年产生 $6.85 \times 10^{10}$  t 城市废水（MWW）[4]，美国在2008年产生约 $4.46 \times 10^{10}$  t 废水[5]。在中国，用于治理MWW的电量占总用电量的0.4%[6]，而在美国该数值为3%~4%[7]。因此，MWW不仅是庞大的污染源，也是巨大的能量消耗源和重要的能源相关排放源。除了MWW，还有许多废水的来源，尤其是农业活

\* Corresponding author.

E-mail address: [ruanx001@umn.edu](mailto:ruanx001@umn.edu)(R. Ruan).

动,产生数百万吨高浓废水。甲烷(CH<sub>4</sub>)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)等温室气体(GHG)由于自然生物作用从废水中释放。一些MWW污泥和动物废水通过可控厌氧消化(AD)用于生产沼气[8]。但是,废水中的大部分资源仍未得到利用。

适当的管理,尤其是对固液废弃物的利用,可能对环境、可再生能源、材料生产和经济都有好处。固液废弃物由大量的有机材料和化合物组成,包含大量可回收能量。表1列出主要MSW的能量值。指定化学需氧量(COD)为每人每天60~120 g, COD的能量密度为17.6 kJ·g<sup>-1</sup>,全球有78亿人口,则全球MWW拥有30×10<sup>15</sup>~60×10<sup>15</sup> kJ·a<sup>-1</sup>的能量[9]。这不包括农业和工业废水中的能量。因此,从固液废弃物中回收能量的潜力巨大。最近有研究表明,不可回收废弃物和生物固体能通过多种过程转化为可利用的热能、电能、燃料和化学品。废液流可流经额外的能量回收途径,有希望支持农作物和藻类的生长,并且提供其他有效副产物。

本文的目的是:提供有效利用有机固液废弃物的生物炼制方案作为可持续的废弃物治理策略;确定技术选项;展示笔者实验室取得的重大技术突破。

## 2. 生物精炼方案

考虑到各种固体和液体废物复杂的化学、物理和生物特性,可能需要多种技术来使从废物中回收的能量和价值最大化。在管理和使用过程中,特定废物的物理和化学状态会发生变化。例如,在废水处理期间会产生固

体污泥,以及来自MWW处理设备的浮渣可以分流为三种状态,即油、水和干燥固体。处理其他状态的废物要引入额外的流程。由此引出生物精炼的概念,其已在生物质能生产领域中被广泛讨论。

人们已经提出许多不同的生物精炼方案[10,11]。在生物精炼方案中,生物质代替石油作为常规石油精炼的原料,通过精炼生物质转化成不同形式的能源、化学品和材料,这些能源和材料通常来自化石资源(图1)[12]。该方案主要设计用于植物基生物质原料,此类原料富含木质纤维素、糖或油。这种原料不适用于MSW、MWW或农业和食品加工废水,因其纤维素、糖和油(油性浮渣除外)含量通常相对较低,而含水量较高。针对这些独特的废物,为了制定生物精炼方案,我们提出了一种新的系统方法,如图2所示。该系统方法能够产生化学品、废料、能源(沼气、合成气、生物柴油和生物油)、食品和清洁水,并能减少空气污染物的排放。核心转化技术块是湿固体和半MSW的AD,利用废水的鱼菜共生系统,含油废弃物转化为生物柴油工艺,以及有机固体的热化学转化。这其中的一些技术已被用于商业应用,但并非没有问题和挑战。在下一节中,我们将讨论这些核心技术的发展,并将报道笔者的实验室正在进行的研究和开发的最新进展。

## 3. 技术选择与新发展

### 3.1. 常规 AD

对于湿有机固体如污泥和食物废物,以及高浓度废

表1 MSW的能量值

Type	MSW	Energy(×10 <sup>6</sup> Btu · t <sup>-1</sup> )
Biogenic	Leather	14.4
	Textiles	13.8
	Wood	10.0
	Food	5.2
	Yard trimmings	6.0
	Newspaper	16.0
	Corrugated cardboard	16.5
	Mixed paper	6.7
Non-biogenic	Polyethylene terephthalate(PET)	20.5
	High-density polyethylene(HDPE)	38.0
	Polyvinyl chloride(PVC)	16.5
	Low-density polyethylene/linear low-density polyethylene(LDPE/LLDPE)	24.1
	Polypropylene(PP)	38.0
	Polystyrene(PS)	35.6
	Other plastics	20.5
	Rubber	26.9

1 Btu=1.055 kJ.

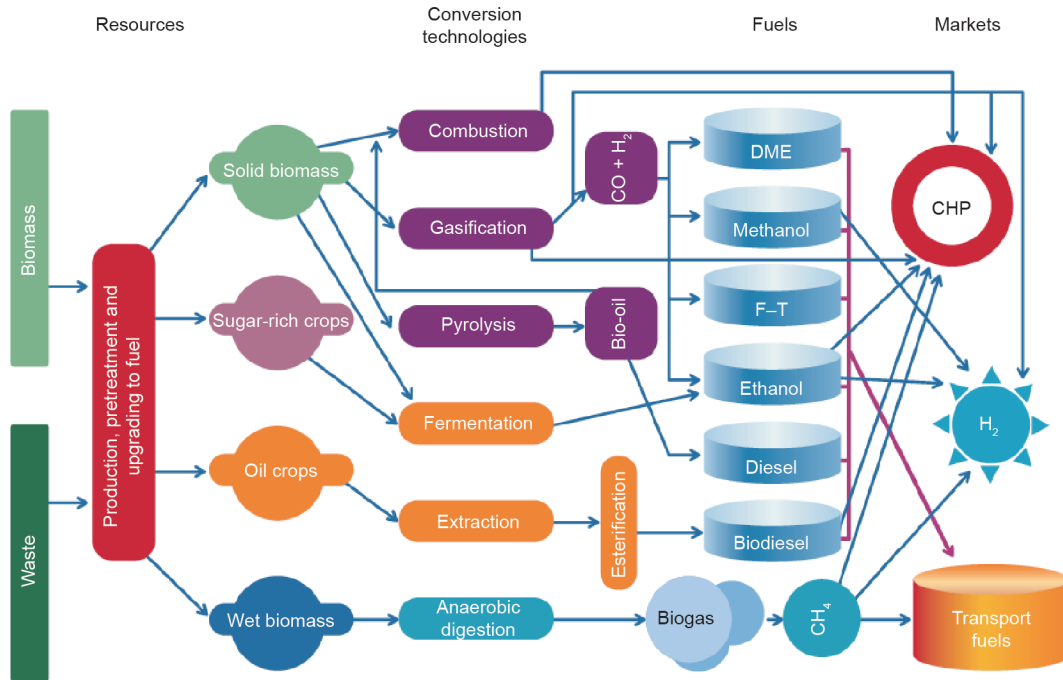


图1. 生物质通过不同途径的生物能[12]。DME: 二甲醚; F-T: 费托合成; CHP: 热电联产。

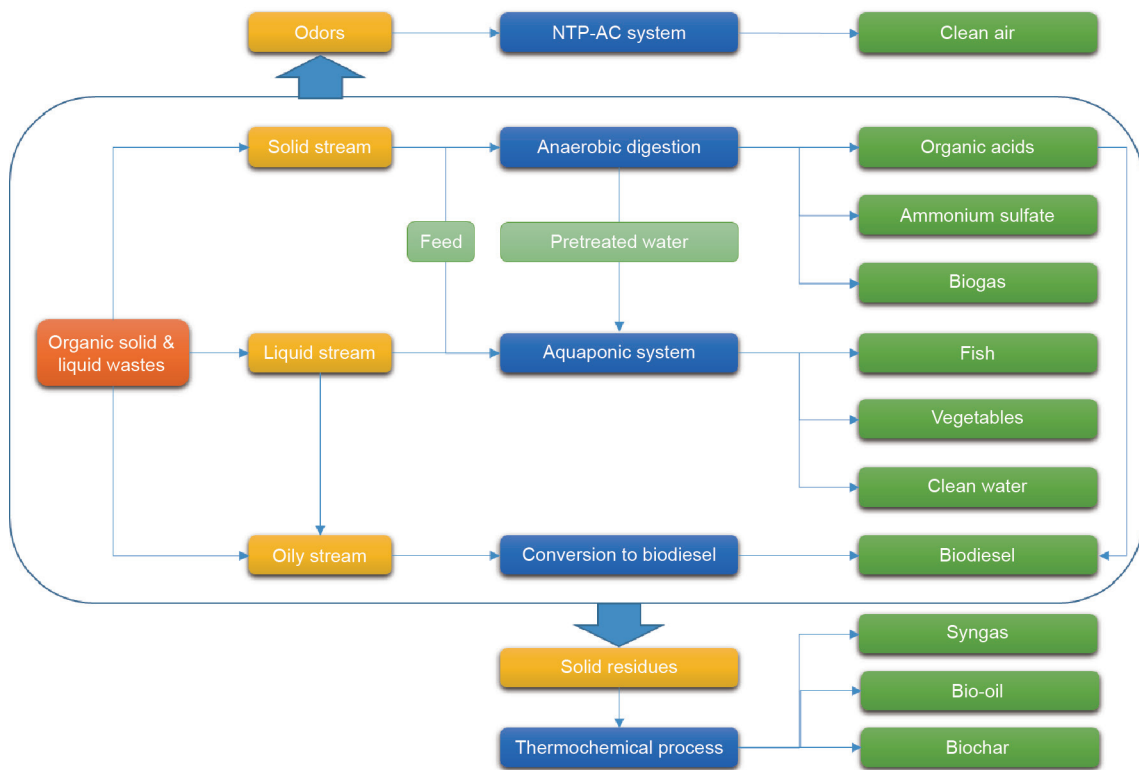


图2. 在清洁水和空气时将有机固体和液体废物转化为增值产品的生物精炼方法。

水, AD在使这些废物稳定化和生产沼气作为能源方面非常有效。沼气, 其主要成分是甲烷, 用于通过燃烧发电和通过催化重整制氢[13,14]。AD对于不同范围含水量的原料相当稳定, 因此适用于很大范围的固体和液体

废物, 前提是这些废物含有足够的碳源和营养素。有几种问题影响了AD技术的有效性和效率。首先, AD后剩余的液体和固体残留物仍含有一定水平的营养素, 导致其不适合直接排放。然而, 在固-液分离之后, 可以利

用液体培养微藻和水培作物，同时通过热化学转化将固体转化为生物油、合成气和生物炭。其次，在AD过程中，游离氨和硫化氢的浓度通常极高，以至于它抑制甲烷的产生[15-17]。再次，作为一个相关问题，沼气中的高硫含量可能给燃气轮机带来问题，并且当沼气燃烧时可能导致高硫排放至空气中。最后，液体部分如果含有高浓度的氨，其植物毒性将不适于水培蔬菜生长。氨对水产养殖中的鱼类也有毒[18]。

### 3.2. 真空辅助高温 AD

为解决上述问题，我们已开发出一种结合真空处理的高温AD工艺[19]。在30~40℃下操作的中温AD已经在世界范围内实践应用了几十年。高温AD仍被建议用于处理高强度动物粪便，因为与嗜热性AD相比，嗜中温性AD处理高强度动物粪便具有更高的稳定性。另外，高温AD提供了许多优于中温AD的方面，包括更高的有机物降解、更高的pH值、更高的CH<sub>4</sub>产率、更高的CH<sub>4</sub>回收率和更低的残留CH<sub>4</sub>排放量[20]。

在实验室最近进行的一项研究[19]中，我们在高温AD之前和期间对基质加真空，以便从AD系统中除去氨和硫化氢。该实验研究了两种不同的真空处理。我们首先使用热真空作为液体猪粪的预处理，以在嗜热AD之前去除氨和硫化氢。该处理称为热真空剥离（TVS）。在此期间我们研究了真空压力和温度水平的影响。实验证明，真空压力是影响TVS效率的主要因素。超过98%的氨、38%的有机氮和80%的硫化氢在55℃、(100.63±3.79) mmHg (1 mmHg = 133.28 Pa) 真空下被除去，并且通过TVS过程在1 h内初始pH为10。使用未经处理的污泥进行批量测试的甲烷，其生产率在25 d内从11.56%±1.75%提高到17.60%±0.49%，水解阶段缩短了40%。TVS-AD可成为提高液体猪粪水解效率的有效途径，其废水可用于藻类培养和（或）水培系统。在一项正在进行的研究中，我们研究了第二个真空处理实验，在高温AD过程中对基质施加真空。值得注意的是，间歇的真空处理便足以去除大量的氨和硫化氢，同时节约能源并简化操作。还可以通过改变真空处理条件（即压力和时间）来控制它们的去除速率。在两种真空处理中，脱氨和硫化氢分别被硫酸溶液和氢氧化钠溶液吸收，以便形成硫酸铵和硫化钠。硫酸铵和硫化钠可以收集并用作肥料（硫酸铵）及造纸和纺织工业的漂白剂（硫化钠）。真空辅助高温AD的重要性在于新型AD工艺能够有效降解城市和农业废水中的有

机物并产生高产率的甲烷，同时经济有效地脱氨和硫化氢。这导致液体含有较少的养分，尤其是较低的氨水平，这对于进一步使用液体生产微藻和水培生产是重要的，甚至极其关键。

### 3.3. 扩展的鱼菜共生系统

鱼菜共生（即鱼菜共生系统）已成为全球公认的食品生产模式，其中的水产养殖用水含有一定量的未用养分和鱼类排泄的养分，这些养分被循环用于水培植物的生产。反过来，这些植物作为几种生物过滤器之一，用于清洁和净化水产养殖用水。与传统农业/园艺和水产养殖相比，鱼菜共生具有许多优势：①该系统对交换/处理富含养分的水质的需求较少；②显著地降低了由于渗透到土壤和地下水导致的水的流失；③重复利用矿物质营养素。所有这些优点都有助于减少水和矿物质营养素的使用。水是公认的宝贵资源，保持清洁的水源变得越来越重要。令人惊讶的是，全球农业消耗了地球上70%的淡水资源用于农作物生产[21]。据估计，莴苣的水培生产用水减少为传统农业生产用水的1/12 [22]。通过综合循环水产养殖进行鱼类生产，仅使用不到池塘养殖所需水量的1%即可生产相同的罗非鱼[23]。因此，鱼菜共生系统在用水方面明显优于传统生产系统，并且最适合缺水的地区。此外，水培生产在单位土地、养分和水投入方面具有更高的产量和生产力，并且可以很容易地适应绿色或有机生产实践。如果在城市地区实施，它可以大大缩短生产供应链。

鱼菜共生的实践仍面临技术、社会生态和经济方面的挑战，但仍有许多机会可供探索[21,24]。笔者的实验室正在进行相关研究，以调查动物废水和食品加工废物在水培生产中的使用，旨在制定零排放再循环生产战略。图3显示了扩展的水培系统概念流程图。扩展系统包括：真空辅助高温厌氧反应器，以产生甲烷并通过去除过量的氨和硫化氢，制备剩余的高强度废水用于水产生产；微藻培养过程，以进一步减少氨，分解残留的有机物，并生产藻类鱼饲料；黑水虻/蠕虫生产组件，以从食物和其他固体生物废物中提取出鱼饲料。由于矿物质营养物由动物废水和鱼废水两者提供，因此水培产量预计要比依赖淡水的普通水生系统要大。除鱼缸外，水产养殖组件还包括一些过滤和生物过滤站。最近的研究发现，微藻成分不仅有助于去除氨和总氮，还有助于补偿由硝化细菌引起的pH下降。研究还表明，通过仔细控制微藻成分的含量，微藻就不会与水培蔬菜争夺养



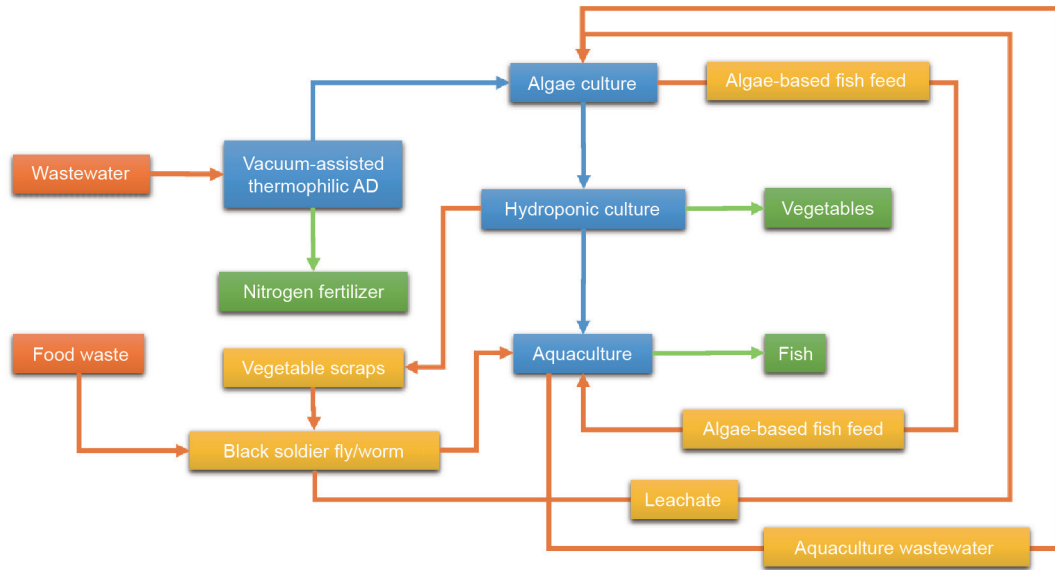


图3. 扩展的水培系统概念流程图。

分。如果充分控制，所有养分都将被利用，并且没有水被排放到地表。集中的研究和开发工作已经在计划中，以平衡系统中的各个组成部分，并进行质量和能量平衡分析。我们还将进行技术经济分析和生命周期分析，以提供技术的财务和环境评估。

### 3.4. 含油废物制备生物柴油工艺

含油废物包括各种来源的脂肪、油和油脂（FOG），如城市污水浮渣、食品加工浮渣、杂货店和仓库废水浮渣以及废食用油等。含油废物堵塞排水系统和废水收集与处理系统。它们也会对环境 and 人类健康构成威胁。含油废物通常通过厌氧消化处理，以产生低能量密度的沼气，或通过填埋法处理，这会引起严重的环境问题。对可再生生物柴油的高需求为含油废物的利用提供了机会，因为使用原始植物油作为原料对于生物柴油工业来说已经变得非常昂贵。由于其相对干净，目前正在收集废食用油用于生物柴油的生产。到目前为止，浮渣在生物柴油原料中的含量最低。其皂和游离脂肪酸（FFA）含量高（>90%），杂质多，与主油复合物乳化后的水分高，使得萃取油成分非常困难。在未纯化的状态下，标准的生物柴油工艺无法从浮渣中提取油。含30%游离脂肪酸的低品位原油可通过两步法转化，其中酸催化预处理用于酯化游离脂肪酸，然后用碱性催化剂将甘油三酯进行酯交换[25]。当含油废物（即浮渣）含有大于30%的游离脂肪酸和许多其他杂质的油时，两步法效率低或根本不起作用。

笔者实验室的新工艺能够将浮渣中的脂肪酸、脂类

和肥皂直接转化为ASTM级生物柴油[26,27]。使用酸洗液结合溶剂萃取从浮渣中除去肥皂和细小固体颗粒，使得萃取的油成分适合下游工艺。因为甲醇和水具有非常接近的沸点，在低温两步法中甲醇的回收成为一项能源密集型工艺，所以我们开发了一种基于甘油酯化反应的替代工艺，称为“甘油裂解”，其中甘油与游离脂肪酸反应生成甘油酯和水[27]。因为反应在238℃进行，所以在甘油裂解过程中产生的所有水被蒸发，然后通过氮气从反应器中清除。所得的油是干燥的，并且适用于随后的酯交换反应。我们的研究表明，尽管反应温度很高，但总能耗很低，并且可以回收热量来预热进入的流量。这种新方法已在小型中试上得到证明，并有可能适用于其他游离脂肪酸含量高的原油。生命周期分析表明，与厌氧消化和燃烧等现有方法相比，城市污水浮渣制备生物柴油可能更经济、更环保[28]。

### 3.5. 微波辅助热化学转化

热化学过程气化和热解是生物质转化的可行选择[29]，世界上许多地方都使用过这两种方法。生物质在高温下（> 800℃）不完全燃烧气化会产生合成气。合成气是CO、H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>以及一些轻质烃的混合物，可以通过燃烧用来产热和发电，也可以通过传统的费托合成和其他新型催化重整工艺转化为化学品（图4）[30]。合成气可能含有硫化氢、盐酸（HCl）、焦油和固体颗粒物等污染物，在使用前必须经过复杂的清洁工艺去除[31,32]。在无氧条件与中等高温下（300~700℃），有机原料通过热解转化为生物原油、生物碳和热解气体。热

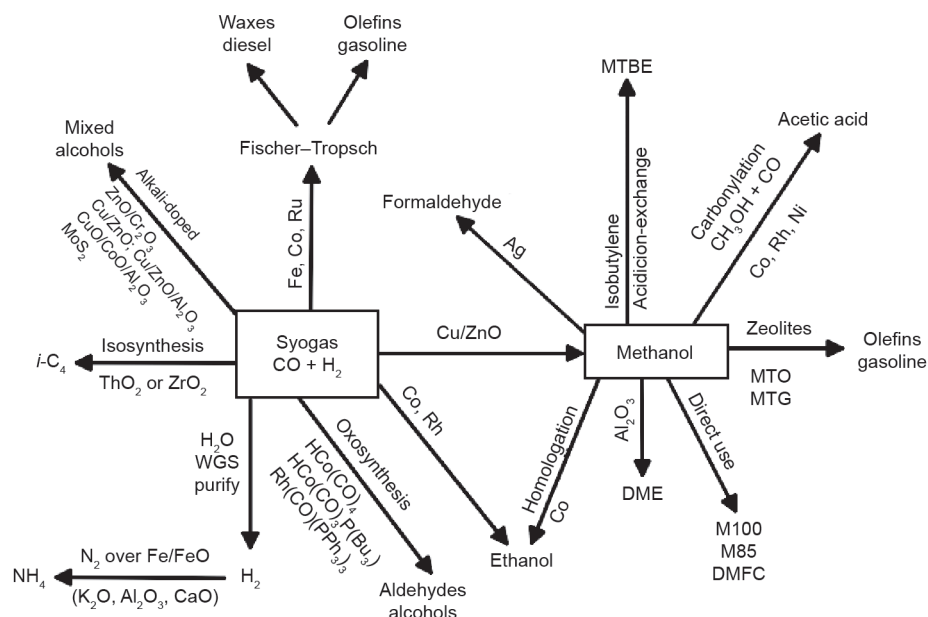


图4. 合成气重整的途径[30]。DME：二甲醚；DMFC：直接甲醇燃料电池；MTBE：甲基叔丁基醚；MTG：甲醇制汽油；MTO：甲醇制烯烃；WGS：水煤气变换。

解液化固体生物质和生产生物原油的能力使其成为生产高需求量的液体燃料的理想选择，液体燃料具有更高的能量密度且比气体燃料更易处理。在污染物排放和能量回收方面，气化和热解过程均优于焚烧。

有许多类型的气化和热解方法，它们的不同点在于加热介质、速率和材料流动，产品成分、质量、效率以及处理具有不同物理和化学性质（即尺寸、水分含量、均匀性、木质素含量等）原料的能力亦有不同。笔者的实验室已开发出使用微波加热的新热化学转化过程[29]。微波加热与传统的传导加热相比有许多优点，它以内部加热为特色。生物质微波加热时，热流与质量流（挥发物）是并流的，与常规加热期间发生的逆流流动相反。基于微波加热的生物质转化的其他优点包括：处理较大尺寸和高度不均匀的生物质颗粒的能力；无需载气，否则会稀释产品；没有流化作用和剧烈混合，因此产品中的灰分和微粒含量显著降低。使用微波加热来热解和气化，称为“微波辅助热解”（MAP）和“微波辅助气化”（MAG），已经用许多原料进行了测试。最近，通过在工艺中加入微波吸收剂，在提升加热速率和温度方面取得了重大进展[33]。这个添加剂将该工艺从中等加热速率工艺升级到快速加热速率工艺，使得快速微波辅助热解（fMAP）和快速微波辅助气化（fMAG）可行[29,33]，已经验证了几代中试规模的系统。最新一代系统可以在高达900℃的温度和250℃·s<sup>-1</sup>的加热速率下运行，具体情况取决于原料。微波辅助转化工艺的独特特

征极其适合MSW，MSW在水分含量、化学成分和几何学方面通常是不均匀的。

#### 4. 结论

有机固体和液体废物的数量正在增加，给这些废物的管理造成巨大的压力，然而也提供了有益利用的机会。没有一种通用技术能够处理如此复杂的废物。借鉴石油精炼工艺的概念，已经提出了许多木质素生物质生物炼制的方法，但是这些方法不适用于城市、农业、食物及生物加工废物。我们已经提出了新的生物炼制方案，旨在完全利用这些废弃物来生产能源、燃料、食物和饲料，同时清洁水体及减少气体排放。我们所开发的四项核心突破性技术——真空辅助高温AD、扩展鱼菜共生、含油废物经甘油裂解制取生物柴油以及微波辅助热化学转化，都有可能将新的生物炼制方法提升到更高的水平。每种技术都有自己独特的特性和功能，能够使其对于某种废物流在某种情况下发挥最佳效果。真空辅助高温AD适用于MSW和浓缩废水的处理和利用，可能不是将污染物减少到极低水平的最佳方法（如用于排放目的）。扩展鱼菜共生要求进入系统的水含低浓度的营养物质和微粒，并且它是废水处理最后阶段的适宜工艺。通过甘油解反应将含油废物转化为生物柴油的技术最适合含有低级油性化合物的含油废弃物。强大的微波辅助热化学转化工艺能够处理各种不同的MSW，如生

物质和城市废物。高含水量的MSW在热化学转化之前需要额外能量用于脱水，热化学转化得到的产品通常需要额外的步骤来提升品质和精炼。为了使这些技术转向商业实践，还需要进一步努力改进，并在更大规模上展示它们的经济效益和环境效益。

## Acknowledgements

The authors would like to express their appreciation to Department of Transport/Sun Grant, US Department of Agriculture/Department of Energy, Minnesota Legislative-Citizen Commission on Minnesota Resources, Metropolitan Council Environmental Services, University of Minnesota MNDrive programs, University of Minnesota Center for Biorefining, and China Scholarship Council(CSC) for their financial support for this work.

## Compliance with ethics guidelines

Paul Chen, Erik Anderson, Min Addy, Renchuan Zhang, Yanling Cheng, Peng Peng, Yiwei Ma, Liangliang Fan, Yaning Zhang, Qian Lu, Shiyu Liu, Nan Zhou, Xiangyuan Deng, Wenguang Zhou, Muhammad Omar, Richard Griffith, Faryal Kabir, Hanwu Lei, Yunpu Wang, Yuhuan Liu, and Roger Ruan declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## Reference

- [1] Hong J, Chen Y, Wang M, Ye L, Qi C, Yuan H, et al. Intensification of municipal solid waste disposal in China. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;69:168–76.
- [2] Han Z, Ma H, Shi G, He L, Wei L, Shi Q. A review of groundwater contamination near municipal solid waste landfill sites in China. *Sci Total Environ* 2016;569–570:1255–64.
- [3] Li Y, Yang Y, Yu G, Huang J, Wang B, Deng S, et al. Emission of unintentionally produced persistent organic pollutants (UPOPs) from municipal waste incinerators in China. *Chemosphere* 2016;158:17–23.
- [4] Zhang QH, Yang WN, Ngo HH, Guo WS, Jin PK, Dzakpasu M, et al. Current status of urban wastewater treatment plants in China. *Environ Int* 2016;92–93:11–22.
- [5] United States Environmental Protection Agency. Clean watersheds needs survey 2008: report to congress. Report. Washington, DC: Office of Water Management; 2008. Report No.: EPA-832-R-10-002.
- [6] Chai C, Zhang D, Yu Y, Feng Y. Carbon footprint of municipal wastewater treatment plants. In: Proceedings of the 2014 International Conference on Frontier of Energy and Environment Engineering; Taichung, China; 2014 Dec 6–7. Boca Raton: CRC Press; 2015. p. 279–82.
- [7] Pabi S, Amarnath A, Goldstein R, Reekie L. Electricity use and management in the municipal water supply and wastewater industries. Final report. Palo Alto: Electric Power Research Institute; 2013.
- [8] Shen Y, Linville JL, Urgun-Demirtas M, Mintz MM, Snyder SW. An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;50:346–62.
- [9] Heidrich ES, Curtis TP, Dolfig J. Determination of the internal chemical energy of wastewater. *Environ Sci Technol* 2011;45(2):827–32.
- [10] Cherubini F. The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Convers Manage* 2010;51 (7):1412–21.
- [11] Gavrilescu M. Biomass potential for sustainable environment, biorefinery products and energy. In: Visa I, editor. Sustainable energy in the built environment—steps towards nZEB. Berlin: Springer; 2014. p. 169–94.
- [12] Directorate-General for Research and Innovation of European Commission. The state and prospects of European energy research: comparison of commission, member and non-member states' R&D portfolios. Brussels: Directorate-General for Research and Innovation of European Commission; 2006.
- [13] Weiland P. Biogas production: current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol* 2010;85(4):849–60.
- [14] Xu J, Zhou W, Li Z, Wang J, Ma J. Biogas reforming for hydrogen production over a Ni-Co bimetallic catalyst: effect of operating conditions. *Int J Hydrog Energy*. 2010;35(23):13013–20.
- [15] Yenigün O, Demirel B. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: a review. *Process Biochem* 2013;48(5–6):901–11.
- [16] McCartney D, Oleszkiewicz J. Sulfide inhibition of anaerobic degradation of lactate and acetate. *Water Res* 1991;25(2):203–9.
- [17] Sun ZY, Yamaji S, Cheng QS, Yang L, Tang YQ, Kida K. Simultaneous decrease in ammonia and hydrogen sulfide inhibition during the thermophilic anaerobic digestion of protein-rich stillage by biogas recirculation and air supply at 60 C. *Process Biochem* 2014;49(12):2214–9.
- [18] Randall D, Tsui T. Ammonia toxicity in fish. *Mar Pollut Bull* 2002;45(1–12):17–23.
- [19] Zhang R, Anderson E, Addy M, Deng X, Kabir F, Lu Q, et al. An innovative intermittent-vacuum assisted thermophilic anaerobic digestion process for effective animal manure utilization and treatment. *Bioresour Technol* 2017;244(Pt 1):1073–80.
- [20] Mosev V, Poulsen M, Wahid R, Højberg O, Møller HB. Mesophilic versus thermophilic anaerobic digestion of cattle manure: methane productivity and microbial ecology. *Microb Biotechnol* 2015;8(5):787–800.
- [21] Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir KV, Jijkali H, Thorarinsdottir R. Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability* 2015;7 (4):4199–224.
- [22] Barbosa GL, Gadelha FDA, Kublik N, Proctor A, Reichelm L, Weissinger E, et al. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. *Int J Environ Res Public Health* 2015;12(6):6879–91.
- [23] Diver S. Aquaponics—integration of hydroponics with aquaculture. Butte: National Center for Appropriate Technology; 2006.
- [24] Tyson RV, Treadwell DD, Simonne EH. Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology* 2011;21(1):6–13.
- [25] Canakci M, Van Gerpen J. Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. *Trans ASAE* 2001;44(6):1429–36.
- [26] Bi Ch, Min M, Nie Y, Xie Q, Lu Q, Deng X, et al. Process development for scum to biodiesel conversion. *Bioresour Technol* 2015;185:185–93.
- [27] Anderson E, Addy M, Xie Q, Ma H, Liu Y, Cheng Y, et al. Glycerin esterification of scum derived free fatty acids for biodiesel production. *Bioresour Technol* 2016;200:153–60.
- [28] Mu D, Addy M, Anderson E, Chen P, Ruan R. A life cycle assessment and economic analysis of the scum-to-biodiesel technology in wastewater treatment plants. *Bioresour Technol* 2016;204:89–97.
- [29] Chen P, Xie Q, Du Z, Borges FC, Peng P, Cheng Y, et al. Microwave-assisted thermochemical conversion of biomass for biofuel production. In: Fang Z, Smith RL, Qi X, editors. Production of biofuels and chemicals with microwave. Dordrecht: Springer; 2015. p. 83–98.
- [30] Spath PL, Dayton DC. Preliminary screening—technical and economic assessment of synthesis gas to fuels and chemicals with emphasis on the potential for biomass-derived syngas. Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2003. Report No.: NREL/TP-510-34929. Contract No.: DEAC36-99-GO10337.
- [31] Anis S, Zainal Z. Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15 (5):2355–77.
- [32] Devi L, Ptasiński KJ, Janssen FJ. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. *Biomass Bioenergy* 2003;24 (2):125–40.
- [33] Borges FC, Du Z, Xie Q, Trierweiler JO, Cheng Y, Wan Y, et al. Fast microwave assisted pyrolysis of biomass using microwave absorbent. *Bioresour Technol* 2014;156:267–74.