

生物质产业关键技术突破与产业前景

陈洪章，马力通

(中国科学院过程工程研究所生化工程国家重点实验室，北京 100190)

摘要:发展生物质产业，要求生物质成为生物化学工程领域的通用工业原料，应该将原料结构、过程转化和产品特点三者有机联系，开发使生物质原料选择性结构拆分和定向转化的炼制技术，不仅获得产品，还实现最低能耗、最佳效率、最大价值的清洁转化。分析了生物质产业的资源状况、产业前景和目前面临的困境，提出突破关键技术制约进而解决技术经济问题是实现生物质产业化的根本途径。在分层多级定向转化的炼制思路下，依托生物质产业关键技术的突破及过程集成，走原料与产品多元化的道路，生物质产业发展的春天已经来临。

生物质产业以作物秸秆、畜禽粪便、有机垃圾等农林废弃物和环境污染物为原料，使之无害化和资源化，将植物蓄存的太阳能与物质资源深度开发和循环利用，堪称循环经济之典范。大力发展以生物质能为主的低碳生物质产业，部分替代和节约化石能源，有利于改善能源结构，减少二氧化碳排放，缓解和应对全球气候变化^[1]。生物质产业是低碳经济发展、清洁能源替代方面的最佳契合点和切入点。

低碳经济

以降低温室气体

排放为主要关注点，而化石燃料排放

的CO₂是最大的温室气体来源，所以“CO₂

减排”是低碳经济最直观的表现。减少CO₂

排放量应从消除根源着手，第一，压缩碳源，发展生物质产业，生产生物质能源及生物基化学品，减少对化石燃料的依赖；第二，增加碳汇，恢复并加强

地球植被建设，通过植树造林等来固定CO₂

，发展碳汇林业，实现森林面积的增加、森林蓄积量的增加，最终实现森林生态效益。利用可再生能源，发展生物质产业，促进经济发展与碳排放最终脱钩，实现工业减排，是我们的着眼点。通过生物质产业的建立和发展，将循环经济、节能降耗、清洁生产和产业调整四大领域融为一体。

1 生物质资源和产业前景

生物质产业是利用对环境友好的可再生资源生产清洁能源及相关化工产品的新兴产业。从资源枯竭、能源安全、环境保护、循环经济可持续发展等方面考虑，建立低碳生物质产业是发展循环经济的大势所趋。

1.1 资源状况

规模化生物质产业的发展使生物质资源的开拓成为必然，现在世界各国都将各类植物木质纤维素作为丰富、廉价的原料来源^[2]

。在中国，生物质产业的原料利用目前主要侧重于废弃的生物质资源，如农作物秸秆、林业加工废料及城市垃圾中所含的废弃生物质等。

农作物秸秆是地球上第一大可再生资源。国家农业部完成了首次全国农作物秸秆资源专项调查，并发布了《全国农作物秸秆资源与评价报告》。据调查统计显示（图1），2009年，全国农作物秸秆理论资源量为8.20亿t（风干，含水量为15%）；从品种上看，稻草约为2.05亿t，占理论资源量的25%；麦秸为1.50亿t，占18.3%；玉米秸为2.65亿t，占32.3%；棉秆为2584万t，占3.2%；油料作物秸秆（主要为油菜和花生）为3737万t，占4.6%；豆类秸秆为2726万t，占3.3%；薯类秸秆为2243万t，占2.7%^[3]。

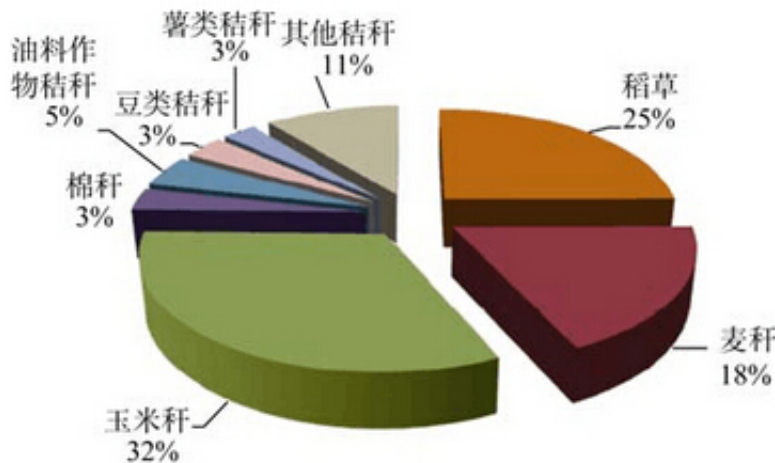


图1 各种农作物秸秆占总资源量的比例

图片来源：文献[3]3。

通过对中国各地农作物机械收获和人工收获的留茬高度进行调查，考虑到收集过程中的损耗，估算2009年全国农作物秸秆可收集资源量约为6.87亿t，占理论资源量的83.8%。其中，秸秆作为肥料的使用量约为1.02亿t（不含根茬还田，根茬还田量约1.33亿t），占可收集资源量的14.78%；作为饲料的使用量约为2.11亿t，占30.69%；作为燃料的使用量（含秸秆新型能源化利用）约为1.29亿t，占18.72%；作为种植食用菌基料量约为1500万t，占2.14%；作为造纸等工业原料量约为1600万t，占2.37%；废弃及焚烧约为2.15亿t，占31.31%。

秸秆资源作为生物质产业原料高值化利用的潜力非常大。秸秆资源的浪费，实质上是耕地、水资源、劳动力、化肥和农药等农业投入品的浪费。秸秆资源多层次转化为高效生物质能源、生物基化学品具有非常重要的现实意义。

1.2 产业前景

太阳能是地球上几乎一切能量的源泉，生物质是太阳能循环转化的载体，现代工业发展的能源基础——煤炭、石油、天然气就是古代生物质埋藏在地下，经微生物和地质化学的共同作用演变而来。人类使用能源的趋势为生物质—煤—石油—煤—生物质，人类通过改变利用方式来提高能源的利用效率。生物质转化为生物能源替代煤、石油和天然气等化石能源符合 $CO_2 + \text{阳光} \rightarrow \text{农作物} \rightarrow \text{生物质能源} \rightarrow CO_2$

的C平衡（图2），形成一个理论上的 CO_2

净排放

为零的物质循

环。如果完全用生物质替代

化石能源，生物质能源如生物乙醇在生产、运输过程中

的 CO_2 排放量，等同于化石能源在开采、运输过程中的 CO_2

排放量，但是替代能源可以通过能源利用

方式和利用效率的改善，减少 CO_2

排放量。此外，生物燃料在加工过程中最大限度地去除了N、S等杂质，是更加绿色的能源，因此使用生物质能源替代化石能源，符合低碳经济减少 CO_2

排放的要求，可以大大减少大气中其他污染物的浓度，对环境保护具有重要意义。

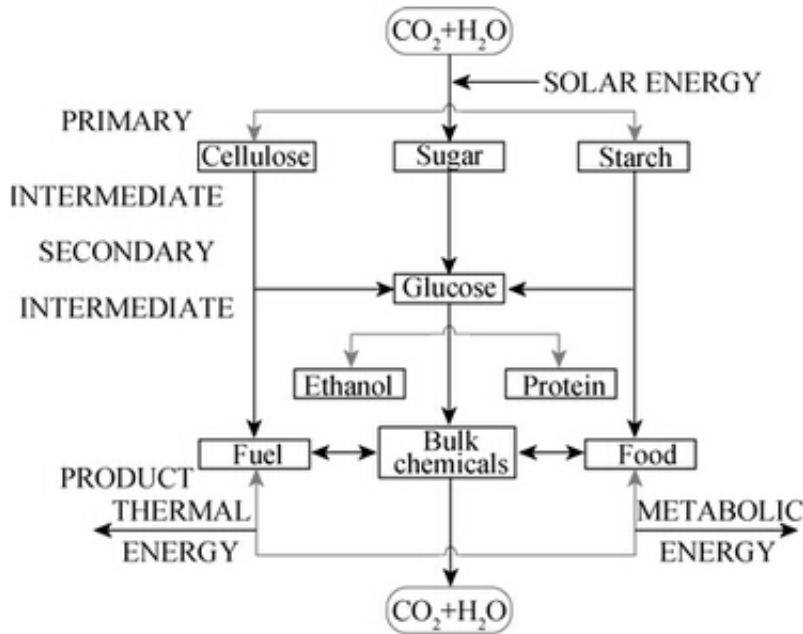


图 2 生物质产业生态碳平衡

图片来源：文献[4]。

《BP世界能源统计报告2011》称，到2010年底，按世界石油、天然气和煤炭的探明储量及生产量，三者可分别供开采46.2年、58.6年和118年。中国是个化石能源资源匮乏，特别是石油和天然气资源极贫的国家。由于中国经济的快速发展，能源消费激增，2010年的能源消费量占全球能源消费总量的20.3%，超过美国成为世界最大能源消费国，其中煤炭消费量占全球消费总量的48.3%^[5]

。尽管新型能源增

长很快，但煤炭依然是中国的主要能

源，这在短期内很难改变，造成中国的SO₂和CO₂

排放量分居全球第一和第二位，寻找环境友好型的清洁能源逐步替代石油和煤炭，以满足人类对液体能源的大量需求，是一个不可逆转的方向。人类不是因为石头用完了才结束石器时代，石油时代的结束，也将早在石油用完之前，当人们找到更廉价的替代能源时，自然也会告别石油时代。同时我们也不能等到石油用完了再开发新的可用能源。随着中国倡导发展绿色经济和低碳经济，碳权交易、税费优惠、上网电价等政策环境不断完善，为生物质产业的发展创造了良好的宏观环境。所以，生物质产业的前途是光明的。

2 生物质产业面临的困境

在看到生物质产业的美好前景与效益的同时，也不能忽视相应存在的依然严峻的困难。与其他新兴产业一样，生物质产业的发展也受到资金、政策、技术等各方面的制约。

2.1 原料供应

任何资源都是有限的，虽然现在有大量的生物质资源亟待开发，但随着技术的进步，这些资源也会变成有限的和宝贵的。生物质产业化所需原料消耗非常大，所以，生物质资源的发展是实现大规模商业化应用生物质的根本前提。应在不同地域实现甘蔗和甜高粱等能源作物、麻风树和小桐子等能源植物，以及微藻等藻类资源规模化的优良品种培育和品质优化，进行能源作物和能源植物的基因工程改良，提高单位面积产量，提高耐盐、抗旱的抗逆特性，使之能够在荒山荒坡、盐碱地、戈壁滩甚至沙漠上得到高产量，以提供丰富的原料。此外，各种速生的薪炭林、灌木林是秸秆之外原材料的有效补给。中国幅员辽阔，自然条件复杂，生物质原料种类繁多和分散，适宜形成以地域和原料为导向的生物质产业的原料多元化发展战略^[6]

。合理布局我国广袤非农牧边际土地的生物质资源发展，保障国家经济和社会发展所需的生物质资源安全和可持续利用是生物质产业的关键。

2.2 技术瓶颈

技术进步是促进产业化的关键。生物质产业发展的技术瓶颈尚未被完全突破。如何将生物质原材料经济高效地转化为低成本、高品质的五碳糖、六碳糖和木质素及其衍生物,进而生产更有价值的生物基化学品、生物基材料和生物乙醇等生物能源^[7]

,依然是降低成本的技术关键难题。显然生物质转化技术不仅仅是一个生物学问题,更是一个工程学问题,因为技术经济问题属于工程科学家的研究范围,是生物化学工程学科中最具挑战性的课题。正如青霉素的大工业生产开发过程,只是在工程技术上开创了液体深层纯种培养技术,使在技术经济上获得决定性突破,并开创了生物化学工程这一新学科^[8]

。我们认为,生物质的产业化也正面临着类似的局面,必须有新的重大技术突破,才能扭转产业化困难的局面。

2.3 产业的国家支持

生物质产业链不完整,也缺乏规模化、市场化的基础设施和相关产业配套。生物质新能源目前只能作为主流能源的补充,同传统化石能源相比,其研发和利用成本比较高,大部分生产企业需要额外的补贴、税收优惠才能赢利或生存。但目前国家扶持政策在研发、财政、金融、市场等政策间缺少衔接、配套和细化。这方面需要完善生物质产品的价格补贴政策,逐步从建设投资补贴转向原料补贴、产品补贴、消费补贴、投资补贴,创新有利于生物质产业发展的商业模式。

3 生物质产业关键技术突破点

尽管产业发展空间广阔,生物质产业化和商业化的进程中,成本居高不下是最大阻力。迫切需要从其关键过程入手,寻找降低成本的途径,通过基础应用研究和关键核心技术(如原料预处理、酶制剂)的研究,在基础研究、关键技术耦合和设备研发等技术方面获得新的突破,才能实现生物质资源的高效、高值的利用。

3.1 原料多元化

地球上不同地区的多样化气候和土壤条件,形成了多样化的植物种类,因为可以使用多种不同的原料,采用多种不同的形式,生物质能源的地域适应性才更好,是唯一能全面替代化石能源的资源。由于生物质原料的多样性,因此在进行产品设计时,不仅要考虑产品本身的用途,还必须选择相应的植物原料及转化途径,要把产品、原料和生产过程有机地联系在一起^[9]。

生物质原料是生物质产业之本,包括废弃生物资源(农林废弃物、禽畜粪便、有机垃圾、有机废水等)、专用能源作物(木薯、甘薯、甜高粱、菊芋等)、专用能源植物(黄连木、麻风树、油桐、文冠果、光皮树、乌桕等)。农作物秸秆是最具有代表性的木质纤维素资源。秸秆和木材同属于木质纤维素,都由纤维素、半纤维素和木质素组成,然而两者在结构和化学组成上却有较大的差异,其转化特性也不同(表1)。

表 1 生物质原料木材和秸秆的对比

种类	木本植物	草本植物
物理性质	生长周期长,能里密度大,体积小。	生长周期短(竹除外),能里密度小,单位体积大,热值低,不易存放。
组织结构	茎由外到内是韧皮部、形成层、木质部,形成层每年都会生长,老化后成为木质部,茎的横截面有年轮;非纤维细胞针叶木仅为 2%左右,阔叶木含 20%~25%。	茎中密布维管束,维管束中的木质部分布在外侧而韧皮部在内侧,无形成层,其间充斥着薄壁细胞,非纤维细胞(包括薄壁细胞)含量远大于木材,稻草为 60%,麦草为 40%。
纤维形态	针叶木比阔叶木纤维较长,纤维形态均一。	秸秆与木材原料相比,纤维长度较短,纤维形态差异很大。
化学成分	针叶木比阔叶木木质素含量高,在 25%~35%。	秸秆中纤维素、木质素含量从秸秆的上部到下部逐渐增多,半纤维素含量逐渐减少,而营养物质恰好从秸秆的上部到下部逐渐减少;半纤维素、灰分含量都比木材高。

数据来源:文献[10-11]。

传统的生物转化过程把秸秆作为性质单一的原料,主要利用秸秆中的纤维素,使得秸秆的高值转化难以适应工业化的要求。为解决在秸秆转化过程中采用单一的生物转化方式所存在的问题,充分认识秸秆性质的不均一性是非常重要的。这种思想可将生物转化技术与秸秆组分分离技术有机结合起来,避免在秸秆原料转化为液体燃料的研究上,套用或沿用木材的技术,从而有利于实现秸秆生物量全利用,并可大大降低秸秆的转化成本。笔者所在的课题组经过长期探索发现,麻类作物的纤维细胞长,适于生产纺织纤维;玉米秸秆的纤维细胞短,半纤维素含量高,适于生产纤维素酶、聚醚多元醇、酚醛树脂或者酶解发酵乙醇;稻草、麦草等的纤维细胞较长,适于造纸及生产丁醇和酚醛树脂;阔

叶木片的木质素含量高、半纤维素含量低，适于开展木质素与纤维素的综合利用。

3.2 产品多元化

生物质可以与化石资源一样被用来生产化工原料等物质性产品（图3）。生物质原料组成丰富，不同原料组分差别很大，如农作物秸秆的主要组分为纤维素、半纤维素和木质素，薯类的主要组分为淀粉，而油料作物种子则以油脂为主要组分。但归纳起来植物原料主要有4种基本化学物质：碳水化合物（糖、淀粉、纤维素和半纤维素）、木质素、脂类和蛋白质，包括多种物质，并含有羟基、羰基、苯环等含氧基团，与石油原料只含—(CH₂)_n—线性聚合结构相比较，能提供生物燃料等生物质能源以外更多的开发新产品的机会，更有利于进行化学改造、生产各类化工产品。

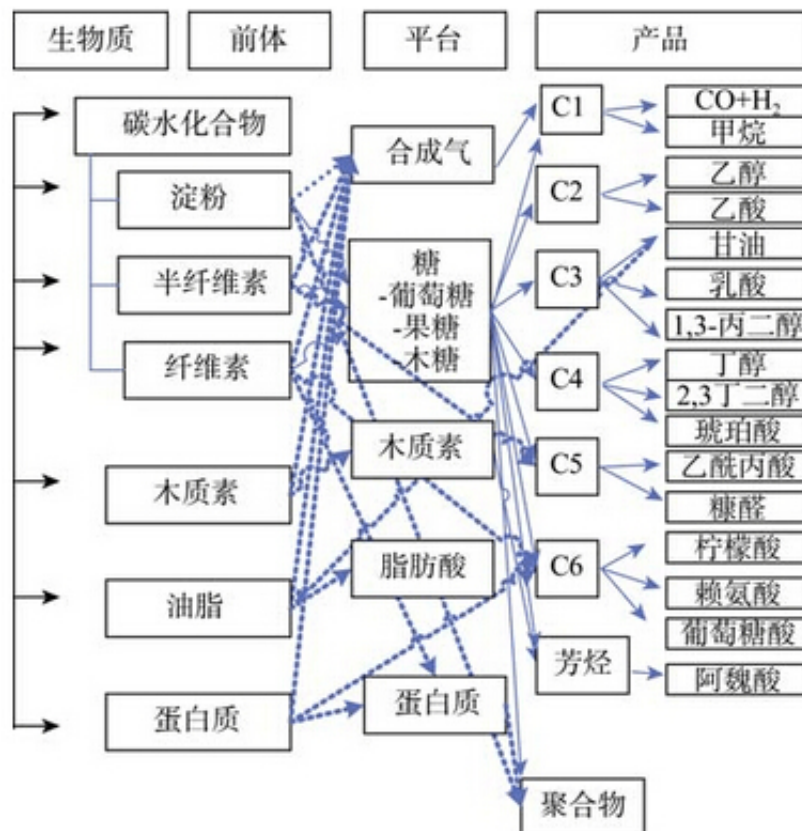


图3 生物质为原料生产的主要生物基产品

图片来源：文献[9]677。

通过不同的技术，生物质可以转化成不同的产品。生物质可以直接燃烧或发电，可以气化发电或供气，可以转化为生物燃气（沼气、生物氢气）、生物燃料（生物乙醇、生物柴油、生物丁醇、生物油、固体成型燃料），还可以转化为生物材料与化学品（乳酸、聚乳酸）等。具体哪种利用途径好，需要具体问题具体分析。石油也是根据不同的市场需要，经加热蒸馏、催化裂化、加氢裂化等工艺生产出汽油、柴油等燃料和乙烯、丙烯等化学品^[12]。因此，随着生物质资源开发利用技术的不断进步，生物质能源必将在人类的生活中发挥重要的作用。

3.3 生物技术转化路线

生物质转化的途径中，生物技术路线转化法因性质温和、对环境后续影响低、温室气体排放少，成为生物质产业研

究开发的重点之一（图4）。以生物质能源的生产为例，生物质资源预处理后水解为单糖，利用微生物复杂的酶系和一系列的生物化学代谢途径，将单糖转化为生物能源，如生物乙醇、生物丁醇、生物氢气、生物天然气等，以及生物基化学品如乳酸、柠檬酸^[13]。

由于生物质原料的生物构造和化学组成的复杂性造成直接水解发酵的效果很差，如秸秆必须经过适当的预处理，破坏木质素的包裹作用以及纤维素的结晶结构才能得到较高的单糖得率，因此，原料的预处理技术是生物质有效利用过程中的一个关键技术。现有常用的预处理方法很多，其中蒸汽爆破法具有处理时间短、不用或少用药品、节能环保、无回收工艺等优点，是一种较为理想的预处理技术。陈洪章研究员的课题组以自主研发的无污染蒸汽爆破预处理技术为平台，结合机械筛分，可以同时实现秸秆纤维素、半纤维素、木质素各组分的充分利用，而且大幅度降低了秸秆转化过程中的生产成本。在实验室研究基础上，该技术通过改进实现了工程放大，目前已经达到50m³的规模^[14]。

水解是生物质生化转化的限速步骤，需要采用酸或酶水解法将生物质转化成可发酵性单糖。同酸法水解工艺相比，酶水解法具有反应条件温和、环境友好、产物专一、糖得率高（转化率 > 90%）和设备投资低等优点，所以成为世界各国重点研究的热点工艺技术之一。酶水解法主要的制约因素是纤维素酶的成本。造成生物质降解成本过高的主要技术瓶颈是工业生产中纤维素酶用量较高，酶解效率有待改进。为此众多研究者围绕纤维素酶和生物质的生物降解转化展开了广泛的研究。除了从自然界中寻找具有高比活的纤维素酶外，还对各种微生物进行发酵代谢工程改造，有效地扩大菌株的底物利用范围，提高产品产率等。

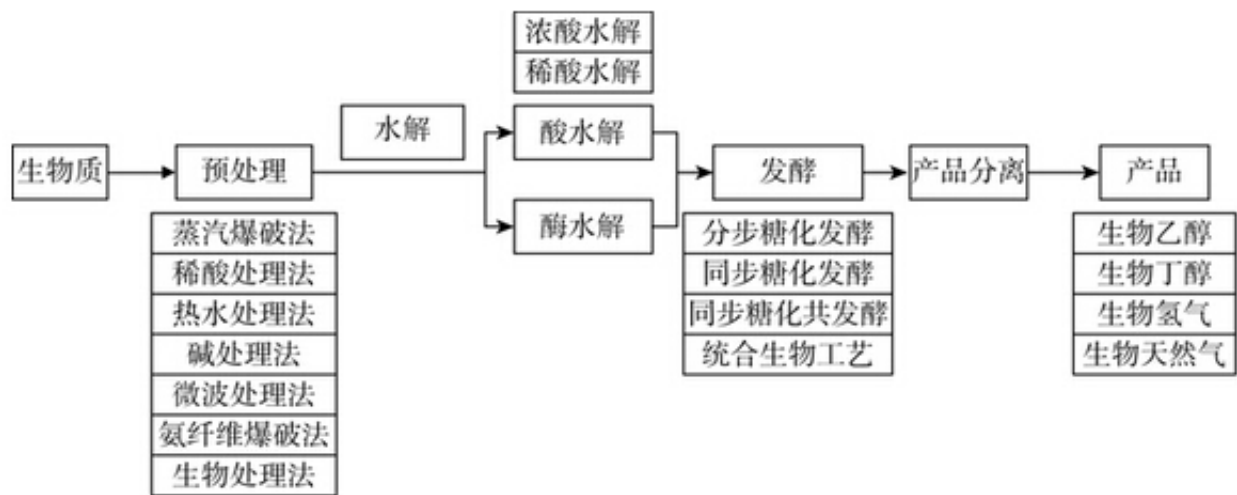


图4 生物质能源转化的生物技术路线

好的发酵工艺不仅要有生产性能优良的菌株，还要有合适的发酵条件和设备，才能使生产潜力充分表达出来。与目前发酵工业上常用的液体深层通风发酵相比，固态发酵凭借其低成本、高产出、低能耗及低发酵有机废水污染等优势，日益受到关注。然而固态发酵中的纯种培养、基质传质和传热、发酵参数的调节与控制等一直是有待解决的难题。陈洪章基于对化工原理的深刻认识，强调生物信息传递在固态发酵生物反应器设计中的重要性，认为生物反应器是一个由生物系统和环境系统组成的特定生态系统^[15]，提出了气相双动态固态发酵的新过程。此过程中没有加入机械搅拌，而仅对固态发酵过程的气相状态进行控制。

一方面，气压处于上升和下降的脉动中；另一方面，反应器的气相也处于流动中，改善了固态发酵过程的热量传递和氧传递，促进了菌体的生长和代谢，解决了传统固态发酵难以纯种大规模培养的问题，并且使发酵过程中的温度、湿度可控，发酵水平提高2~3倍。目前已经设计出了100m³的固态发酵反应器，这是迄今全球最大的固态发酵规模，真正实现了纤维素酶大规模、低成本的生产。使用气相双动态固态发酵反应器，以汽爆玉米秸秆为发酵的主要原料进行纤维素酶的生产，经过5批实验，平均纤维素酶活达到了120FPA/g干曲，最高达到了210FPA/g干曲^[16]。

生物质转化生物基产品的过程中，一般需要许多个生产环节，才能得到目的产品。通过过程整合将反应或分离步骤中的不同方法集成在一个反应器或一个工艺步骤中，可以简化工艺流程，提高生产效率。此外，在生物质的生物转化过程中，往往只注重开发主发酵产品，而忽略了发酵过程中副产物的利用，如果能够通过产品生产工艺的整合，使更高价值的化学品作为生物燃料的联产品，将显著提高整个发酵生产的经济效益，将更吸引投资者的关注，这是相关研究需要注意的。

3.4化学转化的路线

生物质资源是替代化石类资源的理想选择，但由于其元素组成、化学键型、化学成分等十分复杂，使其从固体原料到固体或液体产品的转化过程要难于传统的石油炼制过程（图5）。生物质化学转化技术成为达到CO₂减排和能源可再生目标的生物质产业化的一条重要途径，已成为世界各国研究的热点，其中热化学转化是应用研究的重点^[17]。

在众多生物质能

源的转化方式中，热化学定向转化制

备燃气和合成气技术是极具发展前景的方式^[18]

。生物质的热化学转化利用主要包括直接燃烧、热解、气化和液化等。国内外研究者普遍认为气化和热解工艺是最为有效的生物质热化学制备燃气、合成气的方法^[19-20]。

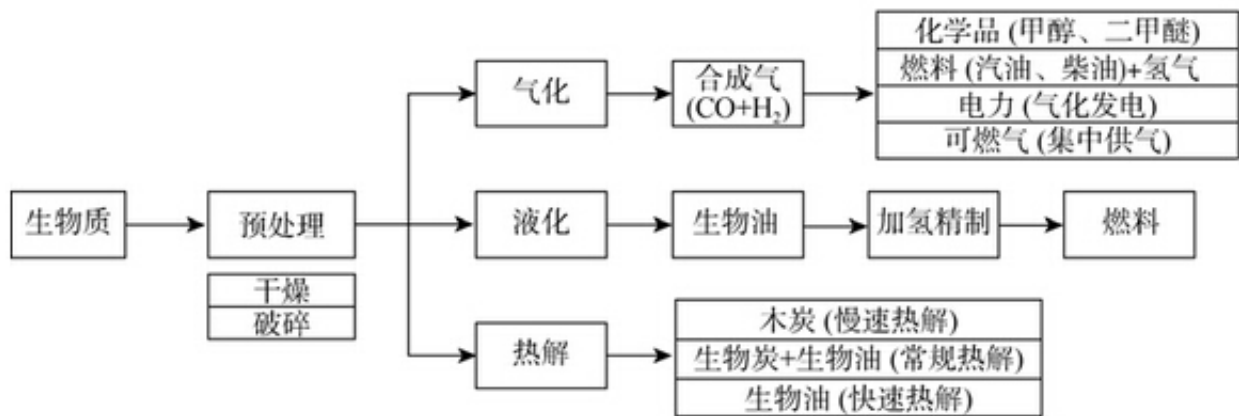


图5 生物质的热化学转化技术路线

虽然不同生物质气化、液化、热解的转化方式、转化效率、产物各不相同^[21]

，但都是在一定的条件下将生物质高分子（纤维素、半纤维素、木质素）裂解，切断生物质大分子键，使之转变为小分子的物质。

生物质的气化、液化、热解是大规模利用生物质的有效方法之一^[22]

。由于生物质属于高分子化合物，原料组成差异很大，热化学转化产物组分很复杂，国内外对于生物质的热化学转化的关键技术虽有所突

破，但目前液化、热解还没有实现工业化

。生物质气化供气技术已基本成熟^[23]

，秸秆气化集中供气工程所产生的燃气被应用于管道煤气和天然气普及不到的农村或小城镇，为用户集中供应炊事、取暖用能，对于增加农村能源供给、改变农村炊事结构、改善农村卫生条件、减轻环境污染、构建节约型社会和社会

[24]。

4前景和展望

生物质产业的发展前景非常广阔。在分层多级定向转化的炼制思路下，可以综合利用生物质的不同成分与中间产物，使得生物质原料的价值最大化。相关企业在兼顾环保的同时，可获得高盈利空间和生产灵活性，可以依据市场变化改变产品组成，来获得最大的经济回报。笔者所在的课题组经过二十多年的研究探索，应用和发展低压无污染蒸汽爆破技术、新型大规模固态纯种发酵技术、酶解发酵分离多级耦合技术等关键技术平台，解决生物质高效转化的技术瓶颈，实现了秸秆资源的生物量全利用，并对多产品的生态产业链进行试验开发，目前已经建立了纤维素酶、生物乙醇、低聚木糖、蛋白饲料、生物农药和清洁制浆造纸等生态产业化的实施案例。在能源替代、生态环境和发展经济三大要素拉动下，在市场与政府的双重努力下，生物质产业发展的春天即将到来！

参考文献

- [1] 陈洪章. 生物基产品过程工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 2 – 14.
- [2] Demirba A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals[J]. Energy conversion and Management, 2001, 42(11): 1357 – 1378.
- [3] 农业部科技教育司. 全国农作物秸秆资源调查与评价报告[R]. 北京: 农业部, 2010.
- [4] Hii K L, Yeap S P, Mashitah M D. Cellulase production from palm oil mill effluent in Malaysia: Economical and technical perspectives[J]. Engineering in Life Sciences, 2012, 12(1): 7 – 28.
- [5] Petroleum B. BP statistical review of world energy June2011 [R/OL].(2011)[2012-07-10]. www.bp.com/statisticalreview.
- [6] 石元春. 中国生物质原料资源[J]. 中国工程科学, 2011,13(2): 16 – 23.
- [7] 吴创之, 周肇秋, 阴秀丽, 等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报, 2009, 40 (1): 91 – 99.
- [8] 陈洪章, 李佐虎. 纤维素原料微生物与生物量全利用[J]. 生物技术通报, 2002, 2: 25 – 29.
- [9] 陈洪章, 王岚. 生物基产品制备关键过程及其生态产业链集成的研究进展: 生物基产品过程工程的提出[J]. 过程工程学报, 2008, 8(4).
- [10] 霍丽丽, 孟海波, 田宜水, 等. 秸秆固体成型燃料与颗粒饲料的对比[J]. 中国农学通报, 2011, 27 (8): 328 – 333. [11] 陈嘉川. 造纸植物资源化学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1 – 44.
- [12] 刘海燕, 于建宁, 鲍晓军. 世界石油炼制技术现状及未来发展趋势[J]. 过程工程学报, 2007, 7 (1): 176 – 185.
- [13] Himmel M E, Ding S Y, Johnson D K, et al. Biomass re-calcitrance: engineering plants and enzymes for biofuels production[J]. Science, 2007, 315 (5813): 804 – 807.
- [14] 李宏强, 陈洪章. 纤维素生物转化过程工程的研究[J]. 生物产业技术, 2010, 1: 40 – 46.
- [15] 陈洪章, 李佐虎. 固态发酵新技术及其反应器的研制[J]. 化工进展, 2002, 21(1): 37 – 39.
- [16] Chen H Z, Qiu W H. Key technologies for bioethanol production from lignocellulose[J]. Biotechnology advances, 2010, 28 (5): 556 – 562.
- [17] Goyal H, Seal D, Saxena R. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12 (2): 504 – 517.
- [18] Cantrell K, Ro K, Mahajan D, et al. Role of thermo-chemical conversion in livestock waste-to-energy treatments: obstacles and opportunities[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46 (26): 8918 – 8927. [19] Damartzis T, Zabaniotou A. Thermochemical conversion of biomass to second generation biofuels through integrated process design: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15 (1): 366 – 378. [20] Kersten S R A, W P M van Swaaij, Lefferts L, et al. Options for catalysis in the thermochemical conversion of biomass into fuels[J]. Catalysis for Renewables, 2007, 22: 119 – 145.
- [21] 马隆龙. 生物质能利用技术的研究及发展[J]. 化学工业, 2007, 25(8): 9 – 14.
- [22] 蒋剑春. 生物质能源转化技术与应用() [J]. 生物质化学工程, 2007, 4(03): 59 – 65.
- [23] 徐春霞, 徐振刚, 步学朋, 等. 生物质气化及生物质与煤共气化技术的研发与应用[J]. 洁净煤技术, 2008, 14(2): 37 – 40.
- [24] 高春雨, 李铁林, 王亚静, 等. 中国秸秆气化集中供气工程发展现状 存在问题 对策[J]. 安徽农业科学, 2010, 4:

2181 – 2183.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/85136.html>