

生物质能源概述

马常耕苏晓华

(中国林业科学研究院林业研究所，北京100091)

摘要：生物质能源是倍受世界各国重视的可再生能源。文中介绍了生物质能源的优越性、多种转化技术体系、类别及性能。还着重介绍了木本植物营养体中的组成成分，指出集约经营短轮伐期乔灌木能源林是发展生物质能源的基础。同时针对世界生物质能源树木遗传改良研究现状和存在的问题，提出了我国生物质能源研究的建议。

1 生物质能源的优越性

在包括太阳能、地热、风能、水能(水流、潮汐、热对流等)和生物质能的各种可再生能源中，相对来讲生物质能源的地区性限制和可控制性均比其他种类的再生能源有更多优势。凡是有阳光和水的地方均可通过人工集约培植获得生物质，并以多种形式将其转化成清洁、便于贮藏、运输的可再生能源。由于其比较优势较多，生产成本又低，所以近数十年来倍受世界各国重视。

我国在2005年2月28日颁布了中国可再生能源法，其中第4条规定：国家将可再生能源的开发利用列为能源发展的优先领域。第12条又说：国家将可再生能源开发利用的科学研究和产业化发展列为科技发展与高技术产业发展的优先领域。这充分体现了可再生能源的开发将成为我国基本能源国策。生物质能源比其他几种再生能源有更大的群众参与性、多形式的可转换性和相对较少的开发投入性，这是在多种形式的再生能源中生物质能源被国家优先给予考虑的原因。从全世界范围看，生物质能源利用在各种形式的可再生能源利用的总份额中所占比重也最大，北欧一些国家已有大范围把生物能源转化成电力的经验。

概括起来，生产生物质能源时要吸收大量温室气体，有利于改善环境，生物质能源材料虽因含氧量高，燃烧值低(只相当煤的1P2，燃油的1P3)，但热解时挥发分高，可大量转化成高值热能。还由于其N，S含量比煤、燃油低，属于清洁和环境友好型能源，故应加强生物质能源的研究。

2 生物质能源的多种转化技术体系

概括起来，生物质能源转化技术和产品如图1所示。

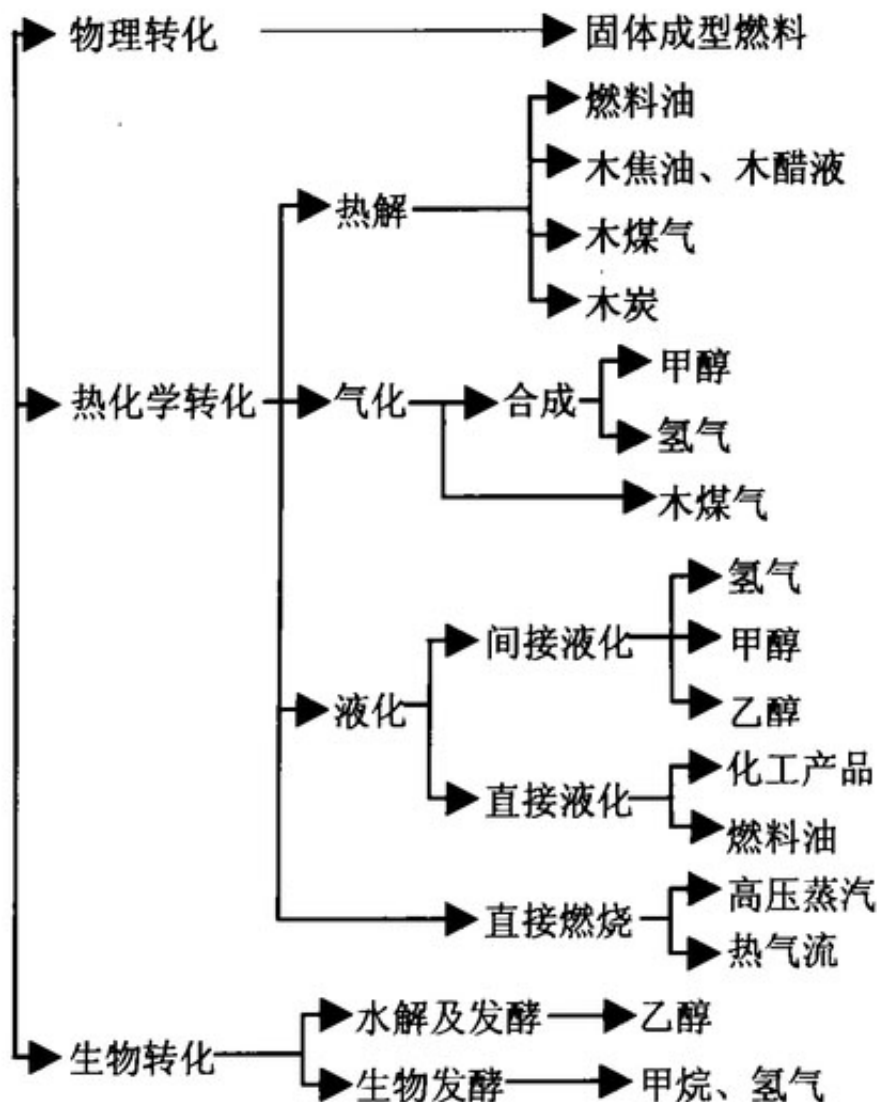


图 1 生物质能源转化技术和产品

气化：在高温缺氧下与气化剂反应生成小分子可燃气体。

液化：用热化学方式将生物质转化成液体，其中间接转化法是将生物质先热解成气体，然后再液化，或者用水解和生物发酵相结合的方法，把生物质中的纤维素及半纤维素首先转化成单糖或多糖，再经发酵形成酒精，而直接液化法是在高温高压下通过催化剂生成液化油，以供作汽车燃料。

热解：是在少量给氧或不给氧的热力作用下，使生物质分解转化成气、液和固体三相物质。其中气、液相物质可制成燃料油，固体则为木炭。

固化：在高压下通过生物质中木素的塑化粘合把疏松的生物质压成密度极高的成型材料，以便利用、运输、贮藏和高效率的燃烧。

生物发酵：是最古老的，也是最新的一种生物质能转换技术，传统的有发酵制酒和沼气。近代用产氢细菌发酵产氢，无需光源，可连续稳定产氢。由于氢是最清洁能源，故产氢菌发酵制氢工艺倍受关注，并获得实用成果。相关菌种的筛选和遗传改造是生物转化研究的热点之一。

在现今化石燃料紧缺和价格居高不下的情况下，生物质的热解气化、液化和发酵制氢等已成为工艺研究的重要领域之一，为生物质能源开拓了广阔前景。

3 生物质能源的类别及性能

粗略地依能源主体特性把生物质能源原料分成：

- (1) 草本植物——低密度营养体的利用。
- (2) 木本植物——木质营养体的利用。
- (3) 富含油植物——种子或营养体中富含油脂物质的利用。
- (4) 富含糖植物——种子或营养体中富含淀粉、糖类的利用。
- (5) 动物(家畜、家禽)粪便——消化后的残存体，成分因动物而异。

这5种生物质能源原料中所含成分，基本上可分成如下几类：它们对能的转化技术有不同的相宜性，因而主体转化产品也有不同。

(1) 灰分：由矿物元素组成，但不同植物的组成元素可有较大不同，如禾本科草类不仅含灰分比木本植物高，且其中 SiO_2 更多。

(2) 多种挥发物质：各种芳香族挥发油、萜烯类。

(3) 木素：主要为碳氢化合物，属聚酚类三维网状高分子聚合物。苯丙烷为其基本结构单元，又分3种基本结构，即愈创木基(针叶树木素的主要组成)、紫丁香基(阔叶树木素的主要组成)和对羟苯基(禾草类)。木素本身属难热解物质，热解时得炭率高，它又影响纤维素的水解。

(4) 碳水化合物为基础的纤维素：纤维素为不溶于水的均一聚糖，其基本结构单元为D-吡喃式葡萄糖基(脱水葡萄糖)，由成百成千这种葡萄糖基聚合而成。分子式为 $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ ，与木素比，它含较多的氧元素，更适合水解发酵生产酒精，直接燃烧时热值低。

(5) 半纤维素：是植物原料中除木素、纤维素、果胶以外含量较高的一种不均一聚糖，由2种或2种以上的单糖结合而成，以聚戊糖为代表。主要结构单元有LD-木糖基、D-甘露糖基、D-葡萄糖基、D-半乳糖基和L-阿拉伯糖基等，一般阔叶材和草本植物中的半纤维素高于针叶材，针叶材的木素含量又高于前者，故针、阔叶材的能转化产品不同，最适合的转化技术方法也不相同。在热解中纤维素和半纤维素的得炭率低于木素，而溶解焦油得率却高些。

4 木本植物营养体中的组成成分

生物质能源以木本植物为主体，所以有必要了解木材的主要组分：

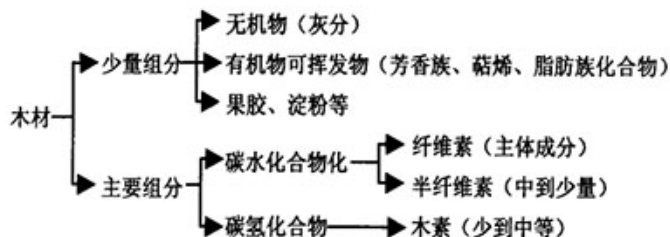


图2 木材的主要组分

表1 3类主要生物质原料的组成特点

成分	针叶材	阔叶材	草木植物
纤维素	45	45	42
半纤维素	25	34	40
其中：			
葡萄糖-甘露糖	16	5	0
木糖	9	25	33
木素	29	21	17
灰分	110 以下	110 左右	11010 以上

通常，树木干材的纤维素多于树枝和树皮。糖及各种提取物又低于树枝和树皮，所以树皮相反，灰分木素、聚戊糖、聚甘露糖、聚半乳 在材积中所占比例影响生物质能的转换效果。

表2 木材主要成分的元素构成（干重）

组分	C	H	O	N	S	灰分
纤维素	401.82	71.31	511.42	01.42	01.00	01.00
半纤维素	401.13	61.85	521.49	01.53	01.00	01.00
木素	561.89	51.75	341.7	21.66	01.00	01.00

表3 不同树种木素热分解的产物比较（干重得率）

产物名称	松木	云杉	杨木
木炭	501.64	451.66	441.30
反应水	151.75	291.15	301.50
酸类	11.29	11.28	11.28
甲醇	01.90	01.83	01.87
丙酮	01.29	01.18	01.27
气体	141.00	81.04	71.05
木焦油	131.00	131.83	141.25
损失	41.13	11.03	11.48

表4 纤维素和木聚糖（半纤维素）热解的产物比较（干重得率）

产物	纤维素	木聚糖	邻乙酰基木聚糖
木炭	51.0	101.0	101.0
反应水	111.0	71.0	141.0
乙醛	11.5	21.4	11.0
呋喃	01.7	痕量	21.2
甲醇	11.1	11.3	11.0
糠醛	11.3	41.5	21.2
CO ₂	61.0	81.0	81.0
焦油及损失	661.0	641.0	491.0

* 由于纤维素和半纤维素均属高聚糖，所以热解产物近似。

5短轮伐期集约经营乔灌木能源林是发展生物质能源的基础

生物质能源材料虽多种多样,但主要仍为2大类,即工农业生产的废弃物和有目的人工培植的能源林。后者虽然比前者成本高,但由于生物质生产过程会吸收大量工农业生产所排放的CO₂,又有水土保持、污染土壤生物修复及景观维护等效应,所以环境-生态效益大于其他形式的可再生能源。它集环境、资源和经济效益于一体。故在条件允许的情况下,应优先开发木本生物质能源,树种则以广适性、低经营成本的为宜。

人工专门培植生物质能源的最基本目标是单位面积和单位时间有最高生物量的产出,即低成本生物质能源原料的获得,故在相当长一段时期,研究者都把寻找更适合做能源经营的树种和如何提高其生物质产量作为研究的重点。而利用研究则集中在转化技术和工艺方面。这2方面均已取得巨大成就,但本文将不对此加以引述。目前存在的关键问题是,转化加工工艺的产业化和比较经济效益的不断提升,使生物质能源由理论的可能性过渡到产业化可行性方面来。

我国过去曾有薪炭林方面的研究,内容着重生物量的高产栽培技术和模式,用途也限于薪柴利用,当属狭义的生物质能源研究。今后应强化高水平转化利用树种的选择和产量提高及品质的改良。

6生物质能源树种的遗传改良问题

国内外在该领域的研究还相当有限,所涉及的树种更少。在生物质能源发展的早期,学者们把主要注意力放在相应树种的选择和通过集约栽培提高单位面积年生物量生产力方面,但以后的研究发现,在生物质液体和气化燃料转化利用中,原料的化学和物理学性质有重要意义,即生物量加工的效率极大地受对原材料的化学和物理学性质的认识和开发水平的影响。由遗传性决定的原料性质(组成成分)影响着所有的转换加工工艺和目的产品。生物化学加工转化主要受原料的化学性质的影响,物理性质则更多影响着热化学的转化加工,如原材料的密度、原料中硫和无机固体物含量对生物化学和热化学转化均有影响。木质密度影响着单位材积中碳水化合物生产潜能,后者影响到环境的污染和废弃物产品。高水分含量原料对生物化学转化加工有益,低水分含量原料对热化学转化加工更好些。低木素含量,特别是创木基对紫丁香基的比率低的木素,提取物低及灰分含量低的原料更适合生物化学转化工艺,对热化学转化则关系不大,原料的能含量与木素和提取物含量密切相关,这2类含量高的原料更适合直接燃烧利用。

概括起来,在生物质能源的遗传改良中要考虑如下几个性状:树皮和木材的比率;纤维素含量;提取物含量;木材比重;木素含量;热值等。

6.1树皮与木材的比率

树皮和木材比率之所以重要,在于二者的化学成分含量有很大不同,这可以杨树为例(表5)。

研究认为,树皮与木材的比率受遗传和造林措施双重影响,在对110个杨树杂种无性系1年生萌条的研究中看到,此比率变动在18%~33%,此比率与树体大小呈指数降低。在20个柳树无性系的1年生萌条上看到,树皮-木材比率变动为22.2%~40%,年均均为28.3%,树皮含量在无性系内变异较小。

6.2木材比重

在材积一定的情况下,木材比重与干物质产量成正比。研究看到,木材比重的遗传力甚高,在杨树上看到18个3年生杂种杨无性系的木材比重变动范围为0.272~0.368gPcm³,平均为0.334gPcm³

。在另一项对35个2年生杂种杨的研究

中看到,木材比重变动在0.234~0.341gPcm³

。在有75个美洲黑杨3年生材料的研究中,木

材比重变动在0.27~0.39gPcm³,平均0.33gPcm³

。在柳树上也看到,无性系1年生木材比重的位次连续3年内是稳定的,尽管年龄对木材密度有很强影响,即树龄、枝龄越高,比重也越大。

研究看到,美洲黑杨75个无性系3年生条的木材比重广义遗传力为0.62,30个美洲黑杨半同胞木材比重的狭义遗传力为0.747,因此应把木材比重作为一个育种目标来考虑。

6.3热值

木质生物量的直接燃烧在目前仍是生物量利用的主体, 所以其热值就成为重要的研究性能, 在控制条件下完全燃烧所产生的热为高热值, 这是文献中常论述的指标, 由传统燃烧所产生的热值属低热值, 就目前文献资料看, 众多树种的热值相似。

在10个杂种杨的研究中, 气干材热值变动在18.2~20.7KJ/g(即4347~4944kcal/g)。差别达14%。还看到, 以美洲黑杨为亲本时, 热值比以银白杨为亲本时高些, 但也有学者在30个杂种杨和35个柳树无性系的热值研究中未看到无性系间有很大差别, 柳树只有3%的差异。不过遗传力却高达 H^2

=0.74, 在用相同无性系(杨)所进行的不同种植密度研究中也未看到热值有大的差异, 证明了本性状的遗传稳定性。

6.4 提取物

提取物虽然在木材和树皮中都属微量成分, 但它们在生物质能量的决定中却起着重要作用。它们对制浆有不利作用。在所做的75个幼龄杂种杨无性系的提取物测定中看到, 提取物含量变动在17%~26%, 含量之所以如此高可能与幼龄萌芽条的树皮比率相对较高有关。成龄毛果杨和香脂杨无树皮木材的提取含量研究看到, 毛果杨的含量明显低于香脂杨的含量, 心材和边材皆如此。香脂杨边材中的提取物含量要高于心材中的, 但未看到提取物含量有树高和树龄上的变化模式。在刺槐上也未看到总提取物含量有因树高而产生的变化, 不过苯-醇提取物及热水提取物却因树高而不同, 前者与树高变化成反相关, 后者则成正相关。

对13个成龄美洲山杨无性系的研究看到, 提取物含量变动在3.4%~4.9%, 在各种杨树中看到此性状的无性系间变异达13%, 不过遗传力却不高。还看到提取物含量与生长快慢成负相关, 所以选择速生基因型会导致提取物含量的下降。

在柳树上看到, 柳树无性系间木材的总提取物含量差异不显著, 平均约10%。但不同提取物成分却存在差异。树皮的总提取物含量变动在31%~39%, 无性系间有显著差异。

在杨树杂种中看到, 提取物含量与组织类别和组织年龄相关, 树皮达41%, 带皮材为11%, 木材中只5%。含量又与组织年龄成负相关。同时还看到提取物含量与立地有互作, 劣质立地(生长慢的)提取物含量比生长快立地上的要高些。

看来有可能通过选择育种改良提取物含量水平, 不过由于其遗传力低, 遗传增益可能不会很大。

6.5 纤维素类

综纤维素是人们希望通过能转换由木材得到乙醇燃料的关键成分, 而A-纤维素对制浆造纸又最关键。因此相对于木素、提取物和灰分含量讲, 生物质原料中这2种多糖物质对单位生物质可能产生的乙醇和纸浆至为重要。

有报道说, 毛果杨无性系的综纤维素含量变动在79.3%~85.7%, A-纤维素变动在39.8%~50.1%。而所研究的16个柳树无性系的A-纤维素含量变动在36.12%~41.56%。树皮中的综纤维素含量很低。在杨树萌芽条材生产中看到, 优质产地生长的杨树含的A-纤维素要高些, 但不同伐轮间含量差异不显著。总的讲, A-纤维素和综纤维素含量对立地敏感性大, 也不受造林株行距的影响。在75个3年生美洲黑杨无性系的研究中, 综纤维素含量的变异值约为A-纤维素的1/2, 且广义遗传力也仅0.08, 所以认为, 对综纤维含量作育种改良是无效的; 而A-纤维素的遗传力可达0.34, 对它改良还是可能的。2种纤维素含量都与木材比重成正相关, 但表型相关都很低, 表明环境对这2个性状有强烈影响。

结晶纤维对非结晶纤维的比例, 对原料是否适合生物化学转换是纤维素特征中最为重要的。葡聚糖和木聚糖的量是控制木质生物量酶水解成乙醇中最关键性的生物质性状, 找到有高纤维素和淀粉含量的物种, 对提高由生物质得到可发酵糖量是重要的, 但也看到这些性状可能与不需要性状间存在相关。对18个亲本不同的杂种杨无性系的各种木糖含量研究看到, 除半乳糖之外, 无性系在其他类的糖含量上均有明显差异。与A-纤维素含量有很强度相关的葡萄糖浓度变动在42.3%~51.16%, 平均46.8%, 而作为半纤维素含量指标的木糖浓度变动在16.7%~21.5%, 平均19.5%。以欧洲黑杨作为亲本之一时葡萄糖浓度明显低些, 但也有一组欧美杨的木糖浓度低。尽管也看到无性系间在阿拉伯糖和甘露糖含量上变幅甚大, 但从育种角度看其值还太小。就现有的文献资料看, 由于综纤维素和A-纤维含量变化值不大, 所以通过育种能获得的遗传增益是小的。

6.6 木素

木素中含高比例的碳元素, 且在木质生物量中其含量又较高, 所以它对原料的能含量是重要的, 但由于它包围在纤

纤维素之外,却又影响生物质的水解效率。故木素的含量对原料的能转换和化学提取加工物有一定影响。

一般白杨派木素含量低,故纤维素含量要高于黑杨派。在杨树和柳树的不同无性系中都看到木素含量上的较大遗传变异,所以在育种项目中木素是个要考虑的性状。但有学者看到美洲黑杨、美洲山杨、大齿杨和银白杨的天然成龄材,以及众多5~6年生杂种杨的木素含量变幅有限,因而认为遗传增益是有限的。对13个不同种的柳树无性系所作的研究表明,总木素含量变动在22.1%~28.3%,平均25.7%,其中酸不溶木素(Klasson)的变幅为19.8~26.1%,酸溶木素的变幅为2.1%~2.3%。可见同种不同无性系和不同种柳树的木素含量存在明显变异。研究所用无性系(基因型)的多少和它们起源多样性程度均影响到所测成分差异的程度。所以很难由已发表的论文来肯定木素性状改良的可行程度,研究还未看到木素含量与木材比重间有什么相关关系。

6.7其他

对100个杂种杨无性系的1年生萌条灰分含量的分析看到,木材和树皮混合样中的灰分含量变动在115%~313%,存在明显的无性系间变异。但由于因立地间养分可得性不同,此性状可能存在基因型与环境间的互作。也看到无性系在硫含量上有3倍之多的无性系间变异,即在0.387~0.969mgPg。无性系间氮含量差异也在2倍左右,即5.0~10.89mgPg。由于有如此高的变幅,可以推断能选育出营养高效和低污染性能的杨树无性系。在若干杂种杨木材液化时所生成的木油中含有非常高的单酚物质,在以欧洲黑杨为亲本的一些无性系中单酚物质含量高达17%,而一般阔叶材中此物质含量低于5%。此等高单酚物质含量意味着可提取它用以生产粘合剂、塑料等,使原料产生的经济价值会更高。

由于杨树木材用于制浆造纸的比较效益可能比作生物质能源要大,所以把杨树作为能源树种能否被市场接受应加以考虑。

7我国生物质能源研究的若干考虑

我国地域辽阔,气候多样,植物种类十分丰富,不同气候区和立地应有各自最适宜的乔灌木能源物种,不能像欧美一些高纬度地区国家受树种局限。在物种选择上要乔、灌、草并重,因地制宜。在能源林经营模式上也要以面积广的粗放经营和小面积上集约经营并举。在现阶段大面积粗放经营应占较大比重,采用什么树种和经营模式要以经济收报为指导原则。

一次种植、多次多年收获的萌芽作业体系应是能源林的主体方式,萌发力应是树种和基因型选择的重要依据。要依经营能源林的树种特性,特别是生物质的化学和物理特性,为其选配最有效率的能转换方式,所以能源转换方式研究也应是多样的。

生物质能源树种的遗传改良在我国还是一个空白,它在整个生物质能源开发中的地位应加以探讨。当务之急是先为各生态区选定一批能源树种,然后开展种内相关性状的遗传变异研究,以了解其改良的潜力和确定改良策略。除与能量直接有关的性状外,抗逆、广适和强生长势及高生产力依然是研究改良的重点性状。这项研究也必须与能转换技术开发者密切协作,深入认识生物质材料的化学和物理性能与未来能转化产品的产量和质量以及最佳转化技术的关系。同时也要找到快速高效评价生物质原料能量的技术,把市场、实用性和比较效益作为研究的起始点和落脚点。

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/86370.html>