

纤维素乙醇发展的现状与对策

于 婷, 傅永福

(中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘 要:纤维素乙醇是一种清洁且资源丰富的可再生能源。发展纤维素乙醇是解决我国能源安全、生态环境保护和三农等问题的重要切入点之一。综述了目前国内外对生物乙醇的开发利用现状,同时提出了提高纤维素乙醇产量的方法,包括提高能源植物的生物量和品质,并指出纤维素乙醇发酵过程中存在的问题。

关键词:纤维素乙醇;生物乙醇;生物量;能源作物

中图分类号:TK6 文献标识码:A 文章编号:1008-0864(2008)S1-0035-06

The Situation and Strategy of Cellulosic Ethanol Development

YU Ting, FU Yong-fu

(Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China)

Abstract: Cellulosic ethanol is a clean, resourceful and reproducible energy. Application of cellulosic ethanol will be one of the important ways to meet the challenges of energy safety, ecological protection and issues concerning agriculture, countryside and farmers in China. The current application of the bio-ethanol researches at home and abroad are summarized; the methods of increasing the yield of cellulosic ethanol by increasing the biomass and improving the quality of energy plants are put forward; the problems in the fermentation process of cellulosic ethanol are also pointed out.

Key words: cellulosic ethanol; bio-ethanol; biomass; energy crops

能源作为现代社会赖以生存和发展的基础,受到世界各国的广泛关注。目前,石油、煤炭、天然气等化石燃料在价格不断上涨的同时,正面临资源枯竭的危险^[1]。由于我国石油储量有限,大量进口石油必然对我国的能源安全造成威胁^[2]。化石能源在生产和使用过程中所排放的二氧化碳和二氧化硫给人类社会带来了环境恶化的威胁,造成全球变暖。鉴于以上种种原因,开发利用可替代能源迫在眉睫。生物能源以其环保、可再生、资源丰富等优点已成为一种重要的替代能源。

1 发展纤维素乙醇的意义

生物能源主要有生物柴油和生物乙醇等形式。生物柴油与普通柴油相比,具有可再生、易于生物降解、燃烧污染物排放低、温室气体排放低等

特点。但生物柴油仍存在一些缺点,比如以菜籽油为原料生产的生物柴油成本高、用化学方法合成生物柴油工艺复杂、能耗高、设备投入大、酯化产物难于回收、回收成本高等。生物乙醇以淀粉质(如:玉米、马铃薯、大麦、大米、高粱等)、糖质(如:甘蔗、甜菜、糖蜜等)、纤维素(如:农作物秸秆、森林采伐和木材加工剩余物、柴草、造纸厂和造糖厂含有纤维素的下脚料、生活垃圾的一部分等)为原料,经过一系列物理、化学、生物化学过程转化为乙醇。其燃烧所释放的二氧化碳量等于通过光合作用和酒精发酵所固化的二氧化碳量,因此生物乙醇是一种高效清洁的可再生能源。

以玉米、红薯等为原料生产的生物乙醇虽然属于环保能源,但玉米和红薯是人和动物食物的重要来源,而且其生产需要占用良田才可能高产。因此,利用玉米和红薯生产生物能源会引起“与

收稿日期:2008-02-19;修回日期:2008-04-09

基金项目:中国农业科学院杰出人才基金项目资助。

作者简介:于婷,硕士研究生,研究方向为植物发育与分子生物学。通讯作者:傅永福,研究员,从事植物发育机制研究。Tel:010-62136045; E-mail: fufu19cn@163.com

人争粮、与粮争地”的问题,近年来出现的食品价格上涨的原因之一就是大量的玉米被用于生产乙醇。以玉米、红薯为原料生产生物乙醇对于我们这样一个人口众多、粮食紧张的大国来说显然不是长远之计。总的来看,生物能源中以纤维素乙醇最有前途,因为纤维素乙醇相对于生物柴油具有资源丰富、再生周期短、成本低、CO₂和SO₂等有害气体零排放、价格低等众多优点,更重要的是用于生产纤维素乙醇的能源作物对土地的适应性较强,在很多未开发利用的荒山荒地都可以种植,这样就不会引发粮食问题,也避免了资源枯竭的威胁,使能源保持持续稳定的发展,这对于满足社会能源需求以及维护能源安全具有十分重要的意义。

种植能源作物(如:柳枝稷等)具有诸多优点。第一,可以减少土壤流失,有利于保护生态环境。第二,通过形成可持续循环的能源利用方式,减少温室效应。能源作物通过光合作用可以吸收大气中的CO₂,将其转化为能量储藏,并进一步被开发利用,从而良性消耗了社会经济发展与生活中产生的温室气体。第三,能源作物可以作为动物的饲料,而它们的生长区又可以作为动物的栖息地。因此,生物乙醇的利用有助于建立资源节约、环境友好型社会。第四,能源作物的种植离不开土地,劳动又需要人力,发展能源产业又会带动其他相关产业,如运输业、服务业等,因此发展生物能源可以提高农民的就业机会并增加农民的收入,促进产业结构的调整,加速农村城镇化和工业化进程。

2 国内外生物乙醇开发利用现状

2.1 国外生物乙醇开发利用概况

在乙醇燃料应用领域,以甘蔗生产燃料乙醇的巴西处于绝对领先的地位。2003年和2004年,由于大力发展乙醇燃料,乙醇燃料比汽油便宜45%,这极大促进了巴西双燃料汽车的销售,到2005年,新车销售中双燃料汽车的比例已高达70%。乙醇燃料的迅速应用改变了巴西的经济结构,由于巴西不再需要进口石油,仅这一项费用就为国家节约690亿美元的外汇,这些资金应用于巴西国内经济,使一些农村因种植甘蔗而迅速致富^[3]。

美国主要应用玉米生产燃料乙醇。目前的加油站只需做少许改动就可以加乙醇燃料,每辆汽车只需花200美元的改装费就可以使用乙醇汽油。ADM公司由于看中乙醇燃料的广阔前景,已向该行业进行了巨额投资,成为美国最大的乙醇生产厂商,每年生产超过37.85亿L乙醇。另一家包括比尔盖茨在内的风险投资则计划投资26亿美元建造乙醇燃料的生产工厂,仅此一项投资将为美国增加40%的乙醇生产能力。当然美国政府是乙醇燃料行业的最大支持者,美国政府规定,乙醇生产厂家每生产3.785L乙醇就可以享受税款51%的退税优惠,仅此一项,乙醇生产厂家5年内就可以增加70亿美元的收入,因此大大刺激了生产厂家的积极性,也大大降低了乙醇燃料的生产成本,从而推动了乙醇燃料的迅速推广^[4]。

木质纤维素是地球上最丰富的可再生资源,据估计木质纤维素原料占世界总生物质量的50%,由木质纤维素生物转化成的燃料乙醇越来越引起世界各国的广泛关注。据美国能源部门预测,到2015年可以解决现有的技术和经济问题,实现纤维素乙醇工业化生产。2002年美国能源部和诺维信公司合作,投资1480万美元,研究把纤维素和半纤维素酶解为可发酵糖,再发酵制取乙醇。到2005年,其关键技术纤维素酶有了突破,生产3.785L燃料乙醇所需纤维素酶成本从5美元降至0.05美元^[5]。低成本价的纤维素酶不再是发展纤维质水解制取燃料乙醇的制约因素,由此可以推测纤维质原料生物转化燃料乙醇工业化的进程有望提前。目前,全世界已经有几十套纤维质原料经纤维素酶水解成单糖的中试生产线或小试生产线,大部分是以乙醇为最终主产品。

2.2 中国生物乙醇开发利用现状

目前,我国已有很多企业和科研单位都在合作开发生物乙醇。河南天冠集团在利用秸秆生产乙醇方面取得重要进展,在实验室条件下利用秸秆生产乙醇的原料转化率可以达到18%以上。近几年,天冠集团先后与山东大学、清华大学、华中科技大学、浙江大学、河南农业大学等院校进行交流合作,拥有了多项利用秸秆生产乙醇的关键技术。山东大学承担的“酶解植物纤维工业废渣生产乙醇工艺技术”项目,成功开发了木糖-乙醇联产工艺,实现了生物质资源的综合及高值利用。

甜高粱秸秆制取无水燃料乙醇工程项目于 2006 年 9 月底在新疆南部莎车县启动。甜高粱秸秆制取的无水燃料乙醇部分功能可代替石油,且价格成本比市场上使用的 93 号汽油价格成本要低。莎车县与浙江浩淇生物新能源科技有限公司合作共同开发的甜高粱秸秆制取无水燃料乙醇项目建成后可使莎车县 4 个乡镇近 1 333 hm² 的甜高粱秸秆得到综合利用,农户种植甜高粱每 hm² 可增收 2 250 ~ 3 000 元^[6]。

针对近来部分地区发展生物乙醇燃料的过热倾向和盲目势头,我国于 2006 年 12 月一个月间下发“发改工业 [2006] 2781 号”及“发改工业 [2006] 2842 号”两个文件通知——《国家发展改革委关于加强玉米加工项目建设管理的紧急通知》及《国家发展改革委、财政部关于加强生物燃料乙醇项目建设管理,促进产业健康发展的通知》,要求各地不得盲目发展玉米加工乙醇能力,还要对玉米加工项目进行清理。由这两项《通知》可以看出,坚持“非粮为主”是根本,也是今后中国生物燃料乙醇的发展方向。国家出台的《生物燃料乙醇及车用乙醇汽油“十一五”发展专项规划》以及相关产业政策也明确提出“因地制宜,非粮为主”的原则^[6]。

我国政府出台的这一系列政策,已经对乙醇生产线路给出了明确指示。以玉米为原料生产乙醇的丰原生化、河南天冠等企业必须在未来改换生产路线,寻找新的原料。目前走玉米乙醇路线的河南天冠集团已经开始了转型之路,其年产 3 000 t 的纤维素乙醇项目已于 2006 年 8 月底在镇平县奠基,这是国内首条纤维素乙醇产业化试验生产线。当然,由于受规模限制,纤维素乙醇的生产成本还高达 6 000 ~ 6 500 元 / t,比小麦为原料生产燃油乙醇的成本高 500 ~ 1 000 元 / t。但是随着试验成功,产能扩大后,成本有望降低。总体来说,在政策的扶持下,纤维素乙醇前景看好。据 2006 年国际生物燃料北京会议报道,计划到“十一五”末,我国要使乙醇汽油消费量占全国汽油消费量的比例由现在的 20% 上升到 50% 以上,到 2010 年我国乙醇汽油市场的规模预计将达到 6 650 万 t,这意味着届时我国燃料乙醇的年产量将超过 330 万 t。由此看来,生物燃料的发展由“粮源”调整为“非粮”,不仅是大势所趋,而且已

是迫在眉睫。可以预见,在不远的未来,纤维素乙醇生产将会取得更大突破而快速发展^[6]。

3 提高纤维素乙醇产量的方法

目前乙醇生产的成本高,生产的动力很大程度上受政府补贴的影响,但是降低生产成本是关键。提高乙醇产量、降低生产成本可以从以下两个方面入手:提高植物的总生物量;提高能源作物的品质,即增加作物的总纤维素含量、降低木质素含量^[7],并改变其构成。

3.1 提高植物的总生物量

提高植物的总生物量显然可以提高生产效率,降低成本。植物生长发育、光能利用率等是影响植物生物量的制约因素。因此,可以从以下几个方面入手,提高总生物量。

3.1.1 提高植物光合作用的效率 通过改善作物的生长和光合作用条件,提高光能利用率是增加农作物产量的重要途径之一。光合作用效率是指作物通过光合作用制造的有机物中所含有的能量与光合作用中吸收的光能的比值。

提高 Rubisco 的催化效率。水稻、小麦、大豆等 C₃ 植物的光呼吸很显著,会消耗光合作用合成的有机物总量的 20% ~ 27%; 而甘蔗等 C₄ 植物的光呼吸消耗很小,只有 2% ~ 5%, 甚至更少。为了提高水稻等 C₃ 植物的光合作用效率,就要设法降低它们的光呼吸。Rubisco 是光合作用中 CO₂ 固定的关键酶,处于光合作用和光呼吸两个方向相反但又互相联系的循环反应交叉点。Rubisco 既催化 RuBP (1, 5-二磷酸核酮糖) 的羧化反应,又催化 RuBP 的加氧反应。这两个方向反应之间的平衡主要取决于叶片中 CO₂ 和 O₂ 的比率。Rubisco 催化羧化反应时可以将大气中的碳固定在植物体中,即固定 CO₂, 但由于 Rubisco 催化作用的两面性,其固定的 CO₂ 会有 20% ~ 50% 的损失,而且 Rubisco 的催化速率比一般的酶低,这都限制了光合作用的效率。提高 Rubisco 的催化效率,如对控制合成 Rubisco 的基因进行定点突变或运用转基因技术,把来源于蓝细菌的无机碳运输蛋白基因添加到植物基因组中,将有可能大大提高植物的光合作用,应用于作物,将会使作物产量得以增加。

控制气孔运动。水分的缺失多少是植物产量的另一个重要制约因素。水分通过气孔从植物叶片中蒸发出去,同时 CO_2 进入,光合作用固定 CO_2 需要一定量的水分。C4植物(如玉米、甘蔗、柳枝稷等)比 C3植物(如小麦、大豆等)每单位固定 CO_2 需要更少的水,这是因为 C4植物会部分关闭气孔,使 CO_2 固定速率较高。其他植物,如仙人掌,白天关闭气孔减少水分损失,晚上打开气孔吸收二氧化碳,以便第二天进行光合作用,这种现象也是通过光呼吸抑制碳损失。目前,除了提高这种适应的可能性,理论上没有其他途径可以显著降低植物水分需求量来达到最大产量。

改善叶片面积、改变株型提高光能利用率。光合作用面积即植物的绿色面积,主要是叶面积,它是影响产量最大,同时又是最容易控制的一个因素。增加叶面积有利于光合效率的提高,但叶面积过大又会影响群体中的通风透光,从而引起一系列矛盾,所以,光合面积要适当。同时应调控影响植物株型的基因,使植株秆矮,叶直而小、厚,分蘖密集。株型改善,就能增加密植程度,增大光合面积,耐肥不倒伏,充分利用光能,提高光能利用率。

3.1.2 操控调节植物生长的矿质因素 矿质元素是光合作用的产物葡萄糖进一步合成许多有机物时所必需的物质。如缺少氮,就会影响蛋白质的合成;缺少磷就会影响 ATP 的合成;缺少镁就会影响叶绿素的合成等等,而这些物质又进一步影响光合作用。调节矿质元素合成代谢途径的相关基因的表达,可使矿质元素合成适量,促进植物的生长。

3.1.3 延迟或避免植物开花 植物发育相关基因会影响植物总生物量,其中以影响开花时间的基因对植物总生物量的作用最为明显。开花促进基因 *CRY2*、*CONSTANS (CO)* 和 *FLOWERING TIME LOCUS T (FT)* 的突变或开花抑制因子 *FLOWERING TIME LOCUS C (FLC)* 基因的过表达都会延迟植物的开花从而导致营养生长期延长,生物量就会大大增加^[8]。

3.2 提高能源作物的品质

生物燃料产量的最优效率依赖于从单位生物量中最大化燃料产量和最小化能量输入。细胞壁在植物生长发育过程中起重要的结构作用。通过了解细胞壁的构成,细胞壁成分如何被调控,以及

各种聚合物对植物生长发育的作用,对细胞壁采用基因工程改造的方式进行重新设计,可以使细胞壁更加符合能源的需求。

植物次生木质部由具有很厚的次生壁的细胞所组成,构成次生细胞壁的主要成分有木质素、纤维素以及半纤维素。纤维素、半纤维素经过糖化(如酸解、碱解或酶降解)和发酵可以转化为乙醇,但是木质素的降解物不易转化为乙醇^[9]。因此,为了提高纤维素乙醇的产率,就要使植物中的纤维素含量增多,而木质素含量降低。

在拟南芥中,与纤维素合成酶 *CESA (cellulose synthase)* 相关的基因有 10 个,其中有 6 个基因编码的蛋白功能已知^[7],这 6 个基因分别为 *CESA1*、*CESA3*、*CESA6*、*CESA4*、*CESA7*、*CESA8*。在大多数组织中,初生细胞壁形成过程中的纤维素合成与 *CESA1*、*CESA3*、*CESA6* 有关^[10~13],而次生细胞壁的纤维素合成需要 *CESA4*、*CESA7*、*CESA8*^[10,14~16]。这 6 种纤维素合成酶基因中任意一个突变都会导致纤维素合成量的减少以及初生或次生细胞壁的组成和结构的改变^[10~16]。

木质素含量的降低在一定范围内有利于能源植物的利用,但木质素含量过低会影响植物自身的生长,比如产生倒伏、降低植物抗性等。木质素合成途径中几个关键性的酶有 4CL (4-coumarate: coenzyme A ligase, 4 香豆酸辅酶 A 连接酶)、F5H (ferulate-5-hydroxylase, 阿魏酸-5 羟基化酶)。在白杨中分离到两个 4CL 基因: 4CL1 和 4CL2。4CL2 在茎和叶的表皮细胞中表达,它与类黄酮的合成有关,而 4CL1 在发育的木质部组织中表达,对木质素的合成起重要作用^[17]。4CL1 的表达受到抑制会导致木质素的含量下降 45%,与此同时纤维素的含量会上升 15%,二者成互补的方式变化^[17]。木质素按照其组成单体的不同主要分为 3 种类型: S 木质素 (syringyl lignin, 紫丁香基木质素)、G 木质素 (guaiacyl lignin, 愈创木基木质素) 和 H 木质素 (hydroxylphenyl lignin, 对羟基苯基木质素)。裸子植物主要为 G 木质素,双子叶植物主要含 G-S 木质素,单子叶植物主要为 G-S-H 木质素^[18]。F5H 是 S 木质素合成的限速酶,FAH1 是编码 F5H 的基因,FAH1 过量表达的转基因拟南芥、烟草与杨树中 S 木质素的生物合成显著增加,G 木质素生物合成被明显抑制^[19,20]。植

物细胞生长发育过程中木质素首先沉积于初生壁,随后逐步向次生壁过渡,在这一木质化过程中,沉积的木质素由以 G型为主过渡为以 S型为主,也就是说,初生壁的木质素以 G型为主,次生壁的木质素以 S型为主^[21]。阿魏酸是木质化的起始位点,集中于初生壁,与初生壁中的结构多糖高度交联,对香豆酸集中于次生壁,主要以酯键的形式与木质素相连,仅少部分通过酯键与阿拉伯木聚糖相连。初生壁的木质化程度高于次生壁,已发现在瘤胃降解过程中初生壁更难于被降解^[22]。为了提高能源作物的品质,在降低木质素含量的同时还要注意改变木质素的组分,使更多的 G木质素向 S木质素转化,有利于降解。

综上所述,要提高能源作物的品质,既要使次生木质部纤维素合成的相关基因 CESA4、CESA7、CESA8表达量升高,又要使木质素合成的相关基因 4CL1 表达量降低,同时还要使 S木质素合成的关键基因 FAH1 表达量升高。只有这三方面综合考虑,才能使能源作物的品质得以提高。

3.3 提高纤维素乙醇的转化效率

目前,世界各国在研究利用木质纤维素发酵生产乙醇中都围绕着预处理工艺、水解工艺和发酵工艺进行攻关。其主要障碍为:酶活性低,酶稳定性差等方面造成酶解成本过高;缺乏经济可行的五碳糖发酵技术,难于降低纤维素乙醇转化过程中的抑制因素,如植物自身所含的重金属元素和小分子抑制物质等。

针对上述技术难点,我们应从以下方面着手解决:一是通过改变原料来提高产量,更多的生物量原料可以转化为更多的燃料乙醇和其他化学物质;二是降低成本、提高酶的活性使之能将复杂聚合物转化为可发酵糖;三是开发能够有效将复杂聚合物转化为五碳糖和六碳糖的微生物;四是改善原有菌株或开发新菌株使其能统一糖化和发酵两个过程。

最新的研究成果显示,酶的成本已经显著降低,发酵菌株的改善可使糖化与发酵同时进行,纤维素的水解和葡萄糖的发酵可以合并为一步。现在有些专家正在着手研究运动发酵单孢菌与酵母组合的快速发酵,这可以缩短发酵时间,提高乙醇产率,同时,提高发酵液中乙醇浓度,减少乙醇蒸

馏过程中的能量消耗也可以提高乙醇生产效率。

4 展望

从国家长远利益来看,生物乙醇将是绿色能源的根本出路,植物纤维有望成为乙醇生产的战略资源。纤维素在自然界大量存在,通过使用特定的酶将纤维素进行分解可获得简单的糖类物质,这些糖类物质可进一步转化为能量使用。纤维素乙醇的生产可以以秸秆、草皮、树皮或其他能源植物等为原料,人和动物并不能食用这些植物源纤维素,因此不会威胁人和动物的食物供应。通过纤维素所获的乙醇非常洁净,可以和汽油一样有效驱动汽车行驶,因此我们不再需要重新发明汽车,这将使我们的汽车工业继续发展下去,不会造成巨大的浪费。

但是木质纤维素降解为乙醇还存在很多技术方面的问题,如降解酶的发现、改造及应用,木质纤维素预处理技术,纤维素乙醇发酵过程的优化与控制等,目前还难以实现大规模生产。

当然,乙醇燃料从理想到现实不会一蹴而就,巴西在国际原油价格还没有居高不下的情况下就开始应用乙醇燃料,历经数十年才取得现在的成就。专家提示:越早开始推广乙醇燃料,就会越快从依赖石油的泥潭中解脱出来。随着世界各国经济发展的不断加快,能源危机将会越来越严重,乙醇燃料正在表现出唯一可以替代石油制品的独特魅力。因此,充分利用各种技术提高能源作物的产量和品质,并加快纤维素乙醇产业化,对根本解决能源和环境的制约,真正促进农村经济发展与繁荣,实现我国经济社会的可持续发展意义重大。

参 考 文 献

- [1] 王丹,林建强,张潇,等.直接生物转化纤维素类资源生产燃料乙醇的研究进展[J].山东农业大学学报(自然科学版),2002,33(4):525-529.
- [2] 梁红.我国生物能源产业的发展前景与对策[J].生态经济,2007,5:106-108.
- [3] 陈家瑛,陈明,卢怀谦.生物能源会燃起多大火[J].瞭望,2007,13:25-26.
- [4] 李彬.乙醇燃料:汽油的真正终结者[J].科学杂志,2006,5:52-54.
- [5] 尤新.发酵工业开拓技术新领域[N].中国食品报,2005-01-11,B02.
- [6] 我国纤维素乙醇的开发进展[J].精细石油化工进展,2007,8(3):54-55.

- [7] Biomass to biofuels workshop. Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol: a joint research agenda [R]. In: A research roadmap resulting from the biomass to Biofuels workshop [C]. DOE/SC-0095. Rockville, Maryland: US Department of Energy, 2006.
- [8] Mouradov A, Cremer F, Coupland G. Control of flowering time: interacting pathways as a basis for diversity [J]. *Plant Cell*, 2002, 14 (Suppl): S111 - S130.
- [9] 陈介南. 木质纤维生物转化乙醇技术 [J]. *生物质化学工程*, 2006, 40 (增刊): 69 - 77.
- [10] Somerville C R, Bauer S, Brininstool G, et al. Toward a systems approach to understanding plant cell walls [J]. *Science*, 2004, 306: 2206 - 2211.
- [11] Fagard M, Desnos T, Desprez T, et al. PROCUSTE1 encodes a cellulose synthase required for normal cell elongation specifically in roots and dark-grown hypocotyls of Arabidopsis [J]. *Plant Cell*, 2000, 12: 2409 - 2424.
- [12] Scheible W R, Eshed R, Richmond T, et al. Modifications of cellulose synthase confer resistance to isoxaben and thiazolidinone herbicides in Arabidopsis ixrl mutants [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2001, 98: 10079 - 10084.
- [13] Desprez T, Vemhertes S, Fagard M, et al. Resistance against herbicide isoxaben and cellulose deficiency caused by distinct mutations in same cellulose synthase isoform CESA6 [J]. *Plant Physiol*, 2002, 128: 482 - 490.
- [14] Taylor N G, Howells R M, Huttly A K, et al. Interactions among three distinct Cesa proteins essential for cellulose synthesis [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2003, 100: 1450 - 1455.
- [15] Brown D M, Zeef L A, Ellis J, et al. Identification of novel genes in Arabidopsis involved in secondary cell wall formation using expression profiling and reverse genetics [J]. *Plant Cell*, 2005, 17: 2281 - 2295.
- [16] Persson S, Wei H, Milne J, et al. Identification of genes required for cellulose synthesis by regression analysis of public microarray data sets [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102: 8633 - 8638.
- [17] Hu W J, Harding S A, Lung J, et al. Repression of lignin biosynthesis promotes cellulose accumulation and growth in transgenic trees [J]. *Nature Biotech*, 1999, 17: 808 - 812.
- [18] 魏建华, 宋艳茹. 木质素生物合成途径及调控的研究进展 [J]. *植物学报*, 2001, 43 (8): 771 - 779.
- [19] Ruggier M, Myer K, Casumano J C. Regulation of ferulate-5-hydroxylase expression in Arabidopsis in the context of sinapate ester biosynthesis [J]. *Plant Physiol*, 1999, 119: 101 - 110.
- [20] Franke R, McMichael C M, Meyer K. Modified lignin in tobacco and poplar plants over-expressing the Arabidopsis gene encoding ferulate-5-hydroxylase [J]. *Plant J*, 2000, 22: 223 - 234.
- [21] Grabber J H, Ralph J, Hatfield R D, et al. p-Hydroxyphenyl guaiacyl, and syringyl lignins have similar inhibitory effects on wall degradability [J]. *J. Agr. Food Chem.*, 1997, 45: 2530 - 2532.
- [22] Liu D, Liu J X, Zhu S L, et al. Histological investigation of tissues and cell wall of rice straw influenced by pretreatment with different chemicals and rumen degradation [J]. *J. Animal Feed Sci*, 2005, 14: 367 - 381.

中国科技核心期刊

2008年《中国农业科技导报》

征订启事

《中国农业科技导报》是由科学技术部主管, 中国农村技术开发中心主办, 中国农业科学院生物技术研究所承办的全国性、综合性学术刊物。

本刊是中国科技核心期刊, 以发展现代农业为导向, 主要报道农业高科技领域的最新科研成果、转化应用、农业产业化发展态势, 以及政策导向和项目指南 (863计划、支撑计划等) 信息, 是农业高新技术创新成果重要的宣传阵地。设置综述专论、研究论文、研究简报、前沿动态和信息交流等栏目。

诚邀业内人士积极订阅《中国农业科技导报》, 并欢迎咨询洽谈广告业务。

本刊于 1999 年 6 月创刊, 彩色封面, 大 16

开本, 128 页, 双月刊, 铜版纸 4 色印刷, 逢双月中旬出版, 国内外公开发行。2008 年每册定价 12.00 元, 全年定价 72.00 元。国内统一刊号: CN11-3900/S; 国际统一刊号: ISSN 1008-0864。广告经营许可证号: 京西工商广字 0058 号。邮发代号: 82-245。

地址: 北京市海淀区中关村南大街 12 号
中国农业科学院生物技术研究所
《中国农业科技导报》编辑部

邮编: 100081

联系人: 蔡晶晶 徐妙云 孙丽萍

电话: 010-62127682

E-mail: nykjdb@163.com nkdb@caas.net.cn

网址: www.nkdb.net