

DOI: 10.13376/j.cblls/2014077

文章编号: 1004-0374(2014)05-0533-09

# 基于文献计量学的能源植物国际研究趋势与发展格局

刘 斌<sup>1\*</sup>, 李 祯祺<sup>2</sup>, 徐 萍<sup>2</sup>

(1 中国科学院科技促进发展局, 北京 100864; 2 中国科学院上海生命科学信息中心, 上海 200031)

**摘 要:** 随着环境的不断恶化与化石资源的急剧消耗, 世界各国都在加快可再生能源(尤其是生物质能源)的研发进程, 以保障国家能源安全, 应对全球气候变化。其中, 能源植物的开发利用是提供生物质原料的重要途径之一。分析能源植物的国内外研究进展, 把握其发展趋势, 结合我国的特点和需求, 有助于支持基础研究, 促进源头创新。以 ISI Web of Science 数据库为数据来源, Thomson Data Analyzer 为工具, 从文献计量学的角度分析能源植物的国际发展态势。

**关键词:** 能源植物; 情报分析; 文献计量学; 发展态势

**中图分类号:** G353.1; Q949.9      **文献标志码:** A

## International research trend and development pattern of energy crops based on bibliometrics

LIU Bin<sup>1\*</sup>, LI Zhen-Qi<sup>2</sup>, XU Ping<sup>2</sup>

(1 Bureau of Science & Technology for Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;

2 Shanghai Information Center for Life Sciences, Shanghai Institutes for Biological Sciences,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China)

**Abstract:** With the continuous deterioration of the environment and the rapid depletion of fossil resources, countries in the world speed up the research process for renewable energy, especially biomass energy. Wherein, development and utilization of energy crops is an important way to provide biomass feedstock. Analyzing progress of energy crops at home and abroad, grasping the development trend and combining with our characteristics and needs, will help to support basic research and promote innovation. In this paper, ISI Web of Science database was used as a data source and Thomson Data Analyzer as a tool to analyze international development trend of energy crops from the perspective of bibliometrics.

**Key words:** energy crops; intelligence analysis; bibliometrics; development trend

随着化石能源的日渐枯竭与其对环境带来的诸多危害, 许多国家开始寻找新式的可替代能源。正是由于人们对可替代能源认识的不断加深, 能源植物方面的研究应运而生。从广义上来说, 诺贝尔奖获得者卡尔文博士将通过光合作用产生碳氢化合物的植物统称为能源植物; 从狭义上来理解, 能源植物是指那些可以直接作为能源或生产能源的植物, 通常是指那些能够产生石油类似成分和可替代产品的植物, 以及富含油脂的植物。

目前, 种植能源植物以炼制油品在国际上是一种主流趋势, 过去促使能源植物发展的主要驱动力

是能源危机。尤其是在二次能源危机发生后, 大多数工业化国家的农业部门意识到自己的作用, 因此开发能源植物, 提炼生物质能源, 以提高国内自主能源的供给量, 减少对化石能源的需求, 降低对化石能源的依赖。虽然已经有很多种能源植物为人们所发现, 但大多数的能源植物还处于野生或半野生

收稿日期: 2014-05-19

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(Y113111021)

\*通信作者: E-mail: bliu@cashq.ac.cn

状态等待被发掘。为了提高其生物能源的转化效率,研究人员或利用遗传工程等改造手段,或采用先进的生物质能转换技术,从而产生多种可再生清洁能源以控制化石能源消耗,减少温室气体排放。

## 1 背景介绍

充分利用不宜耕种粮食作物的边际性土地,种植具备高产高抗逆属性的能源植物,不仅可以提供大量的生物质原料,而且对当地生态环境的改善具有重要意义。由其生产的生物质能源还可以减少温室气体排放,提升去碳化效率,使能源供给多样化,并且能够为种植者提供新的经济来源,有利于解决经济、环境与能源等多方面问题。因此,能源作物的开发与利用可以产生长远的社会效益。据不完全统计,仅在我国具有能源开发利用价值的植物就有4 000种左右,主要集中在夹竹桃科、大戟科、萝藦科、菊科、桃金娘科以及豆科(表1)。按照成分和用途来划分,主要分为以下几类。

### 1.1 富含碳水化合物的能源植物

碳水化合物在能源植物中以多种形式存在,如菊芋、甘蔗、甜高粱、木薯、玉米、甘薯等。利用这些植物可得到生物柴油、燃料乙醇和燃气<sup>[1]</sup>。

### 1.2 富含油脂的能源植物

油脂类作物包括以采收种子榨油为主要用途的草本油料植物和木本油料植物。草本油料植物主要是指油菜、向日葵、蓖麻和大豆等一年生的油脂作物,虽然它们具备广泛的工业用途,但大多为人类食物的重要组成部分。木本油料植物主要是指棕榈树、椰子树、橄榄树和茶树等植物。由于后者适宜种植在山地和丘陵等地区,且具有较高的抗逆属性,“不与粮争地,不与人争粮”,因此利用和开发的价值略优。

### 1.3 富含木质纤维素类能源植物

木质纤维素类植物的主要成分是木质纤维素,木材是其最主要的来源,其他含有木质纤维素的物质涵盖棉、麻、麦等作物。这些植物及其残余物或废弃物能够以燃烧或发电的形式直接转化为生物质能,或转化为燃料乙醇、合成气等生物能源。

### 1.4 能源藻类

藻类虽然是一种低等植物,但其分布广泛,种类繁多,且不占用陆地资源。藻类同样可以为人类提供油脂类、糖类和碳氢类生物质原料,进而生产出多种多样的生物能源(如生物柴油、生物氢等)。产油藻类和产氢藻类是目前关注的重点与前沿。

## 2 国际研究趋势与发展格局

本文以 ISI Web of Science (WoS) 数据库收录的论文为基础数据,以 Thomson Data Analyzer (TDA) 为文献计量分析工具,解析了能源植物领域相关论文的发展态势。数据下载日期截至2014年5月16日。由于数据库录入迟滞等原因,2013年数据可能尚未收录完全,仅供参考。

### 2.1 全球研发态势与相关政策

近年来,世界各国发表的能源植物相关论文快速增长。2004~2013年,WoS数据库中收录的能源植物领域的相关论文共计12 278篇。从全球论文发表数量(图1)可以看出,能源植物方面的研究发展势头愈加迅猛。究其原因,主要是出于能源等资源已经不能满足日益增长的社会需求,以及人们对环境变化和可持续发展的进一步重视和诉求。随着生物技术的不断完善,该领域的研究会逐渐突破技术上的限制,夯实其产业基础。

美国处于领先地位,中国紧随其后,巴西位于第三位,德国、加拿大、印度和英国等国家近两年的研究也发展得十分迅速(图2)。这与以上国家/地区对能源植物的政策支持是密不可分的。从研究的资助来源看,中国国家自然科学基金委员会是对该领域进行资助获得较多产出的机构。除此之外,美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)、巴西国家科技发展委员会(National Council for Scientific and Technological Development, CNPq)、中国科学院、美国能源部(Department of Energy, DOE)、欧盟、美国能源生物科学研究所(Energy Biosciences Institute, EBI)和美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)均体现出了良好的研究资助态势与成果产出。

#### 2.1.1 美国

2011年8月,USDA与DOE共同资助了10个全新研究项目。这些项目主要是通过提升产量、提高质量及增强适应极端环境的能力等方式,以改良那些生产生物燃料的特殊能源作物(如柳枝稷、白杨、芒草和短柄草等)。研究人员采用现代基因组学技术为作物的改良制定相关策略。同年9月,美国能源部先进能源研究计划署(Advanced Research Projects Agency-Energy, ARPA-E)发布了1.56亿美元的先进能源研究资助计划,其中包含能源植物工程(PETRO)。该计划的目标在于通过基因工程对植物进行改造,对能源采集与转化过程进行优化配置,

表1 我国代表性能源植物基本情况一览

作物种类	糖/淀粉/油脂含量	环境适应性	目前应用
木薯( <i>Manihot esculenta</i> )	35%	土壤要求不严,耐瘠薄	制乙醇,用作饲料和提取淀粉
甜菜( <i>Beta vulgaris</i> var. <i>altissima</i> )	16%	适应性强,耐严寒,耐高温	制糖,乙醇
甘蔗( <i>Saccharum officinarum</i> )	10%	热带、亚热带,喜高温,需水量大	制糖,乙醇
甜高粱( <i>Sorghum bicolor</i> )	10%	抗旱,抗涝,耐盐碱	乙醇,饲料
菊芋( <i>Helianthus tuberosus</i> L.)	-	干燥,喜光,耐低温,耐盐碱	制糖,食品添加剂,乙醇,饲料
麻疯树( <i>Jatropha curcas</i> L.)	40%~50%	适生范围广,性喜温和换气干旱的地方	轻柴油与麻疯树油的混合油
油桐( <i>Sindora glabra</i> Merr. ex de Wit)	-	适生性强,喜阳光充足,气温高	可直接当作柴油使用
光皮树( <i>Swida wilsoniana</i> )	干全果含油率33%~36%, 出油率25%~30%	抗性强,适应性广,可广泛种植	食用,医用,润滑油,油漆原料,燃油替代品
绿玉树( <i>Euphorbia tirucalli</i> )	烃类化合物含量很高	喜高温高湿,不耐寒,喜光照,能耐半阴	可制取石油,为石油原料最有希望的候选者
黄连木( <i>Pistacia chinensis</i> Bunge)	42.50%	比较强,适生范围广	润滑油,生物质燃料油
油茶( <i>Camellia oleifera</i> Abel)	种子含油量36.6%,种仁含油量55.9%	喜高温多湿,肥沃酸性土壤	机油的代用品,制蜡烛,制皂
西蒙得木( <i>Simriandonisia chinensis</i> )	50%	-	耐高温、高压的润滑油,抹香鲸蜡油的代用品
文冠果( <i>Xanthoeras sorbifolia</i> Bunge)	种子含油率为30%~36%, 种仁含油率为55%~67%	耐瘠薄,抗寒,抗旱	制皂,高级润滑油,油漆,天然石油的替代原料
油菜( <i>Brassica campestris</i> L.)	种子含油量50%	-	生物柴油,饲料
蓖麻( <i>Ricinus communis</i> L.)	种子含油量50%	喜温,抗旱,抗盐碱	生物柴油以20%的比例与80%普通柴油混合使用
柳枝稷( <i>Panicum virgatum</i> )	-	-	乙醇或其他石油为原料的产品,如塑料
芒属植物( <i>Miscanthus</i> spp.)	-	抗干旱,耐贫瘠	饲料,乙醇,药用
柳属植物( <i>Salix</i> spp.)	-	喜光,喜热,耐干旱,耐盐碱	建筑,饲料,中药材,乙醇

注:整合自中国科学院青岛生物能源与过程研究所的报告《中国生物能源发展现状与技术预见》<sup>[2]</sup>。

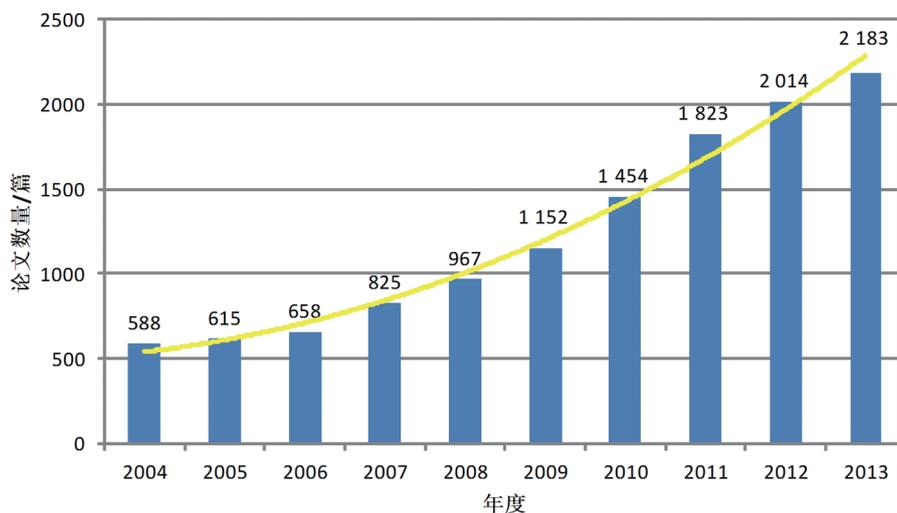


图1 2004~2013年能源植物相关论文发表数量年度趋势

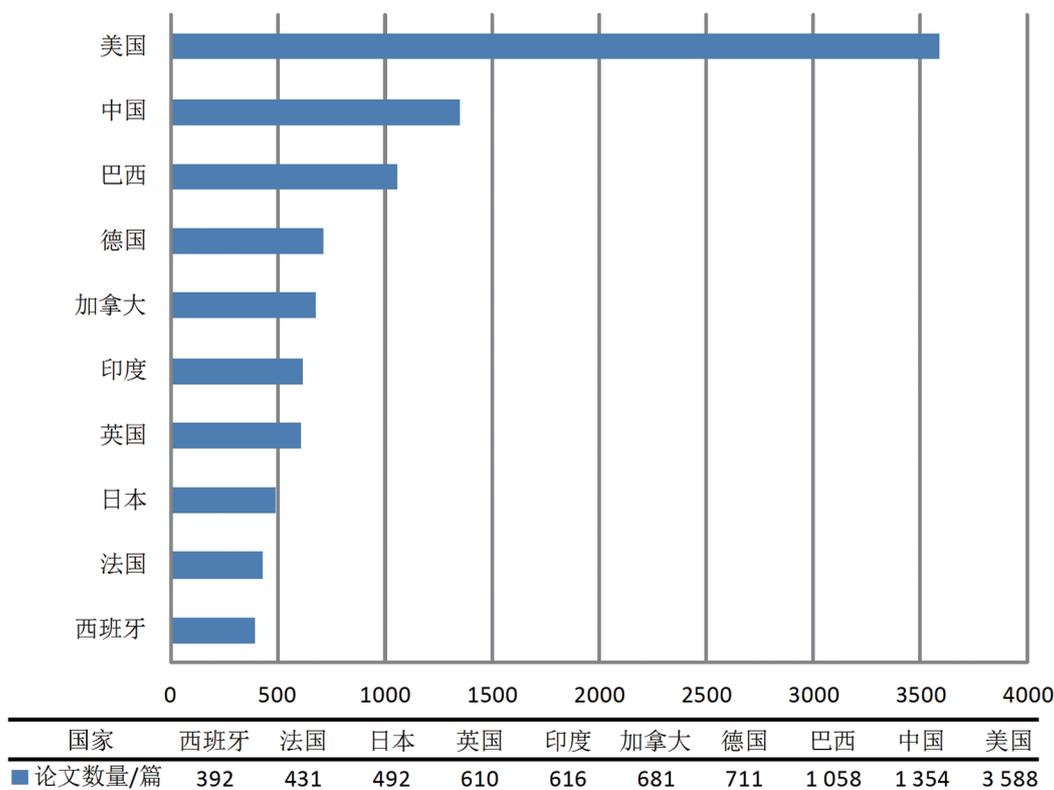


图2 能源植物相关论文发表数量排名前10国家/地区

提高其能源采集效率，并达到直接转化燃料、降低燃料成本的目的。2012年，USDA与DOE联合投资4100万美元，助力生物燃料和生物基产品的高效开发，其中包括生物质研发计划和生物能源植物原料基因组研究计划。

### 2.1.2 中国

2012年6月，中国科技部发布《生物质能源

科技发展“十二五”重点专项规划》，其中提出“必须加快新型能源植物的规模化培育、加强生物质高效转化技术创新、推进液体燃料等生物质能源产品规模化生产与示范”，主要任务包括“高生物量能源植物培育与能化产品生产培育和能源微藻育种与生物炼制”。同年7月，中国国务院发布《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》，指出“加强下一

代生物燃料技术开发, 推进纤维素制乙醇、微藻生物柴油产业化。开展重点地区生物质资源详查评价, 鼓励利用边际性土地和近海海洋种植能源作物和能源植物”。

### 2.1.3 欧洲

2011年3月, 英国生物技术与生物科学研究委员会 (Biotechnology and Biological Sciences Research Council, BBSRC) 的可持续生物能源中心 (BBSRC Sustainable Bioenergy Centre, BSSEC) 对芒草和柳树种植策略方面的研究进行了资助, 其目的在于开发出气候条件耐受性和产能较高的新品种。2014年1月, 中欧生物质大会报告总结了全球的生物质政策, 其中提到“尽管有许多技术问题尚未解决, 但用于生产能源的农业残余物和新能源作物 (如速生树种或草类) 已日益增多; 在许多地区, 生物气 (沼气) 已经成为腐败废料、复合残留物和能源植物生产能源的主要方式之一”。

### 2.2 重点研究方向与重要研究进展

当前, 能源植物相关论文主要集中在农学 (6 035 篇)、生物技术与应用微生物学 (4 681 篇)、能源燃料 (2 438 篇)、植物科学 (1 261 篇) 等研究方向 (图 3)。从能源植物的研究来源和范围来看, 这些论文出现在农学、植物科学、环境科学和生态学等研究方向, 并且部分能源植物同样属于粮食作物, 所以食品科学技术和营养与饮食学的出现也是比较合理的。从能源植物的研究目的和产业化方向

来说, 其前景都是尽可能地转化为生物能源或生物化工产品, 以达到提高可再生能源供给量的目标, 因此大部分的研究人员关注能源植物在能源燃料方面的开发利用, 而主要的手段主要利用化学、生物技术与微生物学等技术。生物技术 (尤其是应用微生物学) 为能源植物向生物燃料的转化提供了强有力的支持。无论是测序技术、遗传工程还是代谢工程, 都会对其改良、培育与转化产生巨大的推动力, 所以人们也非常关注生物技术、应用微生物学、生物化学与分子生物学在该领域产生的深远影响。此外, 海洋与淡水生物学的出现可能表明藻类等水生能源植物研究方向的兴起。

随着各国对能源植物和生物质能源的日益重视与不断投入, 以及基因组技术和生物合成技术的大幅进步, 从事该领域的研究人员不断增加, 且新出现的研究人员比重较大, 约占总数的 75% 以上 (图 4)。在这些研究人员的推动下, 该领域的研究进展由传统的筛选与培育向全基因组测序和分子层面的作物改良逐步迈进, 其中也不乏能源植物转化为生物能源的新式预处理方法。从研究机构的角度出发, USDA (及其下属的农业研究服务局)、中国科学院和 DOE (及其下属的实验室) 仍然是该领域的引领者, 以伊利诺伊大学 (及其分校)、密歇根州立大学和爱荷华州立大学为代表的美国“生物能源州”高校同样体现出了该领域的研发优势, 巴西圣保罗大学 (Universidade de Sao Paulo)、荷兰瓦赫宁根大

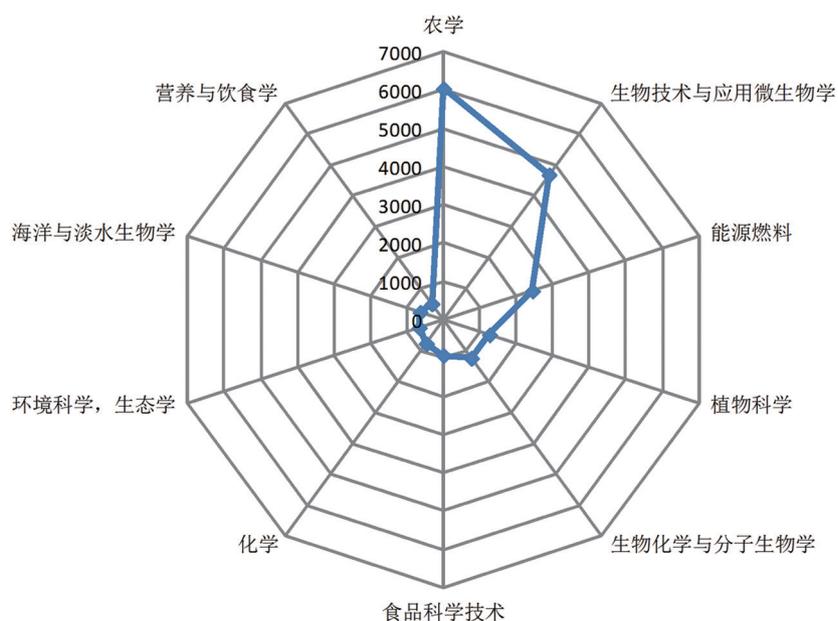


图3 能源植物相关论文发表数量排名前10研究方向

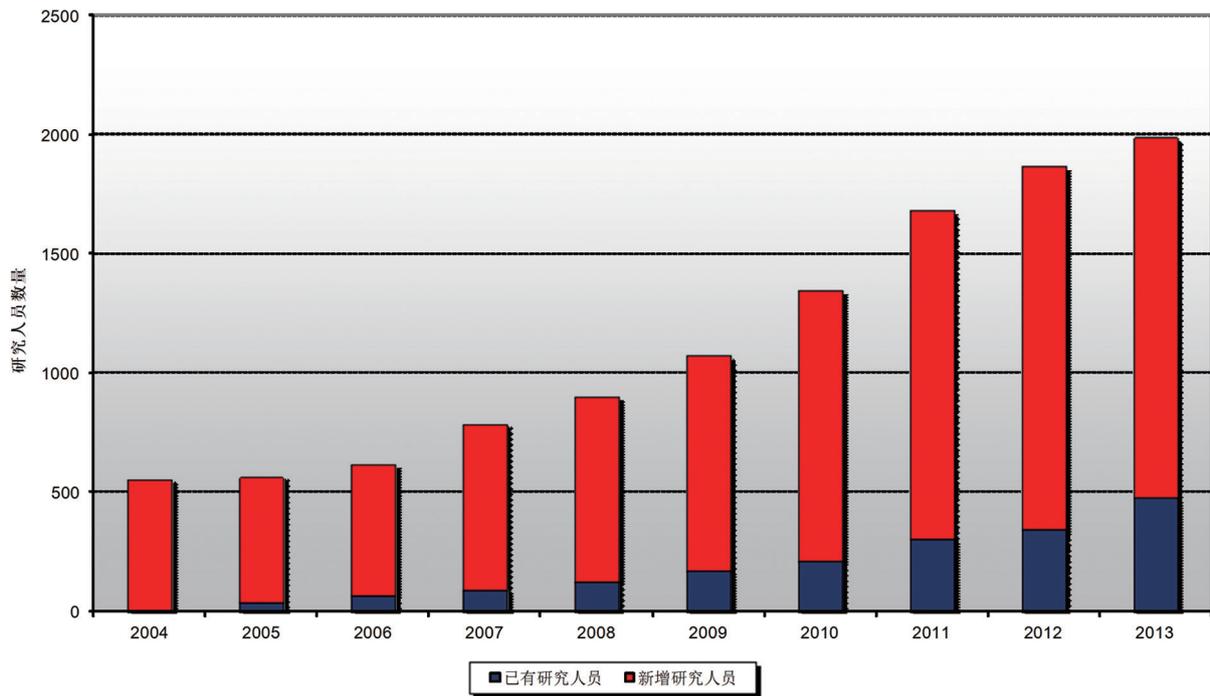


图4 能源植物相关论文的研究人员数量与结构的年度趋势

学研究中心 (Wageningen University Research Center) 等是南美洲和欧洲高校研发机构的代表, 法国农业科学院 (National Agronomic Research Institute, INRA) 作为法国的国立研究机构取得了较多的技术突破。

### 2.2.1 遗传改良与环境外因研究

2012年2月, 美国伊利诺伊大学的研究人员从温、热带的玉米杂交组合中择优培育了一种新型的玉米杂交品种。该品种的生物质不仅具备生产乙醇的潜力, 而且其乙醇产能水平等同于甚至高于当前的商业玉米杂交品种, 非常富有市场竞争力<sup>[3]</sup>。2013年1月, 英国阿伯里斯特威斯大学 (Aberystwyth University) 的科研人员在研究能源作物荻草 (*Miscanthus sacchariflorus*) 时发现, 延迟花期可使其产量增加50%。因为产量的增加意味着商业可行性的增加, 因此该发现对于生物燃料的生产来说极具意义<sup>[4]</sup>。同年5月, 爱尔兰国立大学高威分校的科学家与印度、法国等公司和研究机构开发出对向日葵进行非转基因遗传改良的方法。这种新式技术利用植物自身的基因来提高其品质, 培育新的遗传性状, 从经济性的角度提高了向日葵这种能源植物的利用价值<sup>[5]</sup>。2013年年底, 比利时法兰德斯生物技术中心 (VIB)、根特大学与法国农业科学研究院联合开展的转基因杨树田间试验结果表明, 经过木质素改良的杨树能够更为高效地用于生物塑料和生物乙醇等

生物基产品的生产<sup>[6]</sup>。

### 2.2.2 全基因组测序与功能分析

早在2010年7月, USDA 农业研究局 (Agricultural Research Service, ARS) 的研究人员就在 *Genetics* 期刊上发布了柳枝稷的遗传图谱<sup>[7]</sup>。2011年11月, 美国弗吉尼亚州理工学院的研究团队鉴定出杨树中有关木材形成的基因, 这有助于提高生物燃料生产原料的质量与数量。除杨树外, 其研究对象还涵盖了柳枝稷、芒草、甘蔗、高粱和短柄草等这类潜在的能源作物<sup>[8]</sup>。2012年1月, BSBEC 发现了一个基因家族, 可用于改良食用和生物能源草本植物的品质。该基因家族能够控制水稻、小麦等草本植物的纤维和木质发育, 这对于今后开发它们生产生物能源的特性来说具有重大意义<sup>[9]</sup>。同年2月, 美国佐治亚大学的科研人员绘制出了芒属植物 (*Miscanthus x giganteus*) 两个祖细胞的基因组图谱。这项研究能够帮助人类使这类植物“扬长避短”, 从而加速其向生物能源的转化利用<sup>[10]</sup>。时隔一个月, 英美的研究人员通力合作, 全面完成了芒草的首个高分辨率遗传图谱, 这是一个能够推动生物燃料生产的重大突破和里程碑事件<sup>[11]</sup>。2012年8月, 美国康奈尔大学的科研团队利用最新绘制的灌木柳基因组图谱对其杂交优势与产量展开研究。这一进展有望让灌木柳提前数年成为商业化的生物燃料原

料。2013年6月,我国科学家在国际上率先构建了谷子的单倍体型图谱,并对47个主要的农艺性状进行了全基因组关联分析。该研究成果为谷子的基因挖掘与遗传改良奠定了坚实的数据基础,也将对未来禾谷类作物的品种改良以及能源作物的遗传解析产生深远影响<sup>[12]</sup>。

### 2.2.3 预处理方法及转化效率创新

2013年4月,美国弗吉尼亚理工大学与河南农业大学等机构的科研人员通过非天然的合成酶途径,采用一步催化法将预处理后的生物质纤维素转化成淀粉。该研究预示,基于同步酶催化转化和微生物发酵的下一代生物合成技术有望同时解决粮食、生物燃料和环境的三方需求<sup>[13]</sup>。同年5月,DOE联合生物能源研究所(Joint BioEnergy Institute, JBEI)的研究团队开发出一种在室温条件下利用离子液体对纤维素进行预处理的新式技术。这种新技术不需要在预处理的过程中添加昂贵的酶,而且离子液本身可回收利用,降低了能源作物转化过程中的预处理成本<sup>[14]</sup>。与此同时,伊利诺伊大学的研究人员研制出一项兼具环境效益和经济效益的芒草预处理新型工艺。他们利用丁二烯砜的水溶液对生物质进行预处理,从而达到降解植物细胞壁的目的。实验数据显示,该方法具备去除半纤维素和木质素以及保留纤维素的潜在能力,不仅能够去除58%的木质素和91%的半纤维素,而且纤维素的留存高达90%~99%<sup>[15]</sup>。2013年11月,美国斯克里普斯海洋学研究所的科研团队开发出一种能够极大地提高海洋小海藻生产生物燃料效率的新方法。实验证明,代谢工程对于增加脂质产量与降低生物燃料成本的效果显著。除此之外,由于在研究中使用了高效的筛选过程,该方法也大大提高了藻类生物燃料作物自身的生长速度<sup>[16]</sup>。2014年1月,美国威

斯康星大学麦迪逊分校的科学家开发出一种生产浓缩糖的工艺,有助于促进生物燃料的发展。研究小组在文章中阐明其如何利用 $\gamma$ -戊内酯(GVL)对植物体进行拆解,并转化为糖类,以通过化学或生物方法生产生物燃料<sup>[17]</sup>。美国北卡罗来纳州立大学的研究人员开发了一种简单、高效且相对廉价的新技术,能够从能源植物原料中移除木质素,从而降低生物燃料的生产成本<sup>[18]</sup>。澳大利亚莫道克大学(Murdoch University)与日本筑波大学(University of Tsukuba)也在此合作,研制出一种非破坏性的藻类油分萃取技术,以5d为周期重复从藻类中提取油类组分而不会对藻类造成破坏。这种类似于“挤牛奶”的方法显著提高了微藻碳氢化合物的产率,克服了高产油藻类*Botryococcus braunii*生长缓慢而无法用于生物燃料商业化生产的缺陷。

## 2.3 研究热词变化趋势

在论文研究中,关键词用于标识论文非常重要的要素和属性,对其进行分析可以鲜明而直观地表述论文论述的主题。近10年来,能源植物相关论文中出现频次最高的前10个关键词/附加关键词(key words plus)表明,当前研发过程中主要关注的能源作物原料包括生物质、微藻和玉米秸秆等,技术过程涵盖预处理、发酵、酶解等,生产的生物燃料产品主要有乙醇和生物柴油等。此外,效能、消化率也是人们的聚焦点(表2)。

除了考虑高频词之外,也要注意能源植物相关论文中近3年新出现的高频关键词/附加关键词(见表3),这可能代表该领域的未来研究方向或发展趋势。这些关键词表明,微藻生物质、拜式梭菌和酿酒酵母424a(Lnh-St)近年来受到越来越多的重视。此外,生物质生产力、技术经济分析和海洋酸化是人们日益关注的经济环境问题,催化剂、水热

表2 能源植物相关论文中出现的高频关键词

排名	关键词	中文译注	附加关键词	中文译注
1	Ethanol	乙醇	Biomass	生物质
2	Biodiesel	生物柴油	Growth	发育
3	Microalgae	微藻	Fermentation	发酵
4	Biomass	生物质	Corn Stover	玉米秸秆
5	Biofuel	生物燃料	Ethanol-Production	乙醇生产
6	Digestibility	消化率	Ethanol	乙醇
7	Bioethanol	生物乙醇	Performance	效能
8	Pretreatment	预处理	Digestibility	消化率
9	Bioenergy	生物能	Enzymatic-Hydrolysis	酶解
10	Enzymatic Hydrolysis	酶解	Protein	蛋白质

表3 能源植物相关论文中近3年新出现的高频关键词

排名	关键词	中文译注	附加关键词	中文译注
1	Biochar	生物炭	Lipid Extraction	脂质提取
2	Catalyst	催化剂	Recalcitrance	顽抗
3	Nutrient Removal	脱氮除磷	Technoeconomic Analysis	技术经济分析
4	Hydrothermal Liquefaction	水热液化	Hydrothermal Liquefaction	水热液化
5	Biomass Productivity	生物质生产力	<i>Saccharomyces-cerevisiae</i> 424a (Lnh-St)	酿酒酵母424a (Lnh-St)
6	Fermentable Sugars	可发酵糖	Diesel	柴油
7	Reducing Sugar	还原糖	Microalgal Biomass	微藻生物质
8	Ocean Acidification	海洋酸化	Molecular Markers	分子标记
9	Neutral Lipids	中性脂质	Antioxidant Activities	抗氧化活性
10	<i>Clostridium beijerinckii</i>	拜式梭菌	Triacylglycerol Accumulation	甘油三酯积累

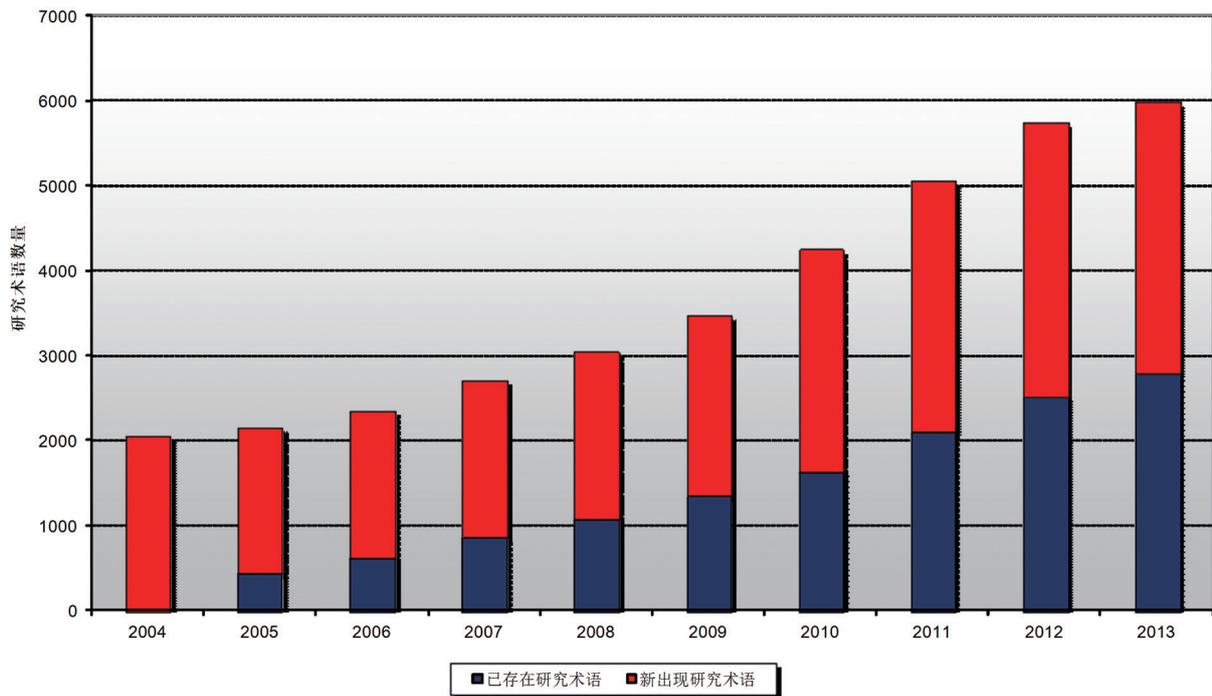


图5 能源植物相关论文的研究术语结构

液化和脂质提取等是目前能源作物转化的技术重点和关键，分子标记等手段已被引入能源植物开发、培育和改良。

从能源植物相关论文的研究术语结构可以发现，该领域拥有较强的研究活跃度。不仅领域研究术语的数量增长迅速，而且每年新出现的研究术语占总体数量的60%以上(图5)。

### 3 结论与展望

尽管在能源植物的开发利用方面还存在一些技术问题，但从论文的角度可以发现，该领域正处于

快速发展阶段。随着各国对生物能源的日益重视，对相关技术研发的进一步投入，以及对经济效益、环境效益和社会效益的多重需求，能源作物将拥有广阔的应用范围与市场前景。

我国能源植物的产业链构建中主要存在两个问题。其一是由于我国确立了“不与人争粮，不与粮争地”的发展原则以保证粮食安全，因此国外广泛利用玉米等粮食作物来制备生物乙醇的工艺并不适合我国的基本国情；其二是由于高新技术的匮乏，加工工艺不是很成熟，这就导致了原料转化率较低的问题，使得相对稀缺的原料资源产生了较大的损耗

与浪费。如果我国想在能源作物和生物质能源领域走得更为长远, 建议在保证政策与资金支持的前提下, 大力发展具有自主知识产权的关键技术, 打破国外公司垄断的行业壁垒, 通过生物技术等手段对能源植物进行改良, 使其可以生长在边际土地上, 并提高原料的转化效率, 走出一条符合我国基本国情的独特研发道路。

#### [参 考 文 献]

- [1] 于建荣, 陈大明, 江洪波. 能源作物发展现状和商业化前景. 生物产业技术, 2009, (5): 15-9
- [2] 中国科学院青岛生物能源与过程研究所. 中国生物能源发展现状与技术预见[M]. 2010
- [3] Monti A, Barbanti L, Zatta A, et al. The contribution of switchgrass in reducing GHG emissions. GCB Bioenergy, 2012, 4(4): 420-34
- [4] Jensen E, Robson P, Norris J, et al. Flowering induction in the bioenergy grass *Miscanthus sacchariflorus* is a quantitative short-day response, whilst delayed flowering under long days increases biomass accumulation. J Exp Bot, 2013, 64(2): 541-52
- [5] Kumar APK, Boualem A, Bhattacharya A, et al. SMART--Sunflower mutant population and reverse genetic tool for crop improvement. BMC Plant Biol, 2013, 13(1): 38
- [6] Van Acker R, Leplé JC, Aerts D, et al. Improved saccharification and ethanol yield from field-grown transgenic poplar deficient in cinnamoyl-CoA reductase. Proc Natl Acad Sci USA, 2014, 111(2): 845-50
- [7] Okada M, Lanzatella C, Saha MC, et al. Complete switchgrass genetic maps reveal subgenome collinearity, preferential pairing and multilocus interactions. Genetics, 2010, 185(3): 745-60
- [8] Jia X, Zhao M, Zhao C, et al. Populus biomass protein-protein interactions and their functions. BMC Proceedings, 2011, 5(Suppl 7): O38
- [9] Anders N, Wilkinson MD, Lovegrove A, et al. Glycosyl transferases in family 61 mediate arabinofuranosyl transfer onto xylan in grasses. Proc Natl Acad Sci USA, 2012, 109(3): 989-93
- [10] Kim C, Zhang D, Auckland SA, et al. SSR-based genetic maps of *Miscanthus sinensis* and *M. sacchariflorus*, and their comparison to sorghum. Theor Appl Genet, 2012, 124(7): 1325-38
- [11] Ma XF, Jensen E, Alexandrov N, et al. High resolution genetic mapping by genome sequencing reveals genome duplication and tetraploid genetic structure of the diploid *Miscanthus sinensis*. PLoS One, 2012, 7(3): e33821
- [12] Jia G, Huang X, Zhi H, et al. A haplotype map of genomic variations and genome-wide association studies of agronomic traits in foxtail millet (*Setaria italica*). Nat Genet, 2013, 45(8): 957-61
- [13] You C, Chen H, Myung S, et al. Enzymatic transformation of nonfood biomass to starch. Proc Natl Acad Sci USA, 2013, 110(18): 7182-7
- [14] Groff D, George A, Sun N, et al. Acid enhanced ionic liquid pretreatment of biomass. Green Chem, 2013, 15(5): 1264-7
- [15] de Frias JA, Feng H. Switchable butadiene sulfone pretreatment of *Miscanthus* in the presence of water. Green Chem, 2013, 15(4): 1067-78
- [16] Trentacoste EM, Shrestha RP, Smith SR, et al. Metabolic engineering of lipid catabolism increases microalgal lipid accumulation without compromising growth. Proc Natl Acad Sci USA, 2013, 110(49): 19748-53
- [17] Luterbacher JS, Rand JM, Alonso DM, et al. Nonenzymatic sugar production from biomass using biomass-derived  $\gamma$ -valerolactone. Science, 2014, 343(6168): 277-80
- [18] Achinivu EC, Howard RM, Li G, et al. Lignin extraction from biomass with protic ionic liquids. Green Chem, 2014, 16(3): 1114-9