

文章编号: 1004-0374(2010)12-1271-06

能源植物规模化种植理论与技术研究进展

王伟波, 张全发*

(中国科学院武汉植物园, 武汉 430074)

摘要: 该文对与能源植物规模化种植相关的概念进行了讨论和综述, 提出了能源植物规模化种植的生态学原则、经济学原则和美学原则, 综述了能源植物规模化种植技术体系并比较了三种不同技术体系的优缺点。

关键词: 能源植物; 规模化种植; 概念; 原则; 技术体系

中图分类号: Q949.9 **文献标识码:** A

Research progress in the theory and technology of large-scale cultivation of energy plants

WANG Wei-bo, ZHANG Quan-fa*

(Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Concepts relative to the large-scale cultivation of energy plants are discussed and overviewed. Principles of ecology, economics and esthetics are proposed to guide the large-scale cultivation of energy plants. Three different types of technical systems for large-scale cultivation of energy plants are overviewed, and their advantages and disadvantages are showed in this paper.

Key words: energy plants; large-scale cultivation; concepts; principles; technical systems

能源是人类赖以生存的物质基础, 是社会经济的基本支撑。日益增长的能源需求与化石能源资源的有限性及其开发利用过程对环境生态造成的巨大压力之间的矛盾, 已严重制约着社会经济的可持续发展。在这种形式下, 开发清洁的可再生能源已成为能源领域的一项紧急任务^[1]。

植物能源是一种重要的可再生能源, 它属于可再生能源中生物质能的范畴。能够产生植物能源的植物被称为能源植物。能源植物通过光合作用固定二氧化碳和水, 将太阳能以化学能形式储存在植物中。除直接燃烧产生热能外, 还可转化成固态、液态和气体燃料^[2]。广义上讲所有的植物均可称为能源植物, 不过从目前的技术和开发成本考虑, 并不是所有植物都适用于能源开发, 所以通常意义上的能源植物指那些能量富集型的植物^[2,3]。

目前, 植物能源的开发已进入蓬勃发展的时期, 全世界不同国家和地区已经或正在准备大面积

开发种植能源植物^[4-5]。种植的能源植物种类亦繁多, 广泛分布于植物界的大量科、属中, 既有藻类等低等植物, 也有木本和草本高等植物^[6]。本文就目前能源植物规模化种植相关概念、种植原则、种植技术体系进行了探讨和综合评述, 为能源植物产业进一步发展提供参考依据。

1 能源植物规模化种植相关概念

关于能源植物的报道很多, 其概念的使用也纷繁多样, 本部分就文献报道中出现频率较高的术语或概念进行讨论与阐述。

收稿日期: 2010-07-05; 修回日期: 2010-09-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(082A341C04); 国家自然科学基金项目(31000061)

*通讯作者: E-mail: qzhang@wbpcas.cn; Tel: 027-87510881

1.1 能源植物和能源作物

能源植物(energy plants)是指那些一年生和多年生植物,其栽培目的是生产固体液体或气体能源材料^[7]。能源作物(energy crops)是指经专门种植,用以提供能源原料的草本和木本植物^[8]。通常情况下,能源植物和能源作物可以相互通用,如参考我国发展改革委员会2007年发布的《可再生能源中长期发展规划》。然而,两者之间还是存在一些细微的差异。能源植物偏重于从生物学的角度来研究这类生物,而能源作物偏重于农学方面的研究,如2007年我国农业部发布的《农业生物质能产业发展规划》中,只提到了能源作物,未提及能源植物。所有的能源作物都属于能源植物,但是只有那些以目前的技术水平评估,可用来进行农业推广生产的,或已属于农作物范围的能源植物才经常被称为能源作物。

1.2 边际土地

边际土地(marginal lands)是西方土地经济学研究分析土地利用水平时常用的概念。指在一定的生产条件下,生产收益正好补偿所需费用的土地。边际土地的确定依赖于物理、环境、社会、经济因素相互作用^[9]。也就是说,边际土地的确定除土壤肥力和位置之外,与利用方式和农产品价格等有关^[10]。退化土地(degraded lands)是指由于人为因素或自然因素或者人为自然综合因素的干扰和破坏,原有的内部结构、理化性状发生改变的土地。退化的土地经受内在的质量的损失或其容量的衰减,最好的表示不是单要素的,而是多种力共同作用的产物,其中人和自然力都有各自的位置或作用。影响土地退化的因素包括生物的、物理的、化学的、社会经济的、技术的和文化的等方面,而不合理的人为活动,如毁林、过度放牧、地下水过度开采、工矿企业的污染和破坏等所引起的土壤退化问题无论在范围还是程度上均比自然因子引起的退化要严重得多^[11]。弃耕地(abandoned agricultural lands),又被称为撂荒地,是指原来进行农业经营的土地不再进行农业耕种而撂荒的土地。弃耕的主要原因是土壤贫瘠、生态条件恶化、产出量小或是人力条件的限制无力再继续经营下去,其中由于地力下降而导致的撂荒是主要的^[12]。废弃地(wasteland)被定义为在各种类型土地的利用过程中,随着人类活动的停止而使得已经使用或开发的土地目前处于闲置遗弃或未完全使用的特殊状态,且该类土地需要经过一定

的治理才能投入将来的再次使用^[13]。我国废弃地的概念起源于对矿业废弃地的界定,指为采矿活动所破坏的,非经治理而无法使用的土地^[14]。国外通常用“Brownfield”、“Brownland”等词来表示废弃地,我国将其直译为“棕地”^[13]。

其它一些概念如非粮能源植物^[15]、宜能荒地^[16]在文献中也有报道。

上述不同土地类型是不同领域的研究者从不同角度来定义的,各类型之间界限并不明显,对某一具体土地,其可能同时属于几种土地类型。为促进生物能源的长期研究和进步,本文作者倾向于支持“宜能荒地”这种提法。

2 能源植物规模化种植的原则

2.1 生态学原则

能源植物规模化种植本质上是一个生产生物质的生态过程,因此其必须遵循生态学原则。

2.1.1 初级生产力原则

初级生产力又称“原始生产力”或初级生产量,指地表单位面积单位时间内绿色植物吸收太阳能进行光合作用,制造有机物质的数量、大小的能力。能源植物规模化种植本质上是一个生产生物质的过程,而植物能源的开发是一个掠夺生物质的过程,在陆地生态系统中,光、二氧化碳、水和营养物质是初级生产量的基本资源,温度是影响光合效率的主要因素,食草动物的捕食会减少光合作用生物量^[17]。评估任一地区是否适合开发植物能源首先要评估其初级生产力,陆地上初级生产力有随纬度增加而逐渐降低的趋势。在陆地生态系统类型中,以热带雨林生产力为最高,平均为2 200 g/(m²·a)。热带常绿林、落叶林、北方针叶林、稀树草原、温带草原、寒漠依次减少^[17]。初级生产力从热带至亚热带,经温带到寒带逐渐降低。一般认为,太阳辐射、温度和降水是导致初级生产力随纬度增大而降低的原因^[17]。因而能源植物开发区域即能源植物规模化种植区域应坚持低纬度优先的原则。

2.1.2 物质循环的原则

生态系统之间矿物元素的输入和输出以及它们在大气圈、水圈、岩石圈之间以及生物间的流动和交换称为生物地化循环,即物质循环^[18]。物质循环是以物质守恒定律为基础的。根据物质守恒定律,物质不会凭空产生,也不会凭空消失,只会从一种形态转化为另一种形态。虽然生态系统物质的自然

输入如降水过程、生物固氮、植物对母岩的降解可以补充部分营养物质, 但大多数情况下能源植物生物质的收获或转移意味着生态系统物质的减少, 因此为保持生物质的持续生产, 必须补充与收获或转移的生物质等量的物质。只有这样, 正常的物质循环才能维持。在保证种植地区实现正常物质循环的基础上, 才可以通过选取不同的物种, 采取不同的管理措施, 增加目标生物质组分在生产量中的配额, 从而实现能源植物高产的目标。

2.1.3 能源植物多样性共存的原则

能源植物资源十分丰富, 广泛分布于植物界的大量科属中, 既有藻类等低等植物, 也有高等植物; 既有陆生植物, 也有水生植物; 既有草本植物, 也有木本植物^[6]。本着“百家争鸣, 百花齐放”的主导思想, 能源植物产业开发及规模化种植应坚持多样性共存的原则。传统的能源植物指那些长期以来用于农业生产的农作物, 新能源植物则是根据“不与人争粮, 不与粮争地”的指导思想, 最近研究开发的一些非粮能源植物^[19], 从这个定义上来看, 低等植物藻类也应属于新能源植物(表 1)^[20]。生境的多样性和能源植物利用方式的多样性决定了能源植物资源开发的多样性。可供开发的能源植物种类繁多, 根据其生物学和生态学特性, 各自具有其优缺点, 最理想种类是不存在的, 通过比较单位面积单位时间产量决定物种的取舍是没有实质意义的。不同生境环境因素不同, 原材料自然可获得性也不同, 因而要最大限度的实现其最大初级生产力, 必须选取对该生境最适合的物种。植物能源的利用方式不同, 主要有乙醇生产、生物柴油生产和

直接燃烧三种方式。因此如需要生产乙醇, 则种植淀粉含量高的植物; 如需生产生物柴油, 则种植油脂含量高的植物。

2.1.4 与生态修复相结合的原则

在退化土地上种植能源植物, 首先是一个为退化生态系统提供繁殖体的过程, 这个过程进行是以物理环境的改造为基础的^[21], 脱离了物理环境的改造, 提供的繁殖体不可能在退化土地上成功拓殖, 更谈不上依靠繁殖体生产大量生物质。因此在退化土地上进行能源植物种植必须分成两步走, 首先保证能源植物的存活, 然后才能进行生物质的生产。在退化土地上进行植物能源生产, 最好选择多年生植物, 延缓生物质采收时间, 从而为生态修复的进行争取足够的时间。

2.1.5 生态安全的原则

能源植物规模化种植对生态安全的影响主要指对水环境、土壤、生物多样性的影响, 如能源植物种植可能会引发水资源短缺和水质恶化^[22]、生物多样性降低^[23]和外来物种入侵^[24]等。该影响程度取决于种植土地前期的利用情况。在人类活动影响较大的土地上(如撂荒地)上种植能源植物, 其对生态安全的影响较小, 而在人类活动影响较小的土地上(如原始森林)种植能源植物, 其对生态安全的影响较大。为了最大限度的降低能源植物规模化种植对生态安全的影响, 优先选择生态服务功能价值相对较低的区域种植能源植物, 另一方面可考虑能源植物与农作物间作或不同能源植物间作等种植模式。

2.2 经济学原则

在生物能源产业链中, 生物质加工生产工艺相

表1 世界上开发的主要能源植物

	高等植物/陆生植物 ^[19]	低等植物/水生植物 ^[20]
传统能源植物	玉米(<i>Zea mays</i>); 甜高粱(<i>Sorghum bicolor</i>); 木薯(<i>Manihot esculenta</i>); 糖用甜菜(<i>Beta vulgaris</i>); 大豆(<i>Glycine max</i>); 油菜(<i>Brassica Napus</i>); 蓖麻(<i>Ricinus communis</i>)	
新能源植物	小桐子(<i>Jatropha curcas</i>); 桉树(<i>Eucalyptus spp</i>); 象草(<i>Pennisetum purpureum</i>); 柳枝稷(<i>Qanicum virgatum</i>); 木棉(<i>Bombax ceiba</i>); 棕榈(<i>Trachycarpus fortunei</i>); 海桐(<i>Pittosporum tobira</i>); 苏木(<i>Copaifera</i>); 黄连木(<i>Pistacia chinensis</i>); 油桐(<i>Vernicia montana</i>)	布朗葡萄藻(<i>Botryococcus braunii</i>); 小球藻(<i>Chlorella</i> sp.); 隐甲藻(<i>Cryptocodinium cohnii</i>); 细柱藻(<i>Cylindrotheca</i> sp.); 盐生杜氏藻(<i>Dunaliella primolecata</i>); 金藻(<i>Isochrysis</i> sp.); 单胞盐藻(<i>Monallanthussalina</i>); 微绿球藻(<i>Nannochloris</i> sp.); 微拟球藻(<i>Nannochloropsis</i> sp.); 新绿藻(<i>Neochloris oleoabundans</i>); 菱形藻(<i>Nitzschia</i> sp.); 三角褐指藻(<i>Phaeodactylum tricorutum</i>); 裂壶藻(<i>Schizochytrium</i> sp.); 干扁藻(<i>Tetraselmis sueica</i>)

对固定,受外界环境因素如光和温度影响较小,一旦加工工厂建立,工艺流程确定,其单位产出碳排放、能量消耗及投资成本均相对固定,因此整个产业链的碳排放、能量消耗及投资成本的波动均发生在生物质生产阶段(包括收获),即能源植物规模化种植(或藻类培养)阶段。

2.2.1 碳负性

生物能源的生产和消费理论上几乎是一个封闭的CO₂循环系统,即生物能源燃烧所释放的CO₂等于其净光合作用所固定的CO₂,因此通常情况下认为生物能源是碳中性的。然而在生物能源的生产过程中生物质原料的生产和收获、生物质加工处理、生物质原料和生物能源的运输等均需要外源化石燃料的输入,从而引起多余CO₂的排放。另外,生物能源开发过程中土地利用方式的转变可能会引起凋落物和土壤碳库储量的改变,从而改变大气中CO₂的含量^[25]。另一方面,在生物能源规模化种植过程中,只有部分生物质被转化为生物能源,其它剩余部分则进入植被、凋落物和土壤碳库。实际评估过程(基于CO₂的生命周期分析)中,不同的系统边界(时间、空间、生产线)、分析清单、功能单元,其评估结果差异很大,再加上不同原材料种类、管理措施、转化技术、终端利用技术等原因,对生物能源是碳负性、碳中性或碳正性的确定始终没能达到统一^[26]。比较一致的观点是生物能源相对于化石能源可以减少CO₂的排放。Mathews^[27]提出生物能源的碳负性无可争议,其碳负性非技术决定而由策略决定,即生物能源生产者完全可以通过决定能源植物种植过程中多大比例的生物质返还土壤实现其碳负性的目标,他甚至建议将生物能源的碳负性作为市场准入的标准。

2.2.2 货币经济

与化石能源相比,生物能源的高成本仍是限制其推广应用的主要障碍。在其高昂的成本中生物质的生产占有相当大的比例(约40%-70%)。降低生物质生产成本可有效降低生物能源开发成本。在能源植物规模化种植过程中,主要采取两种途径:一是加强管理,开发采用丰产栽培技术,提高产量,降低投入,从而达到降低成本的目的;另外一条途径就是扩大种植规模,根据规模经济理论,在一特定时期内,产品绝对量增加时,其单位成本下降。

2.2.3 能量经济

由于农业机械、化肥和杀虫剂的使用,能源植

物生物质生产阶段所消耗的能量占整个产量链能量消耗的绝大部分,草本的油料和淀粉类作物比木本能源植物在生物质生产阶段其能量投资比例要大^[25]。净能量值(net energy value)和能值比(fuel energy ratio)是评价生物能源能量生产效率的两项重要指标。净能量值是生物能源燃烧释放的能量与其生产过程中所消耗的能量之差,而能值比则是生物能源燃烧释放的能量与其生产过程中所消耗的能量之比。在能源植物规模化种植过程中,选取高能量转换率的植物种类和提高光能利用率(延长光合时间、增加光合面积、加强光合效率)是提高净能量值和能值比的重要措施。

2.3 美学原则

美学原则是指能源林生态系统、能源田生产系统及藻类培养系统的构建应给人以美的享受。在构建过程中应考虑与周围景观的协调性。美学原则主要包括景观美学原则、健康原则和精神文化愉悦原则^[28]。

3 能源植物规模化种植技术体系

生物能源生物质生产方式主要有3种,根据其种植(或培养)模式,可分为木本、草本和藻类。木本植物规模化种植形成“能源林”;草本植物规模化种植形成“能源田”;能源微藻规模化培养形成“微藻产油工厂”。不同国家和地区根据其自然条件(地形地貌、气候条件、土壤条件)、经济发展水平、技术发展水平选择适合本国或本地区发展的生物能源生物质生产方式。

3.1 木本植物

木本能源植物规模化种植技术体系主要包括种植基地规划设计、林地整理、种植、林地生态系统管理、果实采收、林地更新六个部分^[29]。基地规划设计方案中应包括自然条件、社会经济条件、栽培技术、基地投资、基地管理等主要内容;林地的整理基本的要求是防止水土流失,其整地方法可分为全耕整地、块状整地和带状整地;种植包括种植密度、种植时间、种植方法及林地经营模式,如油桐经营模式有油桐林立体经营模式、纯林经营、桐农间作、零星种植等;林地生态系统管理主要包括土壤耕作、除草、整形、灌溉等;林地更新的主要方法有截枝更新、截干更新和矮桩更新。

木本能源植物生物质生产方式的优点是单位面积投资最少;不受地形限制,可在丘陵高山地区种

植; 对基质营养要求不高, 可在相对贫瘠的土地上种植; 生态系统服务功能相对较高, 如森林在气候调节、水土保持、土壤形成、水分调节、动物栖息地提供等方面相对于农田均有一定优势。该生产方式的主要缺点是单位面积产量低; 生产周期较长, 如油桐 2~3 年进入盛果期, 维持 10~20 年进入衰老期(表 2)。

3.2 草本植物

草本能源植物规模化种植技术体系主要包括播前准备、科学施肥、播种、田间管理和收获五个阶段。播前准备指品种选择、茬口选择、耕作整地、土壤施药、种子准备等; 科学施肥指施肥量和施肥方法的确定; 精细播种指适期早播、合理密植、播种方法的确定; 田间管理包括间苗定植、中耕除草、防治病虫害、适期灌水、施肥等; 收获指适期收获和及时脱粒等。

草本能源植物生物质生产方式的优缺点大体上介于木本植物和藻类之间。

3.3 藻类

能源微藻培养方式主要有开放式培养池和封闭式光合反应器两种, 目前进行商业化规模生产的方式是开放式培养池。生物能源生物质的生产大多倾

向于开放式培养池生产系统。开放式培养池生产系统技术体系包括基地建设、培养基的配制、接种、管理维护、收获和干燥六个阶段^[30]。基地建设包括平整土地、培养池的修建、培养池的防渗处理、混合曝气系统的安装、数据采集系统的安装等; 培养基的配制指按一定比例往培养池中加入水和营养盐; 接种指向混合均匀的培养基中加入藻种; 管理维护主要包括光温调控、CO₂ 气体供给、污染防治等; 微藻收集方法主要有离心、过滤、自然沉降、化学试剂悬浮等; 收集后的微藻干燥方法主要分为自然干燥和人工干燥, 人工干燥方法主要有喷雾干燥、滚筒干燥、冷冻干燥等。

微藻生物质生产系统优点是生产周期短, 产量大, 约是木本植物生物质生产能力的上百倍; 培养基质不是土壤, 而是人工配制的营养液, 因此该生产系统对土壤肥力没有要求, 可以利用一些低初级生产力的荒地; 该生产方式有工业生产的特点, 其人为可控制性较强。缺点是单位面积投入大; 除了固碳外, 几乎不提供其它生态系统服务功能; 技术含量高, 需要专业技术人员操作管理; 为了满足光热条件的要求, 延长生产时间, 微藻生物质生产系统应建在中低纬度地区(表 2)。

表2 三种能源植物生物质生产方式属性比较

植物种类	种植密度 (株/hm ² 或 个/hm ²)	单位面积 产量(吨/ hm ² /年)	单位面积 投资成本 (万元)	人为可 控制 程度	生态 系统 服务	适宜 种植 地形	培养基 质营养 要求	受环境因 素变化影 响程度	生产周期
木本植物(油桐)	低(450~900)	低(0.3)	低(0.6~1.2)	低	高	丘陵、 高山	低	低	长(×10年)
草本植物(油菜)	中(9~12×10 ⁴)	中(1.2)	中(4~8)	中	中	平地	中	中	中(×月)
藻类(葡萄藻)	高(×10 ¹¹)	高(60)	高(40~60)	高	低	平原或 沙地	高	高	短(×天)

4 研究展望

能源植物规模化种植是能源植物产业发展的基础, 其发展可借鉴农学和林业现有的技术体系, 未来主要研究方向主要集中在关键能源植物规模化种植技术体系; 建立关键能源植物规模化种植的综合评价标准体系, 包括经济性状、能源性状及生态效益评价标准体系; 建立我国宜能荒地资源时空数据库及演变模型和宜能荒地资源质量评价模型; 对关键能源植物规划化种植生命周期进行分析。

[参 考 文 献]

- [1] 农业部. 农业生物质能产业发展规划(2007-2015年) [R]. 2007
- [2] 吴国江, 刘杰, 姜治平, 等. 能源植物的研究现状及发展建议. 科技与社会, 2006, 21(1): 53-7
- [3] 周海霞, 袁丽红. 能源植物的开发与利用. 中国科技论文在线, 2008, 3(3): 179-83
- [4] 冯金朝, 周宜君, 石莎, 等. 国内外能源植物的开发利用. 中央民族大学学报(自然科学版), 2008, 17(3): 26-31
- [5] 杜宁. 国内外能源植物的利用和开发. 世界农业, 2006, (4): 57-60
- [6] 傅登祺, 黄宏文. 能源植物资源及其开发利用简况. 武汉

- 植物学研究, 2006, 24 (2): 183-90
- [7] Bassam NE. Energy plant species, their use and impact on environment and development. London: James and James (Science Publishers) Ltd, 1998
- [8] 《中华人民共和国可再生能源法》[S]. 2006
- [9] Baldock D, Beaufoy G, Brouwer F, et al. Farming at the margins. London: IEEP and The Hague: LEI-DLO, 1996
- [10] Strijker D. Marginal lands in Europe - causes of decline. *Basic and Applied Ecology*, 2005, 6: 99-106
- [11] 孙华, 倪绍祥, 张桃林. 退化土地评价及其生态重建方法研究. *中国人口资源与环境*, 2003, 13: 45-8
- [12] 戎郁萍. 我国弃耕地植被的恢复与重建. *四川草原*, 2004, 5: 1-4
- [13] 张丽芳, 濮励杰, 涂小松. 废弃地的内涵分类及成因探讨. *长江流域资源与环境*, 2010, 2: 180-5
- [14] 格默尔 RP. 工业废弃地上的植物定居[M]. 倪彭年译. 北京: 科学出版社, 1987
- [15] 钱金玲, 陈丽敏, 胡思达. 非粮能源植物的研究现状. *江西林业科技*, 2009, 5: 17-20
- [16] 寇建平, 毕于运, 赵立欣, 等. 中国宜能荒地资源调查与评价. *可再生能源*, 2008, 26: 63-9
- [17] 孙振钧, 王冲. 基础生态学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007
- [18] 蔡晓明. 生态系统生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [19] Liu ZH, Shao HB. Comments on main developments and trends of international energy plants. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2010, 14: 530-4
- [20] Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotech Advances*, 2007, 25: 294-306
- [21] Whisenant S. Repairing damaged wildlands: a process-oriented, landscape-scale approach. New York: Cambridge University Press, Port Chester, 1999
- [22] Robert F. Another biofuels drawback: the demand for irrigation. *Science*, 2009, 326: 516-7
- [23] Palmer MW, Pimentel D, Lal R, et al. Biofuels and the Environment. *Science*, 2007, 317 (5840): 897-8
- [24] Raghu S, Anderson RC, Daehler CC, et al. Adding biofuels to the invasive species fire? *Science*, 2006, 313 (5794): 1742
- [25] Cherubini F, Bird ND, Cowie A, et al. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation Recycling*, 2009, 53 (8): 434-47
- [26] Davis SC, Anderson-Teixeira KJ, DeLucia EH. Life-cycle analysis and the ecology of biofuels. *Trends Plant Sci*, 2009, 14 (3): 140-6
- [27] Mathews JA. Carbon-negative biofuels. *Energy policy*, 2008, 36: 940-5
- [28] 任海, 刘庆, 李凌浩. 恢复生态学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [29] 方嘉兴, 何方. 中国油桐[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998
- [30] Richmond A, Becker EW. Technical aspects of mass cultivation - a general outline[M]// Richmond AE. *Handbook of Microalgal Mass Culture*. Boca Raton; FL: CRC Press, 1986