

DOI: 10.13376/j.cblls/2014068

文章编号: 1004-0374(2014)05-0458-07

## 新型能源植物浮萍的研究进展

于昌江, 朱明, 马玉彬, 于丽, 周攻克\*

(中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 中科院生物燃料重点实验室, 青岛 266101)

**摘要:** 能源需求以及化石能源所产生的环境问题已引起全世界的重视, 而浮萍作为一种极具应用潜力生产生物燃料的非粮淀粉原料, 目前已受到越来越多的关注。对能源浮萍的生长特性、遗传学和生化方面及其主要应用现状进行综述, 并展望浮萍未来的发展前景。

**关键词:** 浮萍; 生物燃料; 污水处理; 饲料

**中图分类号:** Q948.8; TK6 **文献标志码:** A

## Advances in research on duckweeds--a new energy plant

YU Chang-Jiang, ZHU Ming, MA Yu-Bin, YU Li, ZHOU Gong-Ke\*

(Key Laboratory of Biofuels, Shandong Provincial Key Laboratory of Energy Genetics, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China)

**Abstract:** Energy demands and environmental problems caused by fossil energy attracted worldwide attentions. Duckweed as a potential candidate for biofuel feedstock has drawn more and more attention. This review article summarizes recent progresses on growth characteristics, culture conditions, genetics, biochemistry and main applications of duckweeds. In addition, we provide the outlook in some future research directions on duckweeds.

**Key words:** duckweed; biofuels; wastewater treatment; livestock feed

以非粮生物质资源为核心的“新一代生物燃料”纤维乙醇与微藻生物柴油具有良好的发展前景, 但由于一些关键技术瓶颈尚未突破, 导致较高的生产成本, 严重制约其向产业化的推广应用。尽管目前以玉米、小麦和木薯等淀粉资源为核心的燃料乙醇生产技术体系最为成熟完善, 并且生产工艺也最为简单, 但将导致“与人争粮、与粮争地”的困境, 因而该技术路线的燃料乙醇产业化也面临着难以解决的淀粉原料瓶颈。因此, 需要寻找适合燃料乙醇产业化发展的其他非粮淀粉类能源植物资源来解决原料瓶颈问题。

水生植物浮萍(duckweed)是浮萍科(Lemnaceae)植物的统称, 是一类漂浮在淡水湖、池塘和水池中的水生植物, 在世界各地均有分布, 其繁殖主要是通过从母叶状体无性繁殖出子叶状体, 繁殖速率几乎接近指数增长。Lemnaceae 包含 5 个属: 青萍(*Lemna*)、多根紫萍(*Spirodela*)、少根紫萍(*Landoltia*)、芜萍(*Wolffia*)和无根芜萍(*Wolffiella*), 约 38 个种。

尽管浮萍科植物已经被研究了近一个世纪, 但大多数研究主要集中于 *Lemna minor*、*Lemna gibba*、*Spirodela polyrhiza* 和 *Landoltia punctata* 等 4 个品种, 对其余品种的生物特性及潜在的应用价值了解甚少<sup>[1]</sup>。目前, 浮萍已被认为是最具有发展潜力的战略性新型非粮生物质原料之一, 有望部分解决燃料乙醇产业化发展所面临的淀粉原料瓶颈问题。此外, 浮萍在净化污水和改善水质等方面也具有重要作用。本文主要对浮萍的特性及其应用现状进行概述, 并展望浮萍未来的发展前景。

### 1 浮萍的遗传学和生化特性

#### 1.1 基因组和遗传分析

浮萍每个体细胞核的 DNA 含量在不同品种之

收稿日期: 2013-08-14

基金项目: 中国科学院青岛生物能源与过程研究所所长创新基金和旭阳煤化工集团有限公司资助项目

\*通信作者: E-mail: zhougk@qibebt.ac.cn

间的差异较大, 大约在 1.2~6.5 pg, 从而导致了不同品种和不同发育时期内浮萍染色体数目的变化<sup>[1]</sup>。Mardanov 等<sup>[2]</sup>在 2008 年完成了青萍 *Lemna minor* 叶绿体基因组测序工作, 并比较了浮萍与其他被子植物的亲缘关系。*Lemna minor* 叶绿体基因组由一个环状分子组成, 大小为 165 955 bp, 通过对 61 个叶绿体基因进行系统发育分析, 证明青萍与菖蒲科植物更为近缘。Wang 等<sup>[3]</sup>在 2012 年也完成了浮萍 *Spirodela polyrhiza* 线粒体基因组的测序分析, 研究发现 *S. polyrhiza* 线粒体基因组在所有已测序的单子叶植物线粒体基因组中是最小的, 共 228493 bp, 57 个基因编码 35 种已知蛋白质, 基于测序序列的系统发育分析证明了紫萍是最基本的单子叶植物。最近, 罗格斯大学的研究人员公布了紫萍基因组, 紫萍基因组共编码 19 623 个基因, 首次从进化角度分析了浮萍与其他作物基因组之间的区别与联系, 为进一步了解浮萍的遗传背景, 加速浮萍分子育种研究奠定了基础<sup>[4]</sup>。2013 年, Tao 等<sup>[5]</sup>利用营养缺乏诱导少根紫萍积累淀粉, 通过转录组测序分析了少根紫萍淀粉积累的途径, 揭示了在营养缺乏条件下, 少根紫萍降低了所有的代谢过程, 将固定的 CO<sub>2</sub> 更多的流入淀粉合成途径, 从而导致了淀粉的积累。目前, 本课题组针对筛选出的一株高淀粉青萍正开展转录组测序工作, 分析高淀粉青萍的淀粉生物合成机制, 以期为进一步培育高淀粉浮萍新种质资源奠定基础。

## 1.2 生化特性

目前关于浮萍次生代谢产物的报道甚少<sup>[6-13]</sup>, 没有发现有有毒的次生代谢产物, 因此, 几个世纪以来多种浮萍常被用来作为动物饲料。此外, 浮萍只含少量或不含木质素<sup>[4]</sup>。木质素的缺乏导致浮萍细胞壁非常脆弱, 这个特性可使浮萍细胞较其他陆生植物组织更易裂解, 故易于提取各种浮萍代谢产物。

紫萍是一种中药, 具有散热、透疹、利尿等功效, 临床上主要用于风湿麻痹、水肿、风热、隐疹、吐血和口舌生疮等。现代药理学研究表明, 浮萍具有利尿、抗菌、解热、强心等作用, 其主要有效成分可能是黄酮类化合物。目前已从浮萍中提取出了 5 种黄酮类化合物, 其具体药理机制还有待进一步研究<sup>[15]</sup>。

## 2 浮萍的应用

### 2.1 利用浮萍处理污水

#### 2.1.1 浮萍品种之间的性状差别

浮萍地理分布较为广泛, 其大量的品种资源可

以使浮萍适应广泛的生长条件, 不同品种间具有特定的性状, 包括对不同污水种类的适应能力、营养浓度耐受能力、营养吸收能力、生长速率和淀粉积累能力等。Edwards 等<sup>[16]</sup>比较了从泰国曼谷池塘中采集的 4 种浮萍, 发现培养 90 d 后, *S. polyrhiza* 产量 (20.4 t/hm<sup>2</sup>/a), 几乎是 *Lemna aequinoctialis* (10.9 t/hm<sup>2</sup>/a) 产量的 2 倍, 而 *L. perpusilla* 的蛋白质含量为 17.6%, 高于 *S. polyrhiza*。他们还发现, 当 *L. perpusilla* 与 *Wolffia arrhiza* 混合培养一段时间后, 池塘中会出现更高比例的 *W. arrhiza*, 从而导致了总生物量的降低。由于 3 种浮萍叶状体大小不同, 净化污水能力的顺序为 *S. polyrhiza* > *L. perpusilla* > *W. arrhiza*, 因此, 作者推测在某些特定的条件下, 浮萍生物量产量与其叶状体的大小有关, 即叶状体越大的浮萍, 其产量也较高。Vermaat 和 Hanif<sup>[17]</sup>利用标准矿物质生长培养基和 3 种不同类型的污水培养 5 种欧洲浮萍 (*L. gibba*、*L. minor*、*Lemna trisulca*、*S. polyrhiza* 和 *W. Arrhiza*), 并进行系统的生长比较研究, 发现相对于标准生长培养基, 所有 5 个浮萍品种在 2 种人工废水中都生产较少的生物量。然而, 在经沉淀的生活污水中, *L. gibba* 和 *S. polyrhiza* 的生长状态与标准生长培养基相似, 表明这 2 种浮萍对生活污水的适应能力优于其余 3 个品种。

经过厌氧处理后的养殖废水是一种浮萍快速生长的较好营养来源, 主要原因是厌氧处理后的养殖废水含有丰富的氨氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 而氨氮是浮萍首先利用的氮源形式。由于浮萍可以利用污水中高水平的氨氮, 从而可以筛选不同浮萍品种来处理畜禽养殖废水。Bergmann 等<sup>[18]</sup>通过两步处理法, 从养猪废水中筛选营养去除率和高生物量的 3 株浮萍 [来自于紫萍 (*Spirodela*) 或青萍 (*Lemna*)] 具备较大叶状体的种属, 这与 Edwards 等<sup>[16]</sup>研究结果一致。此外, Bergmann 等<sup>[19]</sup>进一步比较 *S. punctata* 7776、*L. gibba* 8678 和 *L. minor* 8627 在处理不同稀释倍数的厌氧处理的猪场废水能力时发现, 青萍的地理隔离可以生产更多的生物量和获得较高含量的营养组织成分, 如氮、磷和钾, 认为浮萍的地理隔离要显著强于浮萍品种之间的影响。在废水处理方面, *L. minor* 8627 更具潜力, 因为它具备更强的营养清除能力, 包括氮、磷、镁、铜和锌。

#### 2.1.2 营养浓度影响

根据污水的来源和废水滞留过程中的气候条件, 生活污水和养殖废水的营养水平差别很大。氮不仅是废水中含量最多的营养成分, 而且在浮萍的

代谢和繁殖过程中也起了非常重要的作用,因此,对于了解废水中氮的浓度与浮萍生长之间的关系已经做了大量工作。 $\text{NH}_4^+$ 是富营养化污水中氮的主要存在形式,尤其在厌氧处理的废水中。由于浮萍相对其他植物具备对 $\text{NH}_4^+$ 耐受能力,因此,浮萍更适合以 $\text{NH}_4^+$ 作为氮源来开发利用<sup>[20]</sup>,从而使浮萍成为从厌氧处理废水中去除营养的最理想的植物之一。然后,在高浓度 $\text{NH}_4^+$ 中浮萍生长显著受抑制,存在两种可能的解释:一种可能是 $\text{NH}_4^+$ 电离出的 $\text{NH}_3$ 是脂溶性的,容易通过细胞膜进入植物细胞从而扰乱细胞代谢<sup>[21]</sup>;另一种可能的解释是高浓度的 $\text{NH}_4^+$ 导致细胞膜强烈的去极化,从而抑制了阴离子通过细胞膜的运输<sup>[22]</sup>。Caicedo等<sup>[23]</sup>研究了生活污水中pH和总氮( $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{NH}_3$ )浓度对*S. polyrhiza*生长的影响,结果发现当pH<5或>8时,不利于浮萍生长。当pH在5~8的范围内时,低浓度的总氮含量(3.5~20 mg/L)或更低的pH会得到更高的生长速率。Körner等<sup>[24]</sup>通过调查生活污水(pH 6.8~8.7)中 $\text{NH}_3$ 和 $\text{NH}_4^+$ 浓度对于*L. gibba*生长的影响,提出在pH 6.8~8.7之间, $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{NH}_3$ 转换为毒性的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 低于1 mg/L。当 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度高于1 mg/L时,总氮对浮萍的毒性主要是未电离的 $\text{NH}_3$ 引起的,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的毒性影响可以忽略不计。同时还发现,未电离的 $\text{NH}_3$ 最大耐受水平在8 mg/L  $\text{NH}_3\text{-N}$ 左右。然而,在这些研究中, $\text{NH}_4^+$ 的最大耐受水平测定是不可能实现的,主要是因为需要极低的pH水平来排除 $\text{NH}_3$ 的影响。除了 $\text{NH}_4^+$ ,在一些富营养化的废水中,硝态氮( $\text{NO}_3^-$ )是氮的另一种普遍存在的形式。据报道,当缺乏 $\text{NH}_4^+$ 时,浮萍生长能使 $\text{NO}_3^-$ 的浓度可增加到300 mg/L氮。当培养环境中 $\text{NO}_3^-$ 大量存在时,一些 $\text{NO}_3^-$ 将存贮在浮萍的叶状体中,而在营养缺乏时,叶状体存贮的 $\text{NO}_3^-$ 又转换为活跃的代谢底物。然而,这种反应机制目前还不清楚。

在利用浮萍处理废水之前,应预先评估浮萍对营养水平的耐受能力。典型的生活废水中 $\text{NH}_4^+$ 浓度约为10~50 mg/L,适合浮萍的快速生长。然而,养殖废水具有较高的营养水平,因此,在用来培养浮萍前需要进行稀释。Xu和Shen<sup>[25]</sup>利用厌氧处理猪场废水培养*L. punctata*时,发现浮萍在10%~12%的稀释液中生长状态不好,但当浮萍在2%~8%的稀释液中生长时,总营养清除率和浮萍的生长速度随营养浓度的升高而增加。经过2周培养后,在8%的稀释液中总氮(TN)和总磷(TP)的清除率分别为54.6%和53.2%,而浮萍鲜重的增加量为30.1 g/m<sup>2</sup>/d。

Bergmann等<sup>[19]</sup>利用5种稀释浓度的猪场废水(67%、50%、33%、25%和20%)研究营养浓度对浮萍生长的影响(未稀释的废水,TN=262 mg/L、 $\text{NH}_4\text{-N}$ =172 mg/L、TP=87.5 mg/L、磷酸盐=50.6 mg/L),结果表明随着营养浓度的增加,总营养清除率和浮萍中所含营养成分(如氮、磷和钾)都随之增加,但浮萍生物量积累下降。经过12 d的培养后,67.7%~78.7%的TN和27.9%~60.7%的TP被清除,总生物量干重的增加量为79.9~99.0 g/m<sup>2</sup>,表明当稀释浓度为50%、33%和25%时,最适合废水处理和浮萍生长。

### 2.1.3 浮萍采收方式

定期采收对于维持健康的浮萍培养系统是非常重要的。尽管保持高密度有利于增加浮萍繁殖的基数,但是高密度的浮萍不可避免抑制浮萍的生长。高密度底部的浮萍由于缺少阳光最终导致死亡,彼此拥挤也对浮萍的繁殖产生负面影响。在过于拥挤的状态下,浮萍会迅速产生一些化学物质(如乙烯),可能影响浮萍的生长。因此,采取适当的采收体系可以帮助浮萍处于合适的生长密度,是浮萍正常生长系统的关键。在实验室条件下,浮萍通常是用过滤器采收的。Krishna和Polprasert<sup>[26]</sup>在4个不同放养密度下(0.3、0.5、0.9和1.2 kg/m<sup>2</sup>鲜重)调查浮萍污水处理系统的有效性,其结果表明当放养密度为0.5 kg/m<sup>2</sup>时,保持每天收获一次,TN最大去除率可以达到58%,生物量的产量为6.13 g/m<sup>2</sup>/d。为了确定最佳采收频率,Xu和Shen<sup>[25]</sup>每次采收20%浮萍,浮萍起始浓度为210 g/m<sup>2</sup>鲜重,采收频率分别为一周3次、一周2次、1周1次、2周1次和4周1次,其结果表明采收浮萍越频繁,一般会得到更好的营养去除率,采收频率为2周1次会得到最大的生物量积累。在任意的采收频率下,浮萍的密度最终会达到一个稳定水平。尽管在较低的采收频率时,水面上的浮萍会较厚,浮萍繁殖基数具有优势,但是生物量会受到过于拥挤的负面影响。进一步研究4种采收策略,分别为每周2次采收20%的浮萍、1周1次采收40%的浮萍、2周1次采收60%的浮萍和4周1次采收80%的浮萍,4种采收方式的起始量分别为211、158、105和53 g/m<sup>2</sup>鲜重。实验结果表明,在较短的时间间隔内采收少量的浮萍,可以增加营养去除率和生物量产量。

在浮萍的收获期间,一定要保留至少一层的浮萍能够覆盖水面是非常重要的,这样可以防止藻类生长。藻类的生长不仅可以消耗培养体系中 $\text{CO}_2$ ,

而且还导致 pH 值升高, 进而影响浮萍的正常生长。一般浮萍的最适 pH 范围在 5~9 之间, 尽管大多数废水的 pH 符合浮萍快速生长的需求并具有一定的缓冲能力, 但是藻类的过度生长可以导致 pH 值迅速升高, 常常超过 10, 这对浮萍生长非常有害。藻类还可通过竞争营养和空间来抑制浮萍的生长, 一些丝状藻类通过缠绕在浮萍的根部和叶状体上, 导致浮萍死亡。此外, 利用浮萍完全覆盖水表面也可以降低水分的蒸发, 从而减少水量的需求。

## 2.2 利用浮萍转化生物燃料

### 2.2.1 培养高淀粉浮萍

浮萍淀粉含量随着浮萍品种、生长状态和发育阶段的不同而变化。在浮萍污水处理系统中, 为了获得较高的生物量, 需挑选具备快速生长和高营养去除率的浮萍株系。然而, 在这种环境中收获的浮萍的淀粉含量可能并不高, 原因在于利用非粮淀粉浮萍作为生产生物燃料的原料之前, 需要先进行淀粉的诱导积累。绿色植物通过光合作用合成葡萄糖, 再以淀粉形式储存, 并通过呼吸作用获得能量来维持代谢和形成碳骨架, 从而合成细胞生长和繁殖所需的化合物。为了使浮萍积累大量淀粉, 浮萍的光合作用必须大于呼吸作用, 对刺激光合作用或限制呼吸作用已经进行了一些研究报道<sup>[27]</sup>。

Pankey 等<sup>[28]</sup>研究了 CO<sub>2</sub> 补充和光照时间对于 *S. polyrhiza* 淀粉合成的影响, 表明 *S. polyrhiza* 培养在 30 °C 和光照强度为 58 μmol/m<sup>2</sup>/s 的无机营养液中, 增加 5% 的 CO<sub>2</sub> 对淀粉含量没有显著的影响。这一结果与 Jacobs<sup>[29]</sup> 的前期研究相符合, 即尽管额外的 CO<sub>2</sub> 可以增加光合作用效率, 但同时也刺激浮萍生长, 最终导致额外的光合产物进行呼吸作用, 而不是进行淀粉积累。此外, 研究也表明浮萍淀粉含量与光照呈现显著的正相关, 当光照时间由 8 h 延长至 14 h, 浮萍淀粉含量由 5% 增至 17%。Cui 等<sup>[30]</sup>利用 *S. polyrhiza* 研究在不同温度下光周期与淀粉积累的影响, 发现在 25 °C 和光照强度为 40.5 μmol/m<sup>2</sup>/s 条件下, 将光照时间从 8 h 延长至 16 h, 淀粉含量增加 50%, 在 15 °C 和 5 °C 也得到同样的结果。

很多方法可以降低浮萍的呼吸速率, 其中最有效的途径是营养缺乏。众所周知, 缺氮可以降低浮萍的营养生长, 从而诱导淀粉积累。浮萍在缺氮时, 生长速率下降的主要原因在于低水平的淀粉分解活性及低蛋白质合成效率。相反, 磷缺乏也可以诱导淀粉积累, 主要是通过提高蔗糖合成途径的活性。Cui 等<sup>[30]</sup>发现, 将富含营养的生长培养基替换为并

水时, 在任意温度和光周期的组合下, *S. polyrhiza* 的淀粉含量都持续增加。Cheng 和 Stomp<sup>[31]</sup>报道将 *S. polyrhiza* 从营养液中转移到自来水中, 5 天后淀粉含量增加了 45.8%。除了营养缺乏能诱导淀粉积累外, 在浮萍培养液中加入一定抑制作用的化学品也可以促进浮萍淀粉的积累, 如脱落酸 (ABA) 和细胞分裂素。在生长培养基中添加 1 ppm 的 ABA 时, *L. gibba* 淀粉含量大幅提高。当利用 1 μmol/L ABA 培养 *L. minor* 6 d 时, 相比对照, 淀粉含量增加接近 500%<sup>[32]</sup>。McCombs 和 Ralph<sup>[33]</sup>研究了细胞分裂素处理 *L. punctata* 后的淀粉代谢, 发现在黑暗环境中, 加入了细胞分裂素可以抑制了浮萍的生长从而促进淀粉积累。一些抑制生长的化学品也被用来研究其促进浮萍淀粉积累的能力。Apicidin 是一种环状四肽真菌毒素, 当添加到浮萍 *Lemna pausicostata* 培养液后, 淀粉主要在叶状体的叶绿体和根部的质体中大量积累, 且在随后 72 h 内淀粉颗粒不断变大。此外, 重金属也被报道可以通过减少碳水化合物的消耗来抑制浮萍生长, 从而诱导淀粉积累<sup>[34]</sup>。

在实际应用中, 营养缺乏是目前规模化培养浮萍最经济可行的方法。Xu 等<sup>[35]</sup>利用商业农场废水培养高淀粉浮萍来生产生物乙醇。为了获得高生物量, 将 *S. polyrhiza* 培养在长、宽、深分别为 30 m、10 m、1 m 的培养池中, 利用厌氧废水培养, 培养池中 NH<sub>4</sub>-N 为 20 mg/L, 浮萍每周采收 3 次。为了诱导浮萍淀粉积累, 在采收浮萍后, 将浮萍转移至清水中进行营养饥饿处理, 其结果表明在 4 周的实验期间, *S. polyrhiza* 在稀释的猪场废水中快速生长, 生物量干重的产量为 12.4 g/m<sup>2</sup>/d, 且氨氮和磷酸磷的清除速率分别为 1.08 和 0.10 g/m<sup>2</sup>/d。将浮萍转入清水 8 d 后, 浮萍的淀粉含量从 17.6% 增加到 31.0%, 而浮萍的生物量增加 81.4%, 至此, 浮萍的总淀粉含量增加了 220%。浮萍在清水中的持续生长被认为是利用了浮萍自身储存的营养。假设玉米的淀粉产量是 5.70 t/hm<sup>2</sup>/a, 浮萍只需要 5 个月即可达到相同的淀粉产量。因此, 浮萍被认为是一种极具应用潜力的生产生物燃料的非粮淀粉原料。

### 2.2.2 浮萍转化生物燃料

浮萍是一种非常具有潜力的淀粉类能源植物, 其优势在于: (1) 浮萍是生长速度最快的植物之一, 其繁殖率几乎接近指数增长, 其生物量每 2 d 就可以增加一倍; (2) 淀粉含量极高, 经过诱导后可以达到干重的 65%; (3) 它能在城镇化和养殖等污水中直接快速生长, 生产非粮淀粉原料的同时起到净

化污水作用；(4) 它具有较强的耐受性以及弱光生长特性，这为进行低成本、低能耗规模化立体化多层培养奠定了基础；(5) 由于浮萍漂浮在水面上形成茂密的叶状体，所以极易采收；(6) 纤维素含量低，植物高级结构少，易于高效发酵利用。因此，能源浮萍具有非常广阔的开发利用前景。国外对浮萍的应用价值认识较早，也充分认识到了其作为能源植物资源的潜在价值。

Cheng 和 Stomp<sup>[31]</sup> 根据玉米淀粉糖化作用的方法，利用  $\alpha$ -淀粉酶、支链淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶酶解高淀粉含量的 *S. polyrhiza* (淀粉含量 45.8%)，总还原糖的产量可以达到 509 mg/g 干重。利用酵母发酵水解产物，最终得到 258 mg/g 干重的乙醇。这些结果表明，利用现有的成熟生产工艺，非粮浮萍淀粉可以低成本地转化为燃料乙醇。Xu 等<sup>[35]</sup> 利用一个连续搅拌的发酵罐反应器对 *S. polyrhiza* (淀粉含量 31%) 进行酶解并用酵母发酵；采用相似的酶解方法，还原糖的回收率达到了 96.8%；利用酿酒酵母 (ATCC 24859) 发酵后，燃料乙醇的最终浓度为 33.6 g/L，乙醇产量为 97.8%。整个过程淀粉的转化效率为 94.7%，表明非粮浮萍淀粉可以高效低成本地转化为乙醇。为了更好地评估浮萍生产生物燃料的前景，Xu 等<sup>[35]</sup> 假设浮萍一年生长 9 个月，浮萍的生长状态和淀粉转化乙醇效率与实验室内研究结果类似，利用浮萍生产乙醇平均产量可以达到 8~14 t/hm<sup>2</sup>。根据可再生燃料协会的报告，玉米淀粉的乙醇平均产量为 1.76 t/hm<sup>2</sup>，那么浮萍生产的乙醇是玉米的 4~7 倍。同样，浮萍与其他作物乙醇产量相比较也有较强的优势 (表 1)。2013 年，美国普林斯顿大学 Richard 等<sup>[36]</sup> 报道了利用已有技术经全局优化设计合成了浮萍制交通燃料，表明当油价超过每桶 100 美元时，小规模浮萍炼制过程 (每天生产 1 千桶交通燃料) 即可在成本上与石油交通燃料竞争，而较大规模浮萍炼制过程 (每天生产 5 千桶交通燃料) 则在油价超过每桶 72 美元时就可与石油交通燃料竞争，进一步表明浮萍是最具有发展潜力的战略性新兴产业非粮生物质原料之一。

### 2.3 利用浮萍生产优质饲料

20 世纪 70 到 80 年代，对于浮萍的关注主要是由于其可以作为优质动物饲料。不同的品种和在不同生长状态下，浮萍蛋白质含量差异很大，其蛋白质含量范围约占干重的 15%~45%。浮萍的蛋白质含量接近于大豆的蛋白质含量 (33%~49%)，高于谷物的蛋白质含量，可部分替代玉米和大豆等作为

表1 浮萍与其他作物乙醇产量的比较

作物	年产量 (t/hm <sup>2</sup> )	年产淀粉(糖)量 (t/hm <sup>2</sup> )	理论乙醇产量 (t/hm <sup>2</sup> )
浮萍	55.0	16.5	8.43
玉米	5.7	3.45	1.76
甘薯	35.0	7.00	3.57
甘蔗	70.0	8.75	4.47
木薯	34.0	8.50	4.34
小麦	4.5	2.97	1.51

高蛋白动物饲料。另一方面，浮萍植物体内只含有少量的纤维素，并且基本不含难以消化的木质素，有利于被动物直接吸收利用。而一般的植物秸秆，如大豆、水稻和玉米等含有约 50% 的高纤维，不易被动物消化吸收，能被单胃动物消化的部分仅占总质量较小的部分。

浮萍蛋白质的氨基酸组成也比较理想，很接近动物蛋白质，可以被动物高效利用。浮萍蛋白质的氨基酸组成与大豆饼非常相似，使浮萍成为一种可替代大豆饼饲料的蛋白质原料。Culley 等<sup>[37]</sup> 利用浮萍作为饲料喂养奶牛、猪、绵羊、山羊、家禽和鱼类的研究表明，浮萍可以提供动物所需的大部分蛋白质，且没有不良影响。相比单纯的植物饲料，添加了浮萍的植物饲料喂养动物可以得到更高的生长速率。一些仅单独使用浮萍作为饲料的实验也得到了正常的动物生长速率的结果。

### 3 发展与展望

能源浮萍既是高能效的非粮淀粉原料，又具有显著的环境友好综合利用优势，能兼顾国家发展生物质能源“不与人争粮、不与粮争地”基本原则，以及“能源、环境、经济”协调发展的“3E”原则，是生物质液体燃料未来最具发展潜力的战略性新兴产业非粮淀粉原料之一，因此，加速相关应用基础研究是非常重要的。由于不同浮萍品种的淀粉含量、蛋白含量及清除废水能力有很大差异，因此，尽可能多的收集具有特色的浮萍品种资源是十分必要的。在国内，中科院青岛生物能源与过程研究所收集了国内 300 多份浮萍品种资源，中科院成都生物所也收集了国内南方的很多品种资源。在国外，Lam 等<sup>[38]</sup> 收集了世界各地 700~800 多个浮萍株系，目前正在大量筛选适合不同需求的特定性状的浮萍。此外，高效稳定的浮萍遗传转化体系的构建和完整的参考基因组信息的注释，对于利用现代分子生物学技术改造浮萍以及挖掘浮萍的潜力十分重要。

目前已有大量研究利用废水培养浮萍并转化生物燃料, 但对于规模化培养并提供持续、充足的非粮浮萍淀粉原料和能源化产业示范则需要进一步加强研发, 这对于未来浮萍的开发利用是一个新挑战。值得一提的是, 中科院青岛生物能源所正在构建一种集废水处理、浮萍淀粉积累、生物燃料和高值化产品于一体的浮萍资源化综合利用的循环经济新模式, 以非粮浮萍淀粉为原料生产燃料乙醇、丁醇、异戊二烯等燃料和高附加值化学品的研究基地, 并取得了显著的研究进展。此外, 在农业废水、畜禽养殖废水和农村生活废水集中区域建立非粮浮萍淀粉原料生产基地, 同时建设规模不等的加工转化系统, 可带动农民增收, 解决农村劳动力就业问题, 保护生态环境, 促进社会和谐发展。大规模发展浮萍能源产业链, 有利于农村富余劳动力的就近转移, 减少大中城市人口及就业压力, 缩小城乡差距, 走出一条具有中国特色的现代化发展道路。

与其他资源相比较, 能源浮萍的研发在全球范围内还处于前期阶段, 能源化和高值化利用的开发更是刚刚起步。美国能源部生物能源项目主任 Paul Bryan 在美国华盛顿召开的中美先进生物燃料第五次工作组会议上特别提到“浮萍是未来 10 年内可实现能源产业化的能源植物”, 因此, 浮萍已成为世界范围内又一资源争夺的热点, 世界上许多国家都制定了相应的研究与开发计划, 并开展了大量的研究工作, 以期通过加强对非粮浮萍淀粉资源的研发来抢占先机。

### [参 考 文 献]

- [1] Hejný S. Ellias landolt The family of *Lemnaceae*-a monographic study - Vol.1 biosystematic investigations in the family of Duckweeds (*Lemnaceae*) (Vol. 2). Folia Geobot Phytotaxonom, 1993, 28(1): 5-50
- [2] Mardanov A, Ravin N, Kuznetsov B, et al. Complete sequence of the Duckweed (*Lemna minor*) chloroplast genome: structural organization and phylogenetic relationships to other angiosperms. J Mol Evol, 2008, 66(6): 555-64
- [3] Wang W, Wu Y, Messing J. The mitochondrial genome of an aquatic plant, *Spirodela polyrrhiza*. PLoS One, 2012, 7(10): e46747
- [4] Wang W, Haberer G, Gundlach H, et al. The *Spirodela polyrrhiza* genome reveals insights into its neotenus reduction fast growth and aquatic lifestyle. Nat Commun, 2014, 5: 3311
- [5] Tao X, Fang Y, Xiao Y, et al. Comparative transcriptome analysis to investigate the high starch accumulation of duckweed (*Landoltia punctata*) under nutrient starvation. Biotechnol Biofuels, 2013, 6: 72
- [6] McClure JW, Alston RE. Patterns of selected chemical components of *Spirodela oligorhiza* formed under various conditions of axenic culture. Nature, 1964, 201(491): 311-3
- [7] McClure JW, Alston RE. A chemotaxonomic study of *Lemnaceae*. Am J Bot, 1966, 53(9): 849-60
- [8] Previtera L, Monaco P. Fatty acid composition in *Lemna minor* - characterization of a novel hydroxyl C<sub>16</sub> acid. Phytochem, 1983, 22(6): 1445-6
- [9] Previtera L, Monaco P. A linear diterpene diol from *Lemna minor*. Phytochem, 1984, 23(1): 194-5
- [10] Monaco P, Previtera L. Oxygenated fatty acids from *Lemna trisulca*. Phytochem, 1987, 26(3): 745-7
- [11] Suzuki Y, Yamaguchi I, Murofushi N, et al. Synthesis of benzyl-6-O-β-D-apiofuranosyl-β-D-glucopyranoside, a metabolite of benzoic acid in *Lemna paucicostata*. Agri Biol Chem, 1988, 52(5): 1261-6
- [12] Dembitsky VM, Rozentsvet OA, Zhuikova VS, et al. Lipid composition of freshwater macrophytes from the Volga River estuary. Phytochem, 1992, 31(9): 3259-61
- [13] Blazey EB, McClure JW. The distribution and taxonomic significance of lignin in the *Lemnaceae*. Am J Bot, 1968, 55(10): 1240-5
- [14] Rolfe SA, Tobin EM. Deletion analysis of a phytochrome-regulated monocot rbcS promoter in a transient assay system. Proc Nat Acad Sci USA, 1991, 88(7): 2683-6
- [15] 何文妮, 叶敏, 王宝荣, 等. 浮萍中黄酮类化学成分的分离与鉴定. 沈阳药科大学学报, 2010, 27(11): 871
- [16] Edwards P, Hassan MS, Chao CH, et al. Cultivation of duckweeds in septage-loaded earthen ponds. Bioresour Technol, 1992, 40(2): 109-17
- [17] Vermaat JE, Hanif MK. Performance of common duckweed species (*Lemnaceae*) and the waterfern *Azolla filiculoides* on different types of waste water. Water Res, 1998, 32(9): 2569-76
- [18] Bergmann BA, Cheng J, Classen J, et al. *In vitro* selection of duckweed geographical isolates for potential use in swine lagoon effluent renovation. Bioresour Technol, 2000, 73(1): 13-20
- [19] Bergmann BA, Cheng J, Classen J, et al. Nutrient removal from swine lagoon effluent by duckweed. Trans ASAE, 2000, 43(2): 263-9
- [20] Oron G. Duckweed culture for wastewater renovation and biomass production. Agric Water Manage, 1994, 26(1): 27-40
- [21] Warren KS. Ammonia toxicity and pH. Nature, 1962, 195(4836): 47-9
- [22] Ingermarsson B, Oscarsson P, Uggla MA, et al. Nitrogen utilization in *Lemna* III. Short term effects of ammonium on nitrate uptake and nitrate reduction. Plant Physiol, 1987, 85 (3): 865-7
- [23] Caicedo JR, vander Steen NP, Arce O, et al. Effect of total ammonia nitrogen concentration and pH on growth rates of duckweed (*Spirodela polyrrhiza*). Water Res, 2000, 34(15): 3829-35
- [24] Körner S, Das SK, Veenstra S, et al. The effect of pH

- variation at the ammonium/ammonia equilibrium in wastewater and its toxicity to *Lemna gibba*. *Aquat Bot*, 2001, 71(1): 71-8
- [25] Xu J, Shen G. Growing duckweed in swine wastewater for nutrient recovery and biomass production. *Bioresour Technol*, 2011, 102(2): 848-53
- [26] Krishna KCBal, Polprasert C. An integrated kinetic model for organic and nutrient removal by duckweed-based wastewater treatment (DUBWAT) system. *Ecol Eng*, 2008, 4(3): 243-50
- [27] Jacobs DL. An ecological life-history of *Spirodela polyrrhiza* (greater duckweed) with emphasis on the turion phase. *Ecol Monogr*, 1947, 17(4): 437-69
- [28] Pankey RD, Draudt HN, Desrosier NW. Characterization of the starch of *Spirodela polyrrhiza*. *J Food Sci*, 1965, 30(4): 627-31
- [29] Jacobs DL. An ecological life-history of *Spirodela polyrrhiza* (greater duckweed) with emphasis on the turion phase. *Ecol Monogr*, 1947, 17(4): 437-69
- [30] Cui W, Xu J, Cheng JJ, et al. Starch accumulation in duckweed for bioethanol production. *Biol Eng*, 2011, 3(4): 187-97
- [31] Cheng JJ, Stomp AM. Growing duckweed to recover nutrients from wastewater and for production of fuel ethanol and animal feed. *Clean Soil Air Water*, 2009, 37(1): 17-26
- [32] McLaren JS, Smith H. The effect of abscisic acid on growth, photosynthetic rate and carbohydrate metabolism in *Lemna minor* L. *New Phytol*, 1976, 76(1): 11-20
- [33] McCombs PJ, Ralph RK. Protein, nucleic acid and starch metabolism in the duckweed, *Spirodela oligorrhiza*, treated with cytokinins. *Biochem J*, 1972, 129(2): 403-17
- [34] Appenroth KJ, Krech K, Keresztes A, et al. Effects of nickel on the chloroplasts of the duckweeds *Spirodela polyrrhiza* and *Lemna minor* and their possible use in biomonitoring and phytoremediation. *Chemosphere*, 2010, 78(3): 216-23
- [35] Xu J, Cui W, Cheng JJ, et al. Production of high-starch duckweed and its conversion to bioethanol. *Biosystems Eng*, 2011, 110(2): 67-72
- [36] Richard C, Josephine A, Christodoulos A, et al. Thermochemical conversion of duckweed biomass to gasoline, diesel, and jet fuel: Process synthesis and global optimization. *Ind Eng Chem Res*, 2013, 52(33): 11436150
- [37] Culley E, Rejmankova J, Kvet J. Production, chemical quality, and use of duckweed (*Lemnaceae*) in aquaculture, waste management, and animal feeds. *J World Maric Soc*, 1981, 12: 27-49
- [38] Lam E, Appenroth KJ, Michael T, et al. Duckweed in bloom: the 2nd international conference on duckweed research and applications heralds the return of a plant model for plant biology. *Plant Mol Biol*, 2014, 84(6): 737-42