

# 以人工光合作用从阳光收集能源

贺美婉

太阳能是迄今为止最丰富的可再生的零排放碳能源，人工光合作用可能是最有效的储能手段、并使它更可随处供应。

## 太阳提供的能源显然最大

全球能源需求预计将增加 57%，从 2004 年的 14.9 太瓦（149 亿千瓦）（1 太瓦 = 1,000,000,000,000 瓦）到 2030 年的 23.4 太瓦（234 亿千瓦）[1]。假如要把二氧化碳排放水平保持在各国政府间气候变化小组制定的、为大多数政府所接受的目标 550 ppm 之下的话，开发‘中碳’能源是件颇为紧迫的事。

除了不安全、不经济之外，原子能存在固有的不可持续性[2]（见“原子能黑洞和其他文章” SiS 40），估计铀矿资源只够生产 100 太瓦/年的电力，并会在十年内用尽。采用吸收碳并把它存储在地下深水层，同样是太晚、太昂贵且效果不佳[3]（见“碳吸收和存储，一种虚假的解决办法” SiS 39）。德国联邦政府委任的一项研究发现，碳吸收和存储所释放的二氧化碳比风能和太阳能高 10 到 40 倍，而且无法降低石化燃料日益上涨的成本[4]（可再生能源对碳吸收和存储，SiS 39）。要达到经济上可行，二氧化碳吸收和存储必须做到在百年之内全球平均释放率不超过 1%；否则，释放通量将超过或相当于开初想减轻的通量而已。

在可再生能源中，太阳提供的能源显然最大。到达地球表面的太阳能十分巨大，近似于 120 000 太瓦（1 200 000 亿千瓦）；现在只有非常小的一部分，<0.001% 被用来生产 145 吉瓦（1450 亿千瓦）（1 吉瓦 = 1,000,000,000 瓦）的电力[5]（见 全球转向可再生能源，SiS 43）。

## 收获阳光有多种方法但储存是一个问题

收获阳光有许多方法，它涉及吸收和转化，但储能是一个问题。太阳能的吸收和转化现在依靠光伏电，把阳光变成电力，还有太阳热能，把太阳光加热（和冷却）水和空间。集中太阳能发电使用聚焦镜，在白天跟着太阳转动，是太阳热能的最高端，能产生的热电相当于太阳的千万倍[6]。热电可以联产。热电联产在欧洲有，在澳大利亚、美洲和中国也正在发展。

不过，阳光照射有间歇，只能依靠白天。所以，假如人们想把太阳能变成社会的主要能源的话，它必须有效率高的、有成本效益的存储设备。太阳能电力已经引领了可再生能源市场[5]，当世界正从常规的石化能源转向可再生能源时，我们应该整合太阳能的吸收、转化、存储功能。

原则上，电力能储存在电池里，但电池仍然过于昂贵。另一种方法是机械化储能，用电把水泵到山上，但这意味着日夜都要充电和放电。按美国能源要求，日夜周期要有缓冲，这可能需要泵水

的能力相当于 5 000 多座胡佛水库日夜加灌和放水。太阳热能可储存在高于或低于周围温度绝缘的水库的水里，夜间用来加热空间、白天冷却空间[7]。

大自然发明了一种储存太阳能的方法，那就是光合作用，它利用日光劈开水分子，释放出氧气，与氢一起把二氧化碳固定在碳水化合物中，创造出生物量[8] (见有氧生活, *SiS* 43)。光合作用有效地向世界提供食物、纤维、建筑材料和燃料(生物量和石化燃料)。最近生物能源作物的兴起在加速砍伐森林和推动粮价上涨，特别是发展中世界的粮价方面是灾难性的[9] (见生物燃料；生物破坏、饥饿和虚假的碳信贷 *SiS* 33)。

就吸收阳光以作它用而言，光合作用的问题是，在收获太阳能时尚未进化出效率最大化的机制，因为太阳能极少有限制。植物进化出很多机制来保护它们自己不受强烈阳光给予的具有氧化特性的损害。

据估计，光合作用的理论最大效率是~9%[10]。瞬时效率只能在低光强度下获得，那里每种适合波长的入射光子都能被吸收并被用作生产性电子的转移(看下面)。在强烈的阳光下自然的光合作用只能利用小部分入射光子。后阶段的固碳效率将进一步下降。许多行光合作用的生物，其光合作用效率有季节性变动。因此，陆上生物能源作物的光合作用的平均效率最好也不到 0.2%，微藻的效率小于 5%[11] (见 [12] 盐碱地农业向世界供应食物和燃料, *SiS* 42)。

## 人工光合作用

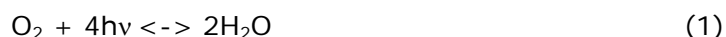
储存太阳能的一个途径是人工光合作用，人工光合作用企图重复和改进自然过程，主要是用获得的氢作燃料电池的燃料，也包括光电化分离水为氢和氧(燃料电池的逆序，氢和氧结合成为水，把储存在氢中的能释放出来)(见图 1) [13]。在光化学或光电化学(PEC)系统，光敏半导体材料形成一个节点，与液体或固体电解质相接。在照明光敏半导体材料中，因为结潜能而产生电子-空穴对。光诱导的电子-空穴对(水的案例中是  $e^-$  和  $H^+$ )驱动化学还原(图 1, 左)和氧化(图 1, 右)分别形成氢和氧。于是，水在两个半-反应中被劈为元素，水的氧化成氧，质子还原成氢，每种反应需要它自己的催化剂和最优化条件。以这种方式光能直接转化成化学能，而不是电能如固态或电化光伏电池那样。

图 1 光电化电池

## 把阳光转化为燃料和储存能源

把阳光转化为燃料的基本要求是一种低能电子源的氧化(从低能电子源除去电子)产生由化学(接受电子的)还原为一种高能源[14]。在植物的光合作用中，水是基本的电子提供者。水是一种最理想的电子源，因为它的低能源含量、丰富且能生产氧气，氧在还原燃料氢的要求下做出反应，释放能源。

氧和水之间的相互转化用公式(1)解释，其中， $h\nu$ 代表光合作用相应波长的光子（光量子）（见图1）



在光合作用中从水中萃取的电子受阳光提供的能源放大，所以，它能产生化学还原的高能。从热动力学视角看，氢的生产（还原质子）是近似于  $\text{NADP}^+$  辅酶的还原，最终，二氧化碳变成碳水化合物。



在光合作用中氧化还原化学的结合有一个公式（3）表示



能源的变化可从标准还原电位（也被称之为还原氧化电位或电子化学电位）（见方框图）估计

$$\Delta E^{0'} = -1.23 \text{ V}$$

这相当于以下公式中标准自由能源（代表储存在燃料中的能源氢或生物量中的当量）的变化

$$\Delta G^{0'} = 474 \text{ kJ mol}^{-1}$$

这一带氧燃料的随后的反应是释放储存的太阳能，公式（3）的逆序，

$$\Delta E^{0'} \text{ 为 } 1.23 \text{ V} ; \Delta G^{0'} \text{ 为 } -474 \text{ kJ mol}^{-1}。$$

### 还原电势（还原电位）

还原-氧化反应是生物能学的东西，涉及到从一种物质（提供者）转到另一种物质（接受者）根据它们的相对还原电位电子转移。还原电势（也称还原-氧化电势）是物质的一种互相吸引电子的特性。每一种物质的值与氢的值相比较，氢定为零，标准条件  $25^\circ\text{C}$ .1 个大气压和 1 M 浓度。

有正还原-氧化电势的物质从氢那里获得电子，被还原，而具有负还原-氧化电势的物质捐电子给氢，被氧化。还原氧化电势也是电化学电势和固体物理所用的费密水平[15]。

### 主要障碍

在 1974 年石油危机时在经济合作和发展组织内部成立了国际能源机构以合作态度来应对有关能源的挑战，1977 年建立了它的氢计划（氢履行协议 HIA）。在 HIA 协议中包括了氢的光电生产，从 1999 年

开始，涉及来自日本、瑞典、瑞士、和美国 9 个研究小组。2004 年发表的报告说，他们尚未完成取得 10%的光-氢转化效率的最后目标，但是已经见到了‘曙光’[12]。

主要的障碍是：

- 缺少有效的光吸收材料；合理的效率，半导体的带隙必须小于 2.2 电子伏、大于 1.6 电子伏。
- 半导体的腐蚀；从热动力学上看，大多数带相应能带隙的半导体在水里是不稳定的。
- 半导体的能量学（能量关系、能量使用、能量输出）；为析氢、析氧反应，匹配半导体带边能源。

为了克服这些障碍，我将叙述最新的一些进展，也将详细地解释人工光合作用。

李康民译