

On the Industrialization of High Carbon Agriculture and Its Sustainable Development in China

—A Discussion for the Possible Solution of Four Major Global Obstacles: Climate Change, Crop Production, Energy Crisis and Difficult Site

Yingtian Chen^{1*}, Mingzhou Yang², Donglai Yuan³, Cong Zhang⁴, Zuping Liu⁵, Sen Hu⁵

¹Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

²Information Center of National Energy Commission Administration of China, Beijing

³Beijing Forestry University, Beijing

⁴Beijing Energy Association & Beijing Sunco Ltd., Beijing

⁵University of Science and Technology of China, Hefei

Email: *ytichen@ustc.edu.cn

Received: Nov. 6th, 2013; revised: Nov. 8th, 2013; accepted: Nov. 8th, 2013

Copyright © 2013 Yingtian Chen et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The pollution of the air, water and land has seriously threatened our society. Hence, the three global obstacles, *i.e.*, climate change, crop production and energy crisis, have formed the major restrictive factors for the further development of humankind. The authors proposed that the carbon emission which was regarded as waste and a source of pollution can be captured and converted into useful resources for increasing the agriculture production. Contrary to the low carbon economy in conventional industry, the proposed high carbon agriculture may provide a way toward the solution of these four major global obstacles. For the enhanced carbon cycle as proposed, we analyzed the scientific progresses of a number of modern technologies. Thus, it is proposed in the article that a high carbon climate environment based on the solar photovoltaic and solar thermal with the combination of the technologies of LED, CO₂ fertilizer, optical fiber, geological heat, etc., can be realized in a small geological area to make the high-carbon agriculture possible. The proposal is of a special significance for the urbanization of China as promoted by the Chinese government recently.

Keywords: High Carbon Agriculture; Climate Change; Crop Production; Energy Crisis; Difficult Site; Carbon Emission; Agriculture Factory; Solar Electricity and Solar Thermal; Solar Optical Fiber, LED; Underground Workshop with Transparent Rooftop

推动富碳农业工业化模式，促进我国农业可持续发展

—谈气候变化、粮食安全、能源危机和困难立地四大近代难题的可解决办法

陈应天^{1*}, 杨名舟², 袁东来³, 张 聪⁴, 刘祖平⁵, 胡 森⁵

¹中国科学院理论物理研究所, 北京

²国家能源局信息中心, 北京

³北京林业大学, 北京

⁴北京能源协会、北京应天阳光太阳能技术有限公司, 北京

⁵中国科学技术大学, 合肥

Email: *ytichen@ustc.edu.cn

收稿日期: 2013 年 11 月 6 日; 修回日期: 2013 年 11 月 8 日; 录用日期: 2013 年 11 月 8 日

摘 要: 当前, 全球大气、水资源、耕地污染情势严峻, 气候、粮食、能源安全已成为经济发展的主

*通讯作者。

要制约因素，发展新能源投资大，收效甚微，我国城镇化建设阻力重重。本文提出，工业生产的低碳化和农业生产的富碳化可能是解决目前全球所面临的气候变化、粮食安全和能源危机和困难立地四大近代难题的办法。富碳农业既可利用碳资源节能减排，消纳碳资源，改变日益突出的气候问题，又可以促进相关工业生产，改变一个农业大国生产方式和生活方式，造福人类，是我国现代化新兴农业必由之路。文章通过对几种重要科学技术进展的分析，提出一种依托太阳能光电光热的应用的模式，结合人造光源、气肥、光导纤维、地热等近代技术，使用困难立地大规模地营造封闭式的模拟远古时代的小区域富碳气候，达到超传统的作物的光合作用的高效，在消化大量碳排放的同时，抵抗各种恶劣气候，减少对水源的依赖，增加农业收成，实现农业生产工业化。

关键词：富碳农业；气候变化；粮食安全；能源危机；困难立地；碳排放；农业工厂；光伏光热；太阳光光导纤维；LED；半埋式车间

1. 四元方程的解

1.1. 四大近代难题

世界经济从新世纪的开始就逐渐进入全球的经济衰退周期。在前十年中，由于中国、印度、巴西等发展中国家的崛起，就全球而言，其衰退的迹象还不十分明显。然而随着时间的推移，源于美国、西欧国家的经济危机愈演愈烈，至今还很难看到复苏的迹象。这次的经济危机和以往有所不同，它是由许多错综复杂的因素引起。梳理这些因素，追根求源是由近代社会四大难题所致，这四大难题就是众所周知的气候变化、粮食短缺、能源危机和困难立地。

针对这四大难题，世界各国的经济学家、社会学家、科学家、工业家和政治家都各自提出了不同的解决方案。这其中绝大部分方案是分别方案，即对每个难题所提出的个别解决方案。本文试将四大难题作为一体进行研讨，发现同时解决这四大难题的办法可能比逐个解决个别难题的办法更加便捷。而其关键则是本文所提出的富碳农业工厂的设想。

在能源危机的问题上，近百年以来，我们以惊人的速度消耗着地球存储了几亿年的化石能源为主的能量，如果我们坚持这种消费方式，正如大多数的人们所做的那样，可能再过几百年的时间，所有这些古生代或晚古生代所遗留下来的资源就会用罄。几亿年的积累在不到一千年内瞬间灰飞烟灭将是地球发展史上的一场比陨星撞击地球更大的灭绝事件。但是，对如何解决这一问题，近些年来所提出的新能源，特别是再生能源的开发和替代，实际上并没有达到原来所期待的效果。我们对个别实施技术的期望值太高或

太天真。大约在十年以前，人们信心百倍地展望着当时成本价为 5 美元/瓦的太阳能发电工程，总期望着 30 年后的太阳能成本价跌为 1 美元/瓦时能源危机就会基本结束。而这个降价过程由于种种原因仅仅用了 10 年，当太阳能成本价降至 1 美元/瓦时，却猛然发现一切依然如故。

粮食安全甚至给了我们更加严厉的例子。由于全球人口爆炸，上一世纪的专家们早就提出警告，仅仅依靠世界上有限的作为恒量的可耕面积供给可能是无限的永恒增长的人口数，地球对此是不堪重负的。为此，各种高产科技纷纷应运而生。然而这些又给我们带来是什么呢？世界性饥饿仍像阴天中挥之不去的乌云紧紧地压在我们头上，创造出一块又一块的饥饿的大陆，而在那些目前仍然丰衣足食的地区，谁又知道，各种恶劣气候的变化会在何时何地的人类至今尚依赖老天的食物生产车间的大门突然关闭。即使不是这样，由含有各种激素、大量的油脂或人所不知的秘不可宣的制造方法，所生产出来的污染食品，正在以一种我们尚未可知的方式悄悄地在餐桌上改变自己。变成什么呢，我们不知道。反正是不可治愈的癌变愈来愈多，特别是人类赖以生存的雄性精子愈来愈少^[1]，人类的高度文明，虽然已由生而平等代替了适者生存的竞争原则，生存环境的变化，却极大地在人类生长的最低级阶段减少了这种竞争。

不管气象学家们最后争议的结果是什么，事实是，人类在寻求发展的同时，对化石能源的过度消耗所引起的近十年来以每年 0.5% 速率增加的二氧化碳气体排放^[2]，已直接或间接地将同人类历史上从未记载过的极端天气联系在一起。时速达 15 级的飓风、

温度达到 -50° 的气温、滔滔洪水和酷热骄阳可在同一地点以最短时间交替变化……极端气候已经常态化^[3]。而我们所采取的各种防治手段在大自然的风暴中几乎像蚂蚁撼大树，毫无抵御能力。

困难立地的面积由于自然和人为的原因,近些年来以每年约 600 万公顷的速度正在加速吞并人类的耕种土地，加之每年由于对化石能源的过度开发而留下的废井、废地层等已经将我们人类生存的空间进一步压缩到越来越小的范围之内，困难立地已经成为全球化的重大难题。

人们各自在本身的狭窄的小巷内已经跑得很远，然而并未发现通向宽广大道的出口。面对以上四大难题，人们在各自领域中寻找答案，这就好像是在解四个独立的一元方程一样；然而几十年的努力，似乎已经证明，这四个独立的方程是无解的。奇怪的是，无论我们人类已经达到了何种的文明程度，无论我们如何使用最新发展出来的多么奇妙的高等科技，包括已在很大程度上改变了我们生活的互联网技术，也包括已经帮助我们脱离了地球引力而正在帮助我们脱离太阳系引力的航天技术，都无法在解决这四个难题上真正迈进一步。困境愈陷愈深，变化愈来愈快，快到这样的程度，原来以几代人或几十代人的尺度的变化竟然可以在一代人或几年中被人们亲身感受到^[4]。人类，作为一个创造了高度文明的生长在地球上的智慧物种，已经迈入了新的发展阶段。是这个星球上的资源不足以支撑我们再生活下去，还是我们对资源的运用不得法？答案应当是后者。其实我们已经弄清楚，地球在最早发展的阶段，大气层中是没有氧气的^[5]，如果我们假设现在大气层中近 30%的氧气全部是由于植物的光合作用所释放出来的话，储存在地壳内的以碳为主的化石能源则会比现已探明的储量高出几十倍。我们尚不知这些能源都藏在何处，会不会藏在北冰洋的大陆架，抑或是太平洋、大西洋的海底？如果是这样，人类还可以在一个更长的时期内依赖化石能源。然而不幸的是，我们使用得的确很不得法。只燃烧了地球储量很小一部分的燃料，所造成的污染已经足够使我们窒息。如果我们不能在短期内找到解决方案，人类必须从目前的高度发达的阶梯上大幅度地后退，回到近古或远古的时代，在这个星球上极大地减少我们的数量，将大部分大陆让位于智商极低的其他动物，我们自己也回到刀耕火种的时代。人类的发展也不会

是永远向上的，也会向相反方向发展，这种风险是会存在的。问题是，我们应当让这样的拐点在我们这一代发生吗！现在是到了这个时候了，我们必须万众一心，力挽颓势，不能让这个拐点产生出来，我们应当集中这个星球上的所有的天才和精英，集中我们可能动员的所有的财富和资源，解决以上四个难题。

实际上，我们已经注意到，以上所述的四个变量的变化，在我们现在的生态环境中已经形成了一种危险的正反馈：粮食安全的要求使人们更多地使用储存在地下、海下的化石能源，由此而大量产生的二氧化碳又在全球中形成了单方向增强的温室效应，直接或间接地使极端气候的现象愈演愈烈，十分显然，各种极端的气候变化又导致了粮食安全的困难。恶性的正反馈是形成我们社会目前困境的主要原因。目前的解决方案是从能源难题下手，世界各国企图达成某种共识，要求并规定大家尽可能减少足以产生大量的二氧化碳气体的化石能源的使用。但众所周知，这样的要求和规定对于绝大多数发展中国家或者缺乏再生能源的国家是有欠公允的，并且具有不可实现性，前者如中国印度等国，要实现高速度的发展，化石能源仍然是最便宜最方便的。减少它的使用，在目前等于是暂停或放弃发展；后者如英国日本等国，由于从工业革命就构架起来的使用煤炭和石油的能源结构同需要大量国土和资源的新能源的矛盾，在弃核以后的能源结构中是会在一个长时期内无法摆脱对化石能源的依赖。

既然我们在相当长的一段时间内无法摆脱对化石能源的依赖，既然世界各国从各自利益出发，无法就能源使用及气体排放问题达成一致的意見和行为，既然随着科学的发展，更多储量的不同形式的化石能源，还会在任何时期以出其不意的方式涌现出来，而一次又一次地改变全球能源的格局，那么我们就应当面对现实，寻找解决四个难题的办法。也许，我们孜孜以求的四个方程的独立解并不存在，而真正的解却存在于这些变量所联立的四元方程中。

在下一节中，我们将分析是一种什么样的变量的变化，可能根本改变人类目前的困境，由此可以验证一句话：在这个星球上，实际从来没有废物，废物只是有用资源被放错了位置。

1.2. 历史气候的生态环境的变化

我们是来自于几亿年以前的晚古生代到新生

代的造煤造油的时代，及巨大的恐龙生长的时代的地球生态环境获得启发的，这个启发告诉我们，目前的困境既不是由于资源不够造成，更不是我们用得太所致，而是用不得法。只要我们用以得法，我们不但可以继续使用下去，而且还可以使用得更多。我们期望本文所提出的方案是可持续的。它的存在和应用应当是在一个我们可见的时期内(几百年或上千年)，帮助人类清理生存环境，帮助人类持续发展。

从地球的历史看来，主宰这个星球的主人其实并不是人类，而是在这个星球上生活了上亿年的恐龙，这说明我们的星球，由于她的生态条件，其最适物种应当与我们现在所见到的不同。尽管已有大量的研究论文，我们对恐龙时代的生态环境的细节仍然是十分无知。不过，本文的研究者最关心的是当时地球的气体排放的可能数据以及对我们今天给出四元方程的解的启发。对于绝大多数人来讲，对恐龙的研究的一个共同的问题是：是什么样的生态环境促成在大陆上形成了恐龙那样巨大的体形？其答案自然是当时的最适温度和充足的食物来源。那么又是什么样的生态环境能够产生这么充足的食物呢？当时的能源、食物和气体排放的平衡又是如何达到并维持了几千万年甚至上亿年的呢？

地球上的植物，不管是早期的裸子植物，还是后期进化成的被子植物，是地球上各种物种的基础的食物，而植物生长的主要食物是由水、二氧化碳通过太阳光的光合作用转化来的。任何干物质的植物的组成，主要成分是碳、氧、氢，其中 45%是碳、45%是氧、6%是氢，剩余的 4%是氮、磷、钾、钙、镁、硫等元素。也就是说，植物生长过程所需养分的 90%以上是通过光合作用制造的。所以近代植物生长所依赖的养料实际上是由目前我们地球上其成份只有 0.03% 即 300 ppm 的二氧化碳供应的，而我们储藏在地下的化石能源也是由远古时代的二氧化碳通过植物的光合作用转化而来的。既然我们地下储藏了那么多碳或碳氢化合物，那么可以推测到，在化石能源产生的时代，当时的二氧化碳浓度在总体上来讲必定是高于现在水平的。这是显而易见的，如果假设现在这个星球上的化石能源是当时地质条件变化时，在一个相当短的时间内被掩埋的话，当时的二氧化碳含量，可以从目前能估计出的最多化石能源总量中估算出来^[6]。

地球上化石能源大约以化石能源的固、液、气三态，即煤、油、和气三种形态出现，如果都将它们当

作与碳相当的形式，最大估计，在地球的植物、土壤、海洋、大气中其总量可能为 10^{13} 吨，它相当于

$$10^{13} \times \frac{44}{12} = 3.6 \times 10^{13} \text{ (吨)}$$

的二氧化碳，这给出了化石能源制造时代的地球上参与光合作用的二氧化碳气体的最大总量的数量级，当然，根据碳的总量计算出的二氧化碳的数量只是一个数量级的估算，我们并不能想象出这么一个物理过程，它能一次性地将碳转化为二氧化碳。那么我们再估算地球上空气的总量，假设所考虑的远古时代的气压同现在的气压大致相同，其单位气压为

$$P = 1 \text{ kg/cm}^2$$

由此可估算出地球空气的总量为

$$P \times 4\pi R^2 = 5.2 \times 10^{15} \text{ (吨)}$$

其中 R 为地球半径，也就是说，在这个假设中所计算出的当时空气中的二氧化碳浓度可能是 6000 ppm，是目前二氧化碳浓度的 20 倍。以上模型自然是过分简单，碳的存放形式很多，然而我们相信，如果计算中所用到的化石能源总量是正确的话，6000 ppm 是这个星球上二氧化碳浓度的上限。古生物学的研究^[7]已经给出了在远古时代不同时期的二氧化碳的浓度变化：

图 1 表明了在地球的造煤或造油的时代，其二氧化碳浓度确实远高于现代的水平。在白垩纪，空气温湿，温度平均高于近代地球温度 4°C ，氧的浓度比近代高出 50%，而二氧化碳是近代水平的六倍。这就决定了当时的植物是处于营养极其丰富的时代，茂盛而高大的植物给恐龙提供了取之不尽的食物，造就了世界历史上最为庞大和高大的动物形体。图 1 也列出了当时的主要植物是蕨类及裸子植物，这是否表示这些植物是能够承受较高的二氧化碳浓度的，蕨类及裸子植物的光合速率是否比近代植物高很多，是个值得研究的题目。其实很多蕨类植物的叶部比茎部要发达得多，可能是对高浓度二氧化碳适应性造成的吧。另外，由于地球逐渐变冷，作为植物营养的二氧化碳浓度的降低，植物的进化也使得近代植物的光合作用和代谢的机理同造煤造油时代的植物不同。所以我们不能得出结论，一般讲来，愈高的二氧化碳会产生出愈强的光合作用。当然，这并非永远正确。不同的植物有其不同的光合速率或固碳的效率，对于近代植物，一般讲来，干旱热带植物的光合作用效

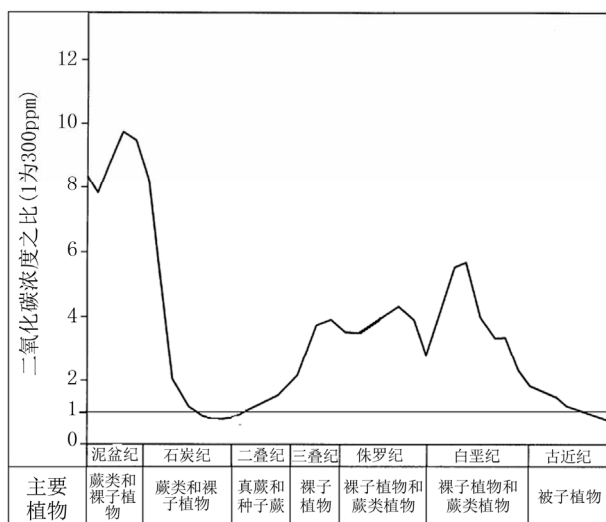


Figure 1. The measurement for carbon dioxide for the period from the late Paleozoic (about four hundred million years ago) to Cenozoic on the earth

图 1. 地球从晚古生代(距今约四亿年)到新生代各纪的二氧化碳浓度测量

率更高,但并不一定会随二氧化碳浓度增高而增高。但这种单调关系对于某些植物,如水稻、小麦、大豆、棉花、马铃薯等 C_3 植物,在温度合适、水分及矿物质营养充足的条件下确实于光合作用的一定阶段中存在^[8]。远古时代的例子只是启发我们,在我们这个地球上,确实可以培养出合理的作物群体,它们具有更强的吸收二氧化碳的能力,在更大地增加食物或生物能源产量的同时,将燃烧化石能源所产生的二氧化碳尽可能多地吸收掉,通过光合作用转化为氧气和以碳水化合物作为形式的食物或生物能源,将地球环境的恶化拉回到工业革命以前的平衡状态。要实现这一点,我们在本文中将讨论如何在这个地球上设计可大规模应用的人造小气候。

在下文中,我们将讨论,近代社会中的人类活动每年生产出来的温室气体,我们可能以何种方式捕集并释放它们用于喂养作物,合理的作物群体又能否在一种模拟远古时代气候的人造温室中,将这些气体全部消化掉并转化成食物和生物燃料。在近代社会,人类活动对二氧化碳的排放主要是在工业生产过程中实施的,而人类活动所实现的碳氧循环而产生氧气的过程又是在农业生产过程中实施的。所以本文所提出的工农业生产一体化工厂的方案,应当是解决近代四大难题的科学命题,作者将从所涉及的各个学科讨论此方案的可行性。

1.3. 大气中二氧化碳浓度的周期变化及单调增加

其实,在我们的地球上,二氧化碳的变化远不是完全由人类活动造成的。陆地上植物的光合作用,所产生的二氧化碳周期变化的气通量达到每年 1200 亿吨,要比人类活动燃烧化石能源所产生的气体排放高出几个数量级,这个变化是以一年四季作为一周期的,在北半球,春季开始的作物成长中的光合作用使二氧化碳的浓度连续下降,而从秋季开始的生物质的消耗及转化又使相同数量的二氧化碳回到大气中。这种由于植物的光合作用而产生的具有年周期的循环变化可以在地球任何地方测量到,图 2 给出了这样一个典型的测量例子^[9]。在农业区域,这种测量也表明了当地收成的结果,循环图形的振幅愈大表明收成愈高。

地球表面的 70%以上的面积是由海洋所占据的,由于海洋的水表面与大气中的二氧化碳的压力的不同,而引起的大气与海洋的二氧化碳气体交换每年可达到 900 亿吨。浩瀚的海洋本来可以作为温室气体的仓库缓解大气中的温室效应,可惜海水中过度地吸收二氧化碳会使海水酸化而阻止进一步的气体的溶入。

以上所列的二氧化碳浓度变化是周期性的,而人类活动对化石能源的燃烧所引起的气体浓度的变化却是单调上升的。图 3 是在 Mauna Loa 观察站所记录的近廿年的当地二氧化碳浓度的变化情况^[9],每年的周期变化说明了当地是有典型的农业区域,几乎不变的振幅可能说明当地的农业廿年来并无明显进展。

尽管这种由于人类燃烧化石能源而产生的二氧化碳气体浓度的变化是显而易见的,而它与全球变暖的直接联系还停留在理论推测阶段。国际政府间气候变化委员会(IPCC)曾给出上世纪一百年的地球表面温度变化曲线^[10]如图 4 所示。

古生物学的研究也的确验证了大气中二氧化碳的浓度与地球表面温度的关联关系。然而,从物理学的观点看来,这样的关系还需要更严格的论证和研究,因为地球表面复杂的地质条件和物质分布将决定任何保温或加热机制,由于不同物质形态的比热的不同,导热系数的不同,有无相变的不同,相变潜能大小的不同等等,其外加能量都不会同温升呈简单的线性关系。大气中二氧化碳浓度的单调的增加不会单纯地引起“变暖”一种效应,其结果应当是非线性的复

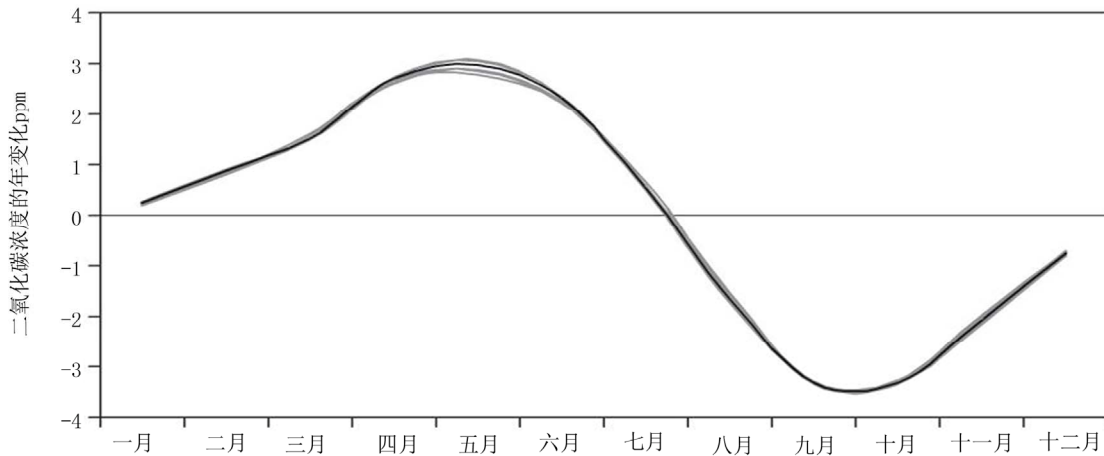


Figure 2. The annual periodic change of the carbon dioxide concentration at the Mauna Loa Observatory (the earliest observation station for carbon dioxide)

图 2. 在 Mauna Loa 观察站(全球最古老的二氧化碳观察站)所测到的当年的二氧化碳浓度变化

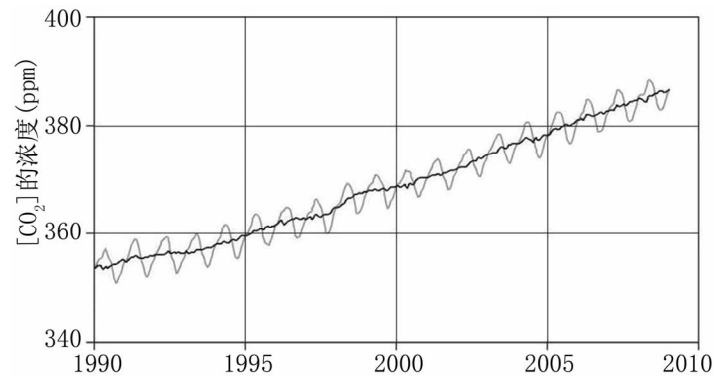


Figure 3. The variation of carbon dioxide concentration recorded for the past 20 years at the Mauna Loa Observatory Station

图 3. 在 Mauna Loa 观察站所测到的近二十年的二氧化碳浓度变化

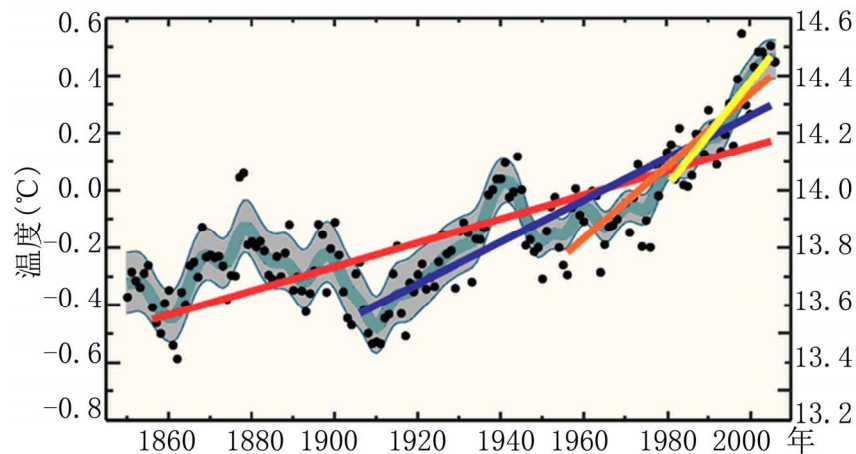


Figure 4. The temperature change on the surface of the earth announced by IPCC in 2007

图 4. IPCC 于 2007 年所公布的二十世纪一百余年来的地球表面温度变化

杂的形态，目前出现的具有极大破坏力的极端气候应当是与二氧化碳气体单调增加有某种内在联系。

目前，国际上比较公认的是，由于燃烧化石能源

而排放的温室气体为每年 200 亿吨^[1]，这相当于每年燃烧掉 60 亿吨的碳相当的化石能源，占已探明的可开采的化石能源总量 5 万亿吨的大约千分之一。我们

在这里具体提出，是否可将这由于人类活动而产生的 60 亿吨碳排放的一部份，加入植物的光合作用的循环，使其既能减少碳排放，又能增加人类食物生产，并且如果以上所述的温室效应的机制是正确的话，逐渐平息极端气候变化的发生和振幅，这就是我们谓的四元方程的解。下面我们对此进行逐步的探讨。

2. 植物的光合作用的物理因素

2.1. 光合作用的物理条件

植物或藻类利用叶绿素或其他细胞将无机物的水及二氧化碳在光子的作用下转化为有机物的光合作用，是自然界中食物链的最基本作用。各种植物的光合作用，由于在漫长的适应环境的过程中不断进化的原因，其机理都各有不同。这就造成了不同植物的不同的固碳能力，即不同的光合速率及饱和点。在保证经济效益的条件下，找寻并使用更高固碳能力的作物是植物学家的任务，也是与本文有关的重要研究课题。本文侧重讨论的是光合作用的物理条件，即光子的频率、强度及作用时间等，希望这些讨论能够给出人造小气候与近代科技发展的接合点。

2.1.1. 光合作用与光源光谱的关系

首先讨论光合作用与光谱的关系。众所周知，并不是太阳光的所有谱线都能被叶绿体吸收，实验已经证明^[12]，对于叶绿素 a，吸收谱线峰值分别是 400 nm 和 680 nm；对于叶绿素 b 吸收谱线峰值分别是 450 nm 和 650 nm。图 5 给出了叶绿体的四种色素的总吸收光谱和叶绿素 a 的吸收谱线的比较，实际上总吸收光谱与进行光合作用的作用光谱是十分接近的。这说明，在实际施行中，植物对光能的应用是十分有效的，几乎所有被吸收的光能都会被利用，以化学能的方式储存起来。

尽管植物对光能的应用是十分高效的，太阳对植物所提供的光能却不尽然。图 6 给出了太阳光谱与叶绿体总吸收光谱的比较图，从中可以看出两点：1) 植物的吸收光谱都在可见光范围之内；2) 光合作用的光谱主要是紫蓝光和红光，其他光谱的光子能量不能被植物吸收。从图 6 的比较可以看出，太阳光在很大范围内提供了植物的营养，然而从光谱分析的角度讲来，太阳光并非是植物光合作用的最佳光源。另外，由于大气层各种气体对不同波段太阳光线的选择性吸收和反射，所以射至地面而实际与植物作用的光

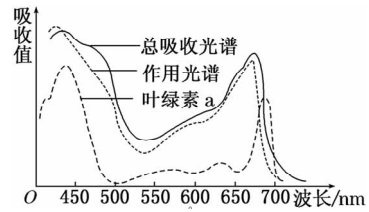


Figure 5. The photosynthesis spectrum and absorption spectrum for typical crop

图 5. 典型作物的光合作用光谱及吸收光谱

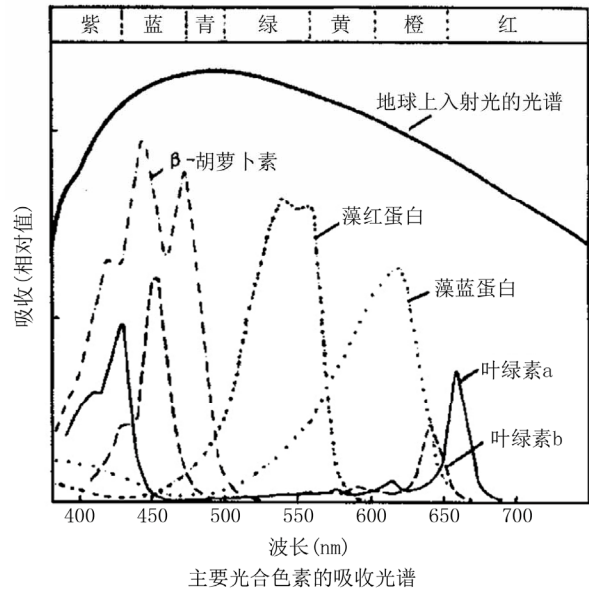


Figure 6. Comparison of the solar spectrum and total chlorophyll absorption spectrum

图 6. 太阳光谱与叶绿素总吸收光谱的比较

谱，同图 6 的太阳光谱又有区别，射至地面的太阳光线主要是波长为 300 nm~700 nm 的可见光及红外线，不过，如果将图 6 中的吸收光谱的轮廓面积同地球上入射光的光谱轮廓面积相比较的话，对于某种比较优化的植物，其比例可达到 1:2，即太阳光的谱线在最好的情况下，其可用部分可达 50%。

对植物的光合作用的光谱研究的另一个因素是，太阳光线在以不同的入射角穿过大气层时，对不同波长的光线的吸收情况，一般讲来，入射角愈大，对蓝紫光的吸收愈多，表 1 给出了在北纬低纬度地区夏天晴天的情况下，在不同时段(即不同的入射角)，太阳光的不同光谱被光合作用利用的情况。这个分析是同时间有关的，因为在不同时间段，太阳光线的光谱是变化的。表中的变量为太阳时，同当地时间可能存在差别。

太阳光的未被吸收部分可能被反射，也可能作为热能被植物叶子吸收，由此而产生的高温可能成为植

Table 1. The ratio of available sunlight for the photosynthesis at a location of low northern latitude (percentage of total solar energy)
表 1. 北纬低纬度某地不同太阳时的太阳光可用于光合作用的比例 (占该光谱能量的百分比)

太阳时段	蓝紫光	红光
8:00~9:00	7	65
9:00~10:00	13	49
10:00~11:00	27	32
11:00~12:00	29	28
12:00~13:00	31	26
13:00~14:00	31	26
14:00~15:00	29	28
16:00~17:00	27	32
17:00~19:00	13	49
19:00~20:00	7	65

物对光能进一步吸收的限制因子。人造光源在这些方面具有比太阳光更强的优势，人造的紫蓝光和红光在相同光强条件下比自然光的效率更高。

2.1.2 光合作用与光源光强的关系

下一个讨论的题目是光合作用与光强的关系，每种植物对阳光的需求都有一个光饱和点，超过这个范围，叶黄素的保护作用启动，光合速率会急速下降。光合作用的光饱和点的存在是由于植物叶子的酶和色素的限制，从而光饱和点是能够进行光合作用的最大光强。对于同一种植物，其光饱和点是会随环境条件而变化的。主要随两个条件变化：二氧化碳浓度及温度。在一定的范围内，饱和点会随二氧化碳浓度的增高而增高，随温度的增高而降低。对于不同植物，在环境条件相同的情况下，也是有差别的，表 2 列出几种植物的光饱和点。

由于大部分作物都属于 C₃ 类或混合类，表 2 给出的数据在实践中非常有用，因为根据这一点，决定了在人造植物工厂的设计中，即使不考虑人造光源进行补光，对于生产 C₃ 类或混合类的作物的工厂，确实可以允许大于 50% 的太阳光照用于他用，譬如用于光电和光热的应用。

光合作用的光照时间是需要讨论的另一个问题。光合作用实际上是分两步进行的，光反应和暗反应。光反应是在叶绿体的体膜上进行，在吸收光谱的光子作用下，光反应将水分子分解成氧和氢，另外，在酶

Table 2. The light saturation point for the photosynthesis of different types of crops
表 2. 不同作物的光合作用的光饱和点

植物按光合作用类型分	C ₃	C ₄	CAM
占标准太阳光强比例	25%	100%	100%

的作用下，将光能及 ADP、Pi 转化为 ATP，光能转化为化学能。暗反应是在叶绿体的基质中进行，暗反应实际上无需光子的参与，所以称为暗反应，在这个过程中，不稳定的 ATP 和光反应产生的氢离子在酶的作用下将由植物叶部的气孔吸收的二氧化碳还原成碳水化合物化合物的糖类等形式而形成稳定的有机物，同时又产生 ADP 和 Pi 供光反应循环使用。这种固碳的过程是一个比较复杂的化学反应过程。暗反应可以有光，也可以无光。

光反应及暗反应是在叶绿体的不同部位循环发生的，所以植物的光合作用在没有吸光过度而产生高温的情况下，如果营养(二氧化碳与水)充足，是可以连续进行的。这就决定了在人造小气候中，光合作用可以无间隙地持续进行，以提高作物的产量。

2.1.3 光合作用与光源入射角的关系

太阳光入射角的变化会对植物光合作用产生影响。由于太阳是一个方向不断变化的光源，对于某个植物的叶子，其入射角是在不断变化的，这对光的吸收会产生一定的影响，这种影响随不同形态、不同生长角度的叶子而不同。人造光源对于植物而言，是相对静止的，所以，根据不同的叶子的形状，可以设计相适应的光源及光线方向，以保证对光的吸收的最佳效果；或者在相同条件下，减少所需要的人造光源的功率。

总结以上讨论，太阳光并没有提供光合作用的最佳的光的条件，包括光谱、光强、光照时间和光入射角等性能，如果使用一种在这些方面可以重新设计的人造光源，是可以大幅度地提高光的利用率的。在一种人造的小气候的空间中，为了提高植物的光合作用效率，可以使用特定光谱的光源，其强度应当不超过自然光的强度，不同种类的植物可以实施其最佳光强，如果光源能够连续操作，光合作用就可以连续进行。

2.2. 光能利用率和光合作用的效率

光能利用率定义为光合作用制造的有机物中的

能量与种植面积内所照射的光能之比。太阳光的光能利用率可以用在农作物典型的收成的情况下，每年所生长出来的有机物总量(包括果实、叶子、茎、根等)进行计算。假设一亩土地可以生产 2000 公斤有机物(也可能是年产两季，或三季)折合成 3 kg/m^2 ，假设它们全是碳水化合物(当然也会有脂肪，譬如在作物的种子里，脂肪的化学能较高，但是主要是碳水化合物)。每克碳水化合物氧化时产生的热能为 16.74 千焦，那么每平方米所产生的总化学能为

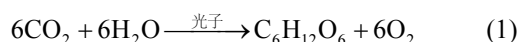
$$16.74 \text{ kJ/g} \times 3000 \text{ g} = 50,220 \text{ kJ}$$

我们再来计算典型农业区在一年内所接收的单位面积的太阳能总量，在一般地区，取 1500 小时全光照是合理的，那么每平方米所接受的总能量是

$$1500 \text{ h} \times 3600 \text{ s/h} \times 1000 \text{ W/m}^2 = 6.4 \times 10^6 \text{ kJ}$$

由此可计算出在太阳光条件下的典型的光能利用率，即在传统的工作条件下太阳光能转化为化学能的转化效率仅为 0.8% 左右。这个数值显然不够理想，应当可以通过改变物理条件，特别是使用人造光源和增加二氧化碳浓度等方法大大提高。在这种改变了的条件下，譬如，光照时间可以大大加长，发射光源的光谱可以更加接近吸收光谱，光的强度可以接近光饱和点，二氧化碳浓度可以接近远古气候的浓度，各种矿质元素更充分。然而我们要先了解一下，这样的提高有无上限，即在理想状态下光合作用的效率到底是多少。尽管光能利用率与光合作用效率是不同的两个概念，它们的关联是显而易见的，光合作用效率起码是光能利用率的极大值。

光合作用的效率定义为光合作用制造的有机物中的能量与光合作用中吸收的光能之比，它可以从光合作用中碳固化的量子效率，所代表的能量转化效率的计算中获得。计算光的激发作用下的光合作用的理论效率的上限，需要了解光化学机理下的反应方程式，由二氧化碳和水作原料产生碳水化合物及氧气的过程是一个复杂的光作用下的氧化还原反应。从上述的光反应和暗反应的两个过程将来，首先，光子将水分子氧化而分解，释放出电子、化学性能活泼的氢离子 H^+ 和氧气，在暗反应中，氢离子继续固定二氧化碳，在酶的作用下，还原成碳水化合物，其过程可简化为：



此化学反应的自由能大于零，是在光子的激发下进行的，光合作用是个多光子的过程，它是由多次反应的复杂过程组成的，我们可以不顾及这个过程的细节，仅用其自由能，

$$\Delta G = 2870 \text{ kJ/mol}$$

来进行计算。据上，固定 1 摩尔二氧化碳或释放 1 摩尔氧气的自由能为：

$$\Delta G_{\text{CO}_2} = \frac{2870 \text{ kJ/mol}}{6} = 478.3 \text{ kJ/mol}$$

光合作用的量子效率是指叶绿体或其他光合机构每吸收一个光子所能固定二氧化碳的分子数，量子效率可以通过实验进行测量。在测量中由于有时不能区分上句所强调的“吸收”光子与“照射”到叶面上的光子的不同，因为“照射”到叶面上的光子除了被吸收以外还可以包括反射和透射部分。由照射到叶面的光子所测量出来的固定二氧化碳的分子数为表观量子效率，由于对于一般植物，反射光及透射光的总数只占总辐射的 15% 左右，表观量子效率与量子效率相差并不大。

表观量子效率的测量可以通过光合速率的测量获得。图 7 为光合速率与光强关系的示意图，当光强很高时，光合速率不再增加，即上文所述的光饱和现象，然而在弱光的条件下，如果环境中的二氧化碳充分，光合速率与光强呈线性关系。

在测量中，光合速率和光强都可以用克分子即摩尔数来表示，固定二氧化碳的速率可以以单位 $\text{mol/m}^2\text{s}$ 来表示，即单位面积上的二氧化碳固定的速率；光强也可以用光子数，即光子的摩尔数来表示，光强可以以单位 $\text{mol/m}^2\text{s}$ 来表示，即被单位叶面面积所吸收的光子的功率。这样的单位换算以后所得出的测量图形在光合速率与光强的直线关系的斜率，就是测量出的量子效率。

测量已经表明，在弱光的条件下，许多植物的量子效率 $\eta_{\text{量}}$ 都是惊人地相近，数值大部分在 1/8 至 1/10 之间，也就是说，固定一个二氧化碳分子约需要 8~10 个光子。

如上所述，在光合作用的吸收光谱中，主要有两条光谱吸收峰值，分别为，700 nm 和 400 nm，每种光子的能量分别为：

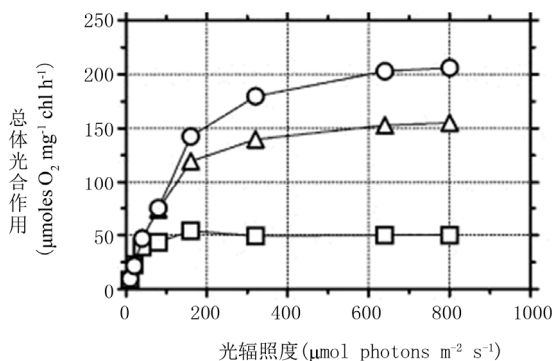


Figure 7. Although the photosynthesis ratios are different in different crops, the slopes are more or less similar under weak light radiation

图 7. 不同植物的光合速率可以不同，但它们在弱光下的斜率却很接近

$$h\nu_{700} = h \cdot \frac{c}{\lambda} = 2.84 \times 10^{-19} \text{ J}$$

和

$$h\nu_{400} = 4.97 \times 10^{-19} \text{ J}$$

根据爱因斯坦光化学当量定律，要激活一个克分子，起码需要吸收一个摩尔光子，1 摩尔光子定义为：

$$E = A_R \cdot h\nu$$

其中 A_R 为阿伏伽德罗常数，约为 6.02×10^{23} ，对于紫光， $\lambda = 400 \text{ nm}$ 时，1 摩尔光子能量为：

$$\begin{aligned} E_{400} &= 6.02 \times 10^{23} \times h\nu \\ &= 6.02 \times 10^{23} \times 4.97 \times 10^{-19} \text{ J} = 299 \text{ KJ} \end{aligned}$$

对于红光， $\lambda = 700 \text{ nm}$ 时，1 摩尔光子能量为：

$$\begin{aligned} E_{700} &= 6.02 \times 10^{23} \times h\nu \\ &= 6.02 \times 10^{23} \times 2.84 \times 10^{-19} \text{ J} = 170 \text{ KJ} \end{aligned}$$

所以，根据光化学中的当量定律，红光的能量转化效率实际上是高于紫光的能量转化效率，如果被吸收的光子是单色光的话，其理论上可以达到的能量转化效率为

$$\eta_E = \frac{\Delta G_{\text{CO}_2}}{E_\lambda} \times \eta_{\text{量}}$$

对于紫光，

$$\eta_{400} = \frac{\Delta G_{\text{CO}_2}}{E_{400}} \cdot \eta_{\text{量}} = \frac{478.3 \text{ KJ}}{299 \text{ KJ} \times 10} = 16\%$$

对于红光，

$$\eta_{700} = \frac{\Delta G_{\text{CO}_2}}{E_{700}} \cdot \eta_{\text{量}} = \frac{478.3 \text{ KJ}}{170 \text{ KJ} \times 10} = 28\%$$

由于太阳光具有连续光谱，如果所有谱线都能被吸收，其效率可以用红光与紫光的平均值即 22% 来表示。然而由于吸收光谱的能量只占太阳光可见光谱能量的一半，所以太阳光最高光合作用效率为 11%。这个效率自然会存在一些其他限制因素，然而却是一个理论上可达的目标。相比较光伏电池的效率，光能与电能的转化效率使用硅材料可达 20%，光合作用的理论值是个不错的结果。因为植物的生长成本要比光电池成本低得多，而且不同于需要消耗大量能量的光电池生产，植物生长过程是自然界中碳循环的主要过程，有益于减少温室气体的排放。追求光合作用的光利用率提高不但是粮食安全的需要，更是减排的需要。本文所估算的植物的最高光合作用效率，即 11% 的数值，的数值是指在所有条件都是最优化的情况下的效率，譬如，二氧化碳的浓度足够高，植物能获得所需的所有养料，生长温度也是最适的。美国的伊利诺伊大学的研究者们^[13]于 2008 年提出在室温为 30 °C，CO₂ 浓度为 380 ppm (当今空气中的浓度) 情况下，C₃ 植物的光合作用最高效率为 4.5%，C₄ 植物的光合作用最高效率为 6%。这同我们的文章中的估算结果 11% 是比较接近的。

3. 人造小区域气候的雏形——植物工场和农业大棚

对于本文所提出的人造小区域气候的想法，在近代农业的发展中，已经有了由日本研发出来的植物工场和在中国已经初具规模的农业大棚。

3.1. 植物工场

植物工场是一种封闭型全天候植物生长空间，在这样的空间中，植物生长的环境是由人工精确模拟而创造出来的，不受外界的影响。在可控的环境中，作物不但能够极大地收获，发挥其生产的潜力，而且不受自然界病虫害和农药、重金属等污染的影响。空间的利用也由传统的农业的二维空间利用变为三维空间利用，减少了人类对有限可耕面积的依赖性。图 8 是植物工场的示意图，显示了将农业生产工厂化的一个发展方向。

目前植物工场大致能够有以下几种技术手段：

1) 密封系统

植物工场同外界的联系除了光透与有限而可控

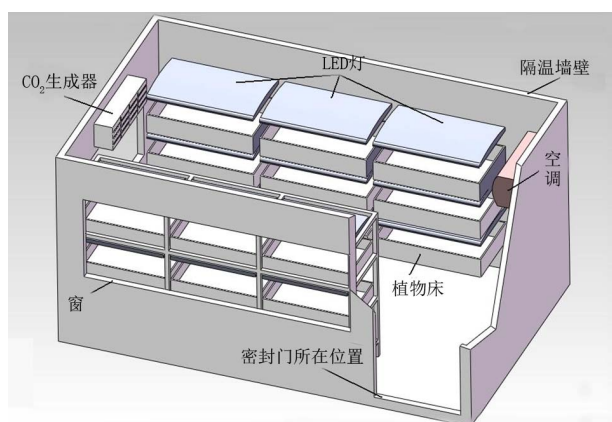


Figure 8. Schematic diagram of plant farming
图 8. 植物工场示意图

的气透以外，基本上是密封的，隔热的要求类似于冷库的建设，防菌除尘的要求类似于超净车间，有些系统的避光的要求类似于暗室建设。

2) 人造光源

除太阳光以外，人造光源可以作为每日 24 小时工作的连续光源，可采用红光与蓝光混合的光源系统（譬如，红光占 85%，蓝光占 15%，其比例可按不同植物变化而变化，更可以按同一种植物的生长期变化而变化，实验发现，兰紫光对蛋白质和脂肪合成有利，红光对糖类有利），作为冷光源的发光二极管是近代科技同农业结合的重要手段。人造光源使得植物工场的立体作物布局成为可能。人造光源还可以使用荧光光源、激光光源等，还可以使用白光光导纤维，实现太阳光三维作物布局。

3) 人造高浓度二氧化碳气氛

植物工场模拟远古气候的空气中二氧化碳浓度，1500~2000 ppm，供给植物以充分的营养，目前，植物工场，由于其规模还不大，一般由压缩的二氧化碳气瓶或固态的二氧化碳干冰供应。

4) 温度湿度的控制

控温控湿的全自动技术可以全面地在植物工场中应用。然而，温度控制实际上是植物工场的最大能耗。要保证工场的恒温状态，加温和致冷的电耗都十分可观。

5) 其他技术

如静电场布局、视频监控、紫外线杀菌、电脑远控等。

植物工场在上世纪 80 年代已经问世，并且还在

以一定的速度发展和改善，然而，由于以下因素，在短期内不可能能够达到能够抑制全球温室气体排放的这样大规模的应用：

- a) 耗电量大，特别是用于温度控制的能量需求极大；
- b) 成本高。

3.2. 农业大棚

由于上述的植物工场的造价及生产成本太高，作为一个过渡，中国大量发展出一种简易型的温室，称为农业大棚。农业大棚作为一个简单的温室，开始是用于种植反季的蔬菜，后来发展到种植花卉、水果、粮食等；从结构上，开始大多是非固定性塑料薄膜大棚，后来发展到半固定性的半砖半膜的农业棚，近来各地仿造国外的并且接近植物工场设计的玻璃大棚已快速发展。全国大约建有以蔬菜种植为主的 200 万公顷的农业大棚，它们有以下特点：

1) 成本低

比起植物工场 3000~4000 元/m² 的造价，农业大棚的成本只是 10% 左右，从简单的造价为 100 元/m² 塑料大棚到半密封式的造价为 800 元/m² 玻璃大棚，是目前我国的经济条件可以接受的，所以得到迅猛的发展。

2) 保温性能较差

农业大棚的最主要性能是能够比传统的农业生产方式达到更适宜作物生长的温度条件，根据大棚的不同设计，由于采用的是自然太阳光，故其控温效果虽然不及植物工场，然而成本却大大降低，在一般情况下，使用比较简陋的保温和遮阳的方法，在冬季，大棚可以比自然温度提高 5~10 度，在夏季，如果通风条件比较好的话，大棚可以比自然温度降低 5~10 度，这虽然未达到最适温度的物理条件，但也能克服自然条件下的四季温度的巨大变化，达到排水、防雨、防雷、防霜的基本环境，可以生产出反季的作物。在审视这些优点的同时，我们更应当注意到农业大棚在温控方面的局限性。由于农业大棚的隔热保温结构较差，没有主动控温的大棚在冬、夏两季的工作效率并不好。例如，在相当多的情况下，为了降温，夏天只好打开四壁透风，当然这只有在简易结构的大棚才可行，这种大棚的壁面做成活动式的，以便于调节温度。

这种开放式的大棚着实不太可能提供使用气肥、恒温保水等方面的条件，从而其发展受到了限制。

3) 光照条件

农业大棚一般是使用自然光照，由于相当多的作物的光饱和点只是最高自然光照的 25%~30%，所以大棚内的光照在即使有不完全透光薄膜或其他遮光物遮挡的情况下，只要光照均匀，即使是间隙式的或脉冲式的均匀光照也可以达到适宜作物生长的条件，目前大棚已有使用人造光源进行补光的设备，日趋植物工场的设计。

4) 二氧化碳浓度的调节

由于农业大棚的设计是开放或半密封性的，对于二氧化碳补气或本文所讨论的完全的“富碳小气候”的要求会较难达到。在一般的情况下，大棚的二氧化碳的补充是依靠充分的自然通风达到的。使用自然通风的方法补气，不但不够充分，又在许多情况下，同大棚的保温性能相矛盾。所以就产生了如下的许多补气的方法：

- a) 使用高压瓶装的二氧化碳或干冰；
- b) 生物质燃烧，包括木材、沼气及各种农业废料；
- c) 碳酸氢铵施用，为达到其分解的温度和氮肥的吸收，主要使用深埋法；
- d) 碳酸氢铵与硫酸、盐酸等化学反应产生二氧化碳；
- e) 二氧化碳发生器，使用电解法制备气体的二氧化碳器；
- f) 其他方法。

所有这些方法产生的二氧化碳，如果大棚的密封性不够完善，都不能被充分利用，不能高效地被植物吸收。反而由于大棚的通风或漏风，相当多的二氧化碳气体会由于气体浓度的梯度，扩散到大气中，形成“农业生产的大气污染”。

5) 使用寿命

目前的农业大棚大多是“临时”性建筑，寿命只有几年，即使是建筑比较规范的玻璃大棚，其寿命也只有廿年左右，这种短寿命的建筑，如果没有合适的循环使用的方式，所造成的“农业垃圾”，经过一段时期的大量积累，将造成更多的经济问题。

所以，我们认为，目前在发展农业大棚技术中，使用一种技术更全面、更长寿、能完全密封的、科学

合理地使用太阳能的光、电、热的、能够把近代光电、光热、光导技术结合在一起的“富碳人造小区域气候的农业工厂”，它应具有植物工厂的性能，而其成本价格又能接近国内的农业大棚。这种农业工厂在采用了下面要提出的光电、光热、光导技术、人造光源、碳氧循环技术和半埋式农业工厂车间建筑技术以后，会产生极大的社会和经济效益。

4. 光电农业

在本章中，我们将就上章所提出的几项近代技术与农业的结合点进行更详尽的分析。

4.1. 光伏及农业光伏

近些年来，由于中国光伏工业的大发展和中国“金太阳”工程的政策激励，在农业大棚的应用的基础上所发展出来的光电农业，是中国农业的一个创新，正受到世界各国的充分关注，如果发展的好，很快会在世界范围内推广应用。这种光电农业主要是利用大棚顶部的大量的空间装置光伏电池或其他光热装置以产生可再生能源，供给大棚使用，或输送他地。这种设计，有明显的合理使用土地的优势。

先计算一下，这种光电农业的可能潜力。如果假设目前在国内已建成的 200 万公顷的农业大棚中有 25%可以用于装置光伏电池，50 万公顷的面积是 $5 \times 10^9 \text{ m}^2$ ，而在保证光照的条件下，大棚顶部的面积率可达到 20 w/m^2 ，那么，仅这个面积即可装置 100 GW 的光伏电站。这是一个很大的资源，那么我们来分析一下，这样一个广大的资源为何现在开发得那么少呢？其实原因十分简单：光伏发电是与农业大棚内的植物相互争夺太阳资源的。

如图 9 所示，平板式的光伏板必然会将阴影投射到大棚内的植物上，阴影部分的光照度只有 200~500 勒克斯，即 C_3 植物的光饱和点(约为 20,000 勒克斯)的百分之几，其对光合作用的影响可想而知。固定平板式光伏电池安装在农业大棚房顶所形成的阴影会随太阳的移动而移动，但大棚内必定有一部分永远无法接收到光照，形成固定阴影，大棚这部分的面积实际上是不可以用来生长植物的。目前农业大棚上的光伏固定电站的发电是以牺牲植物生长的效率为代价的。

透光薄膜光电池是目前用于农业光电的首选，薄



Figure 9. The fixed flat PV will cast heavy shadow on the plants in the greenhouse
图 9. 平板式的光伏装置所形成的这样的阴影必然会投在大棚内的植物上



Figure 10. Any fixed flat PV installed on the rooftop of greenhouse will cause sacrifice of sunlight
图 10. 固定式平板光伏安装在农业大棚上会产生植物同光电争夺阳光的矛盾

膜光电池的种类很多，有砷化镓、铜铟镓硒、碲化镉、非晶薄膜、微晶薄膜等。透光薄膜光电池一般使用非晶硅基的薄膜，其可达到的最好透光率为 20%，而发电效率则只有 8%~10%，所以如图 10 所示，为了保证大棚内的采光，在安装透光薄膜光电池的屋顶上必须留足专门用于采光的部分，称为采光带。不同于一般的光伏电站，采光带的设制不是为了避免发电板的相互遮光问题而设计的。这样，在原来光电池发电必须设计足够的间隙以减少遮光影响之外，还需要专门留出采光带，而且在一般情况下，采光带的面积与光电池的面积之比为 1:1，这就大大减少了屋顶面积的光伏发电的使用效率。加上我们考虑到的薄膜电池比晶硅电池差得较多的光电效率的因素，使用农业大棚进行光伏发电的土地利用率只有 10 瓦/m² 左右或更低，相比传统建造在地面上的光伏电站，其可以达到 40~50 瓦/m²。因此，在有些大棚设计中，为了克服光伏阵列的遮光问题，农业大棚只好以间隔的形式沿南北方向分开，如图 11 所示，这在追求大面积，追求节省建材的近代农业大棚，如图 12 所示，特别在我们下面要讨论到的富碳农业工厂，是不可取的。

另外，以上所列的农业光伏设计的最大缺点是不能充分利用光热。被光伏阵列所使用了的大棚屋顶部分，本来可以透过阳光，使温室内(特别在冬季)能够起到提高温度的作用，而光伏发电的使用，其发电效率并不高，却失去了相当多的热量。

我们通过多年的研究和实践，发明了一种低倍聚



Figure 11. In order to install the fixed flat PV on the rooftop of the greenhouse, some designers used spacious gap between houses, which causes a waste of land
图 11. 为了克服光伏阵列的遮光问题，农业大棚只好以间隔的形式沿南北方向分开，使得土地使用率下降



Figure 12. The greenhouse designed in the above case is inconvenient to install the fixed flat PV
图 12. 快速发展的能够与植物工厂相比美的密封式玻璃大棚不容易铺设固定式光伏电池

光光伏装置，除了可以应用于地面电站以外，在农业工厂中会有极大的用途，由于这种聚光发电系统的特殊性能，使用它可以比较圆满地解决以上所列的传统的农业光伏的问题，解决光伏与植物争夺大阳光的矛盾，解决光伏的应用不能兼顾到光热的矛盾，从而开启一个真正的农业光电的大事业。它可以使用在本文所提出的富碳农业工厂中，产生电和热，供给人造光源所需要的部分电能、供给分解碳酸氢铵以释放二氧化碳所需要的热量以及供给农业工厂车间内温度控制所需的热量。此外，相同的聚光装置和跟踪方法，还可以应用到太阳光光导系统中。

所发明的装置的单元如图 13 所示，透明外罩上置有形式为三次方的非成像二次反射镜^[14]，可以比传统反射镜更好地进行聚光。阳光经一次反射镜聚光后，由二次反射镜以一种比较均匀的方式投射到光电池上，光电池的冷却是通过冷却盒进行的，液体冷却盒可以输出光电池工作温度的热量，光电池的工作温度为 $36^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 之间，其热量可以服务于热解和调温的目的。在特殊的情况下，通过调节冷却液的流量，可以调节光电池的工作温度，从而得到不同的冷却液

的温度，它们可以用来在不同的季节控制车间的温度。

将大量的这种单元集合在一起，使用一种圆盘结构的双轴跟踪方法，所有低倍发电单元都在一个高度约为半米的高度下进行仰角和方位角的太阳跟踪，圆盘结构的双轴跟踪有效地避免了可能的风阻，以及这些风阻对跟踪精度的影响。我们以图 14 所示的分布为例，来粗略估算出一些有用的数据。在图 14 的设计中，可以看出，由于单元是圆形的，转盘又是以中心旋转方位角跟踪，单元之间还留出一定距离以避免遮光，这样，工厂顶部被光电使用的有效面积约为总面积的 25%，克服了光伏与植物争夺阳光的缺陷；光电部分在工厂内部所形成的阴影由于装置跟踪的原因，不再是固定式的，而是随时间扫描式的，不影响植物的光合作用，克服了固定阴影的缺陷；光电池的正常工作温度根据所用光电池的性质，一般在聚光以后，可控制在不超过 60°C 的范围。由冷却液所收集的热量的温度在 $35^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 之间，恰好是碳酸氢铵的分解温度，也可用来调节室温，光热可以获得充分的应用，克服了由光电所收集的光热的热量的品质不高的

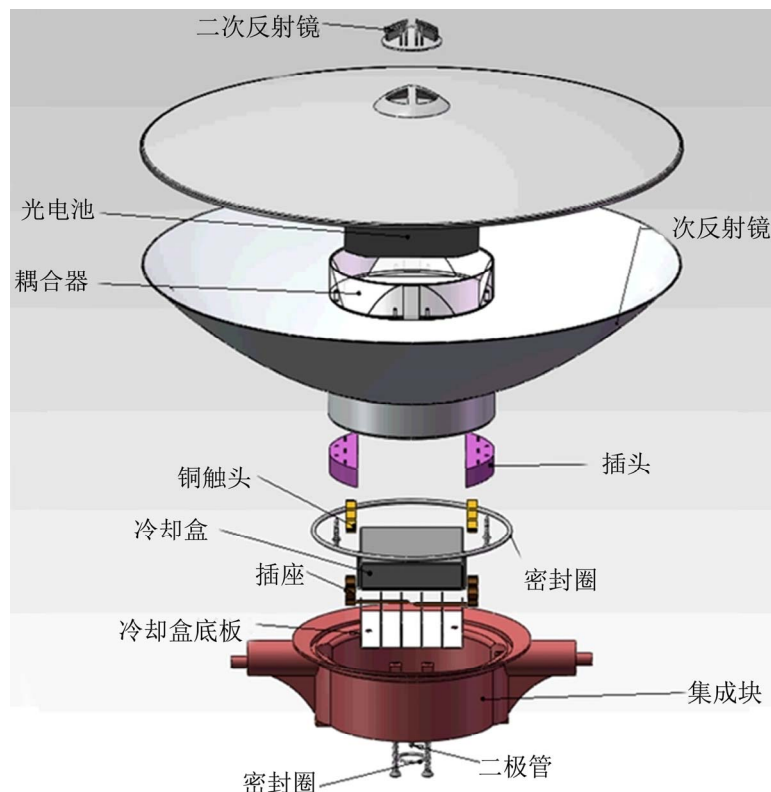


Figure 13. The unit of 8 times concentration PV
图 13. 八倍聚光光伏单元

10000平米大棚布局

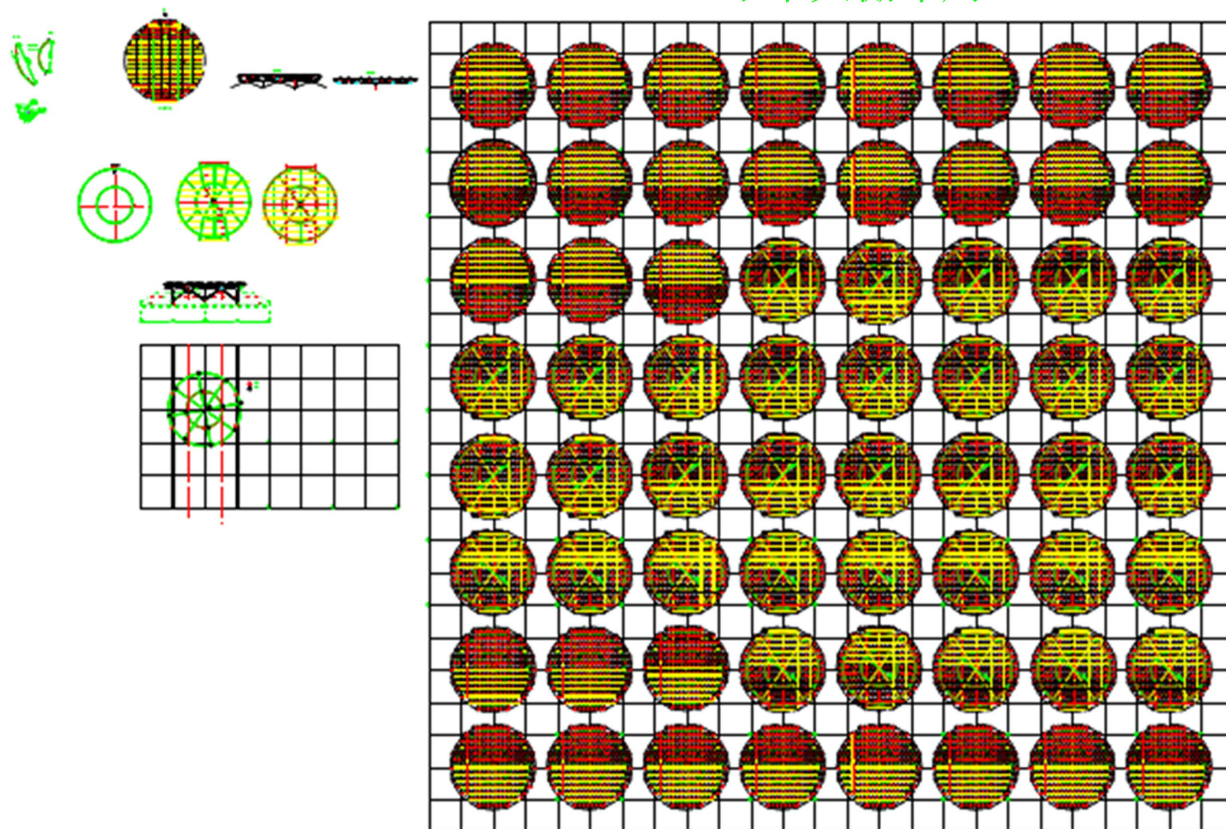


Figure 14. There are outputs of 300 KW electricity and 750 KW heat for a rooftop of agriculture factory with an area of 10,000 m² to install a total of 64 LCPV devices and each is 5 KW of electricity. The actual sun blocking area is only 25% and the casted shadow is movable due to sun tracking

图 14. 一个一万平方米的农业工厂顶部设计图，共设置 64 台低倍聚光器，每台峰值功率为 5 千瓦，实际遮阳面积为 25%，光电输出为 300 千瓦，光热输出 750 千瓦

缺点：在本设计中，光热的萃取是光电剩余热量，并且其萃取更增进了光电的工作效率，克服了光电光热争夺阳光的矛盾。综合上述的光电和光热的应用，在工厂顶部 25% 的面积上，对太阳能的利用效率可以达到 60% 以上。其中光电 18%，光热 45% 左右。

这种低倍聚光光伏光热的造价，在阳光一类地区，光电部分已达到每度电 0.6 元，光热部分已达到每度热 0.2 元的水平，而且随着技术的进一步成熟，其降价的空间将是十分巨大的，清洁能源的成本基本上可以与化石能源成本持平并进行互补使用。

低倍聚光光伏光热的应用是分两部分进行，光电主要用于人造光源，可以直接使用，也可以储电后在夜间使用。在一个一万平方米的农业工厂的顶部可产生 300 千瓦的光电，从最佳设计来计算，一万平方米农业工厂的人造光源最多可使用 1300 千瓦的电力，在这种最佳设计中，太阳光电只是一部分的补充；然

而在电力供应不足的区域，可以仅使用太阳能发电，是分布式电站的一个典型应用。太阳光热的应用当然首先应保证碳酸氢铵的热分解应用，以提高二氧化碳的浓度。在这里我们来估算一下，按照第五章中所提出的减排要求，太阳能光热所提供的热量是否能做到这一点。在第五章中，一万平方米的农业工厂每年生产 160 吨干物质，其中含有 72 吨的碳，折合成每年消耗 260 吨的二氧化碳，如果假设它们全部来源于碳酸氢铵的分解(当然实际情况绝非如此，大气中的二氧化碳会起重要作用，此处仅为计算使用)，碳酸氢铵的使用量应为每年 465 吨。使用温度升高 40 度所需热量加上其热分解的分解热，即克分子 137 千焦耳进行计算，(考虑到碳酸氢铵的比热为 2 千焦/公斤度，内焓总能为 849 千焦，铵的结合能为 48 千焦，二氧化碳的结合能为 393 千焦，半液半汽的水的结合能为 271 千焦，1 摩尔 NH_4HCO_3 为 79 克)，全部热解需能量为

$$\begin{aligned}
 & (465,000 \text{ kg} \times 2 \text{ KJ/Kg} \cdot \text{度}) \times 40 \text{度} \\
 & + \frac{465,000,000}{79} \text{ mole} \times 137 \text{ 千焦/mole} \\
 & = 37.2 \text{ 兆千焦} + 806 \text{ 兆千焦} \\
 & = 843 \text{ 兆千焦}
 \end{aligned}$$

上述的一万平方米的农业工厂可获得约 750 千瓦光热，若每年有 1500 小时全光照，总热量为 1.1 兆千瓦时，为 4000 兆千焦，此热量中约五分之一部分可用于 NH_4HCO_3 热解所需的能量。以上计算表明热分解所需热量仅为太阳能光热所产生的热量的一部分，太阳能光热还会有相当部分，约 80%，可以用于控温。所述的收集到的太阳能光热是一种可以储存的能量，储存时间可以从几小时到几天。使用简单的方法以水或导热油所储存起来的热能是农业工厂车间在冬天进行控温的主要手段。在以上列举的一万平方米的车间中，扣除了气肥热分解的热量，尚余 600 千瓦的热功率，加热时间平均每天约 5 小时，即 3000 度电相当的热量。这些热量能否足够供应车间在冬天的取暖，与许多因素有关：车间的保温设计、周围环境的温度以及通风情况等等。但无论如何，多倍聚光所收集的太阳能光热会提供冬季控温的主要部分，根据要求，不够部分应由外加能源补充。夏天的温度调节可以由遮阳及暂时通风来解决，这应当是最低成本的方法，然而，太阳能的光热应用会起到很大作用，如上所述，在本文所述的多倍聚光系统的冷却方式中可以看出，通过调节冷却液的流量，可以获得不同温度的冷却液。在酷热的夏季，一种方式是加大流量，使得车间顶部的温度冷却得更快，以达到降温的要求，另一种方式，可以减少流量，在合适的光电池的配合下，使产生的液体的温度更高一些。当然，这种纯粹使用太阳光热进行控温的方法，在目前形式的农业工场或农业大棚中确实是不够的，不可避免地我们必须外供大量的能量。为此，我们在本文中提出了使用半埋式农业车间的概念，相信这种结合地热的车间，运用这里所提出的太阳能光热的调节作为补充，可以达到完善的控温目的。

4.2. LED 及农业用人造光源

农业中所使用的人造光源应当有如下条件：

1) 光谱范围窄或选择性光谱。发射光谱应当接近光合作用的吸收光谱；

2) 光强充足。对于进行光合作用的人造光源，其光强的要求应当满足恰好处于光饱和点以下。我们知道，夏季正投射的太阳光的光照度约为 100,000~80,000 勒克斯(LUX)之间，所以，应用在本文所提出的“富碳农业工厂”内使用的人造光源，其光照度应当设计为 20,000 勒克斯左右，即 20,000 流明/平方米，如果仅用于补光使用，在与太阳光并用的情况下，其照度要求可以适当降低；

3) 寿命长。人造光源的要求当然是愈长愈好，一般讲来，如果价格合适，十年以上的寿命应当可以了；

4) 成本低；

5) 冷光源。光源的红外部分几乎没有。

基于以上五个要求，目前多采用发光二极管(LED)，也有使用激光特别是半导体激光(LD)照射的，但成本较高。

与传统的白炽灯、甚至后期的节能灯不同(这些灯都是采用电-热-光转化)，LED 灯是电-光直接转化，省去了低效率的热-光转化。目前，在市场上可购的发光二极管灯具，效率可达将近 30%，寿命长达 50,000 小时(五年)，可以通过(P-N 结)的材料(不同的导电、绝缘衬底)获得不同光谱的灯光。LED 用于照明，比起节能灯来，色温显色性光效似乎并不太合适，因为人眼不太适应，然而用于植物的人造光源，却是十分适宜的，应当大大提倡。利用光伏将白光的太阳能转换为电能，然后再将电能通过 LED 转换为植物所需要的红光和紫光，这个过程，实际上是一种自然界中的频谱转换过程，是提高光合作用效率的方法。另外，LED 的方向性，也使它作为照明灯并不太好，然而用于植物的人造光源，却恰到好处。

关于成本的评估：的确，白光 LED 的成本比较高。但是，对于光合作用所需要的蓝紫光和红光的、光谱范围比较窄的 LED，由于 LED 本来是单色光源，其成本实际上是比较低的。同普通节能灯的成本可以比较。

植物的光合作用可随温度增高而降低，所以，人造光源尽可能采用冷光源。同荧光灯一样，LED 灯的光谱范围窄，即使是色温达到 3000~10,000 KJ 的白光，也不含红外谱线，所以是典型的冷光源。在发光过程中，LED 装置需要散热，但这种电-光装置中的散热，可以控制在一定范围内，不使其传导至植物叶片上。

LED 光效可以用单位流明/瓦_电来表示，表 3 为不同光源的光效比较。

将发光二极管应用于“富碳农业工厂”的两个关键是 LED 的效率与成本，虽然这两个关键是互相关联的，我们在下面分别对它们的最新发展进行讨论：

LED 的效率

LED 的发光效率定义为：

$$\eta_{\text{total}} = \frac{\text{光照明功率}}{\text{输入电功率}}$$

它是由四个部分组成：

1) η_{int} ，指内部量子效率，由外延衬底决定。

2) η_{elect} ，指电路效率，主要由它驱动决定，会随设计的改进而得到提高。

3) η_{extr} ，指电 - 光转化效率。

4) η_{pack} ，指安装效率，主要是指荧光转化，透镜、反射镜聚光效率等。

实际上，我们有

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{int}} \cdot \eta_{\text{elect}} \cdot \eta_{\text{extr}} \cdot \eta_{\text{pack}}$$

下表为对于白光 LED 的各种效率的比较，我们比较了 2009 年的效率统计和 2012 年的效率

效率(%)时间	η_{int}	η_{elect}	η_{extr}	η_{pack}	η_{total}
2009	60	84	75	60	23
2012	90	92	90	70	52

据 2012 年 6 月 MIT 的技术报告，德国公司 Osram 制造的 127 流明/元的 LED 效率已达到 58%^[15]。LED 的高效率会部分补偿本方案中所运用的太阳光 - 光伏 - 发光二极管的循环中，由于光伏效率的低下而带来的损失。即使不计人造光源所能提供的工厂的立体性、工作的连续性而带来的对作物高产的优点，仅考虑发光二极管的高效性，这种循环也是值当的。根据我们上文所述，由于太阳光光强远大于光合作用的饱和点，又由于太阳光中平均有一半的光谱线不能被吸收，所以这两个因素会使太阳光的自然运用只有 10% 左右，而在上述的太阳光 - 光伏 - 发光二极管的循环中，第一部分的效率为 18%，第二部分的效率为 52%，这样的循环效率也能达到 9%。

LED 成本主要由材料和由不同材料需要的工艺过程决定。LED 的典型构成是由在衬底上生长的氮化

Table 3. The efficiency of LED light is higher than that of energy-saving lamps and fluorescent lamps
表 3. LED 的光效比节能灯及荧光灯都要高

LED	白炽灯	节能灯	荧光灯
150 LM/瓦 _电	12 LM/瓦 _电	60 LM/瓦 _电	96 LM/瓦 _电

镓薄膜及荧光机构，而以往的衬底大多是用蓝宝石、碳化硅等材料制成，所有工艺过程及二极管的大小等都同所用衬底材料有关，蓝宝石是比较昂贵的材料，并且不容易制作大面积发光二极管。近年来，多晶硅的价格的暴跌，给 LED 衬底材料带来新的技术方向。由于硅片价格只有蓝宝石材料的 30%，并且易于制作大电流的二极管，所以，近年来，由硅基制作的 LED 使成本大大降低，美国、中国(Lattice Power)、英国、日本都在这方面取得突破，可望一次性将成本降低 75%，美国有公司计算，此技术进步可以将 75 瓦的 LED 灯从原来的 40 美元降为 5 美元，达到 6 美分/瓦，即 0.4 元/瓦的水平。

上述技术的突破所带来的经济效益是十分明显的，特别在本文中所述的“富碳农业工厂”中的大规模应用的可行性提供了科学依据，所以，我们有兴趣了解一下，这样的科技突破是如何实现的，实际上，在硅片上生长碳化镓是早已有的技术，但要在大面积衬底上使用，其困难在于碳化镓与硅片的热膨胀系数的不同，新技术的要点是在碳化镓周围另外生长了铝质化合物以平衡 LED 由于冷缩而产生的龟裂。

当然，硅基 LED 的突破也并非仅是仅有的技术方向，有人提出使用碳化镓做衬底以防止晶体结构的不匹配，倘若在不久的将来，碳化镓衬底能够以更低价的方法制造出来，大功率的低廉的 LED 将对“富碳农业工厂”中的人造光源给出更大贡献。

4.3. 半埋式地下农业工厂是现代农业的重要选择

我们在上面已经叙述过，全密封的农业工场由于其高昂的建筑成本和很高的绝热恒温的要求，并不适合于大规模推广，而开放式的或半开放式的中国独创的农业大棚又在保温和抗衡冬夏极端气温方面缺乏优越性，这些都形成了对本文所提出的建造“富碳的人工小区域气候农业工厂”的障碍。为了制造这样的人造气候，大量消化工业生产出来的二氧化碳并极大

地提高农业生产率，我们在这里提出一种新的半埋式地下农业工厂车间的设计概念。

半埋式的地下农业工厂车间使用地热和太阳能光热相结合的方法进行控温；使用太阳能直接光照、人造光源和太阳能光导相结合的方法提供植物生长所需要的光能；在全密封的环境下使用热解的碳酸氢铵所产生的高浓度二氧化碳提供植物生长的原料。我们可以利用已存的大量的可以进行密封的废井、废矿、废地层、废地道等进行就地改造；在更大规模的使用中，更可以在富有阳光资源的广袤的沙漠、荒漠、盐碱地、荒地等典型的困难立地的地下进行开发，其基本结构如图 15 所示。

如图中所示，工厂的车间是宽度为 6 米、长度为 120 米、深度为 8 米的长条深沟，车间的顶部覆盖高强度的钢化玻璃，车间的四壁为钢筋水泥的覆被层，车间地面为硬化层。为了优化自然光照的吸收，长条车间的方位是沿着东西方向建造的，在车间的北面墙壁(如果车间位于北半球)或南面墙壁(如果车间位于南半球)装置有一定角度的太阳光反射镜以保证在太阳高度较低的冬季车间内的自然光照的引入。

这种半埋式的地下车间由于宽度比较窄，可以充分利用地热资源。我们知道由于地球的结构，地下一定深度的温度是比较恒定的，可以起到冬暖夏凉的作

用。地质调查已经取得数据，在我国华北平原地区的地下 5 米处就可以取得一年四季平均为 18℃ 的恒温条件，这样的温度应当是最适合于植物的生长。当然，由于我们这里所设计的车间为半埋入式的，冬天和夏天的温度不可避免地受到太阳光照、白天黑夜和季度的影响。这种影响可以通过太阳光热的巧妙应用而消除。上文中我们曾经提到，在一个满负荷的低倍聚光的太阳能光热光电系统中，其光热的应用，除了热解碳酸氢铵以外，尚有 80% 的热量盈余，这些盈余热量，在冬天就可以用来提高车间的温度。这些盈余热量，在夏天就可以用于其他用途。在夏天的降温可以使用地下的低温空气而达到，所仅仅需要的则是使用合适的遮光装置调节直射到车间内的太阳光的强度，就可以方便的进行控温了。

植物所需要的光能在白天可以通过透过钢化玻璃的自然光引入车间，在北半球的如是车间的北部墙壁上的反射面可以帮助减少较低的太阳高度的影响，东西方向的长条车间的方位可以保证除了东西两头小部分的位置的绝大部分的自然光照，而这两头的光照问题可以方便的使用下节所述的白光光导纤维的技术解决，而白光光导纤维的技术还可以帮助实现三维的植物分布的光照的需求。在所述的农业工厂中，在 8 米的高度空间中进行多层的植物培植，除了最接

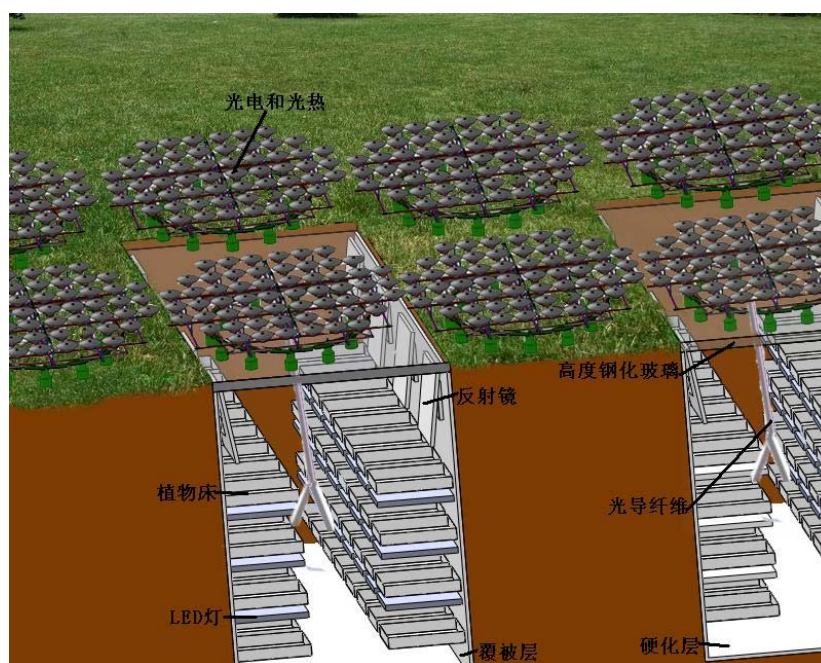


Figure 15. Schematic diagram for the partial buried agriculture factory
图 15. 半埋式农业工厂结构示意图

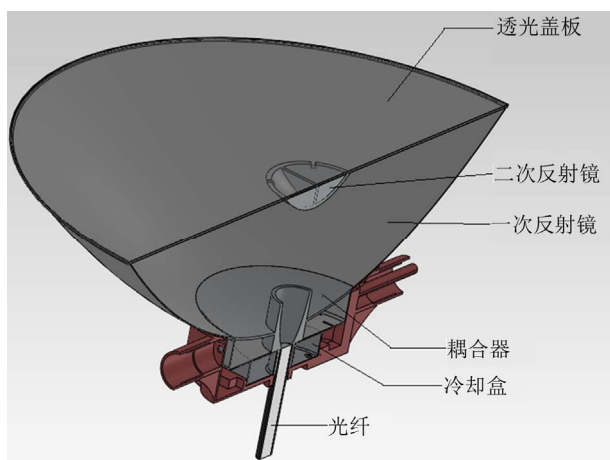


Figure 16. Schematic diagram for the solar optical fiber using non-imaging optics

图 16. 非成像聚光的太阳光光纤设计示意图

近地面的第一层以外，其他栅层的植物的光源在白天可以由光导纤维引入，光伏电站所产生的电能可以在白天储存以后，于夜间点亮人造光源对植物进行补光，如图 16 所示。富碳农业工厂的光照与传统农作物光照的另外一个明显的不同是大量地应用了冷光源，植物叶面的蒸发可以大量减少，从而减少了农业对水源的依赖。

我们在下文的叙述中，将要更详尽的讨论本节所述的半埋式的车间的造价，以论证这种新的设计概念的可行性。

4.4. 太阳光光导纤维的技术

使用光学中的全反射原理所发展出来的光导纤维，在光通讯产业上的巨大成功，促使人们不断开发引导太阳光的光导纤维。这两种光导纤维的重大区别在于光通讯可以运用小能量、单频率的光源，而太阳光光导纤维则必须对付高能量、全频率的太阳光，所以太阳光光导纤维的结构同通讯用光导纤维的结构有很大的区别，通讯用的光纤的内芯的直径很细，同所传输光的波长同一数量级，太阳光纤则要粗很多，可以达到直径为 2~3 毫米。就传统应用的意义讲，发展太阳光光导纤维的意义也是十分重大的，一个中等的发展中的工业国家，照明用电占总体用电的 10%~15%，白天照明用电与夜晚照明用电的比例由于地下商场、地下交通的发展更加在仲伯之间，大批量的太阳光光纤的商业化应用对建筑业的影响是显而易见的。本文所提出的在植物工厂中的应用是一种规

模更大层次更高的应用。

将太阳光导入室内，除了最普遍使用的窗门以外，可以使用光导筒和光纤两种方法。相比光纤，光导筒技术可能更廉价和易行，然而由于缺乏大面积的聚光机构和有效的跟踪方法，对太阳光的应用效率是比较低的。经过大规模的商业化的发展，光纤的造价以及可靠性是会很快占据优势的。

目前太阳光光纤的主流产品为塑料光纤(纤芯材料为亚克力)和石英光纤(纤芯材料为石英)，其衰减率可达 200 db/km 和 80 db/km。太阳光光纤在本文所述的半埋式农业工厂中的照明效率由无光像聚光器的聚光效率、聚光束进入光纤的耦合效率、光纤的填充率以及由衰减率所决定的透过率而决定，对于图 16 所设计的结构，我们可以估算 10 米长度的太阳光光纤的照明效率如表 4 所示。

上表的结果可以明确显示出来，塑料光纤与石英光纤在光传输距离较短的情况下，其照明效率并无太大区别，而这两种不同光纤的造价的巨大差别使我们建议，在本文所提出的农业工厂的太阳光导入系统中可以考虑使用塑料光纤，以降低项目成本。这当然还需要考查一下其他因素，如耐候性、寿命等。

4.5. 碳捕集和封存，使用氨水对二氧化碳进行捕集

近些年来所发展的碳捕集和封存^[2]主要是基于地质封存，包括陆地封存、海洋封存的概念，我们在这里所提出的碳捕集的概念是基于直接的碳循环，可以采用直接收集二氧化碳的方法，即在一些集中的碳排放的地点，将高浓度的二氧化碳气体进行直接收集、压缩后使用，这种方法的捕集成本可以低至 400~600 元/吨。在一些炼钢厂，由于吹氧的高效燃烧，可以获得 80%的碳排放浓度，直接压缩法可以施行。然而对于本文所讨论的农业应用，我们还更希望考察一下化学吸附的可能性，希望这种化学吸附的成本将来可达到直接捕集的水平。所谓化学吸附，即找到一种物质，使其碳酸化，二氧化碳以化合物的形式暂时储存于其中。在本文的讨论中，我们提出，这种经过碳酸化的新化合物又经植物的光合作用以碳的形式进入碳水化合物，从整体讲来，在地球表面，碳并未减少，然而碳以目前的造成气候变化的二氧化碳的存在形式，

Table 4. The efficiencies of solar optical fiber in the underground workshop with transparent roof top

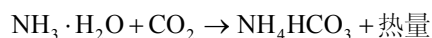
表 4. 太阳光光纤在半埋式农业工厂设计中的照明效率

	塑料光纤(200 db/km)		石英光纤(80 db/km)	
	10 米	5 米	10 米	5 米
光纤透过率	63%	79%	83%	91%
聚光效率	76%		76%	
耦合效率	85%		85%	
光纤填充率	75%		75%	
	10 米	5 米	10 米	5 米
光纤照明效率	30%	38%	40%	44%

转化为碳水化合物形式并存放起来。对于这种碳位于地球表面上(而不是封存在地下或海洋深处)的存放,人类赖以营养自己,并可以用其干物质逐渐代替地下的化石能源,一直到取得平衡。

氨水可以捕集二氧化碳而生成碳酸氢铵。碳酸氢铵,也叫碳铵,其分子式为 NH_4HCO_3 ,可计算出,碳酸氢铵中,含氮 17.7%,含二氧化碳 55.7%。碳酸氢铵在 36℃ 开始,分解为 NH_3 、 CO_2 和 H_2O 三种物质,60℃ 分解完毕,分解反应为吸热反应,需要分解热为 1 克分子 849 千焦。碳铵的制造是通过捕集二氧化碳获得的,而它的分解又能提供植物的营养,并且分解的温度又不高,正好在低倍光伏聚光器的散热温度范围内,这就解释了在众多的产品中,为何碳铵成为我们重点研究的目标。

碳铵的生成反应式为



是一个放热反应。大批制造碳铵的方法是来自石灰窑或其他大量排放的工业场所,特别是热电厂的经洗涤净化过的 CO_2 气体,通入氨水使之饱和,这是一种使用吸收法进行捕集的方法,传统上,化学反应一般是在被称为碳化塔的容器中进行,塔高 20 米左右,洗净的二氧化碳气体由塔底进入,被由塔顶进入的氨水吸收,塔内自氨水入口处以下基本是液态氨水,二氧化碳以气泡状上升以增加吸收效率,生成的碳化液从塔底的出口处排出,再进行分离和干燥等工艺步骤。我们提出,二氧化碳的氨水吸收应当同燃烧技术及化学吸收程序有机的结合在一起,并且有效的运用不同的吸收剂,可能应考虑干法吸收剂、离子液体吸收剂、低聚吸收剂等等在氨水吸收二氧化碳的过程中的运用。

碳酸氢铵由于其原料低廉,工艺简单,成本比较低,制造本文所讨论的作为二氧化碳中转物的成品的成本,在极大规模的条件下,应当在 0.5~0.8 元/公斤之间。我们将以此数据计算整体提案项目的造价。

5. 富碳农业工厂的投资估算

以上所述的用近代光电技术装备起来的富碳农业工厂,可以实现在全球的大规模范围内碳元素的良性循环,是工农业生产一体化的模式。工业工厂由于消耗能源碳生产出来的碳排放气体,相当一部分由农业工厂高效率地消化并转化成能源碳,我们在提倡工业经济的低碳性的同时,更要提倡农业经济的富碳性,直至这两种经济的平衡。人类的文明旨在驾驭这种平衡的循环,并求之可持续的发展。这种工农业生产一体化模式是否会对解决当今世界的四大难题有作用,所提方案是否有可行性,在本章中,我们将通过一个在中国实施的具体例子进行一个初步探讨,文中所用的各种技术的成本同当前小规模生产的成本与造价可能有一定的差别,尽管这些成本的估算是作者根据技术本身的发展的前景尽力真实地进行,我们相信,如果项目进入实施阶段,数量和规模会填补这些。在以下的估算举例中,本来我们应当通过一个小型的试验再推广到大规模的应用,然而我们为了急于想获得一个本提案的整体形象,以证实本提案的可行性,所以一步进入大规模的系统工程的投资预算。然而这没有任何意思忽略小型试验的重要性和必要性,在实践本方案时,应当通过小型试验再推广到大规模应用。

5.1. 减排及农业增产目标

按照 IPCC (国际政府间气候变化委员会)对全球的减排的目标,根据目前全球工业及交通排放的实际状况,应当每年减少 10 亿吨碳排放,根据这样的目标,作为一个发展中国家,假设中国可以承担 1 亿吨的减排,折合成二氧化碳就会成为 3.6 亿吨。如果按照本文所述,这 3.6 亿吨的二氧化碳全部通过富碳农业工厂转换为农业产品,则可以增产 7.2 亿吨农作物的干物质,其中包括 2.5 亿吨的可食用作物。这样一个增产是相当可观的,我们只要比较一下 2011 年全国的粮食总产为 5.7 亿吨,就会知道它的意义。

5.2. 富碳农业工厂的总面积的要求

要计算工厂的总面积，应当先假设在富碳农业工厂中的亩产，根据本文第二章所述，富碳农业工厂通过光电技术的应用，可以大大的提高作物的光合作用效率，从而在本文中，我们假设亩产为 10,000 公斤/年是可以达到的，在这样的亩产的目标下，每平方米的农业工厂的年产量应当为 16 公斤干物质。由此可以计算出生产 7.2 吨农作物的干物质的总面积应当为 450 万公顷。我们对这样一个面积理解可以通过以下予以加深：

- 1) 全国可耕地面积 18 亿亩，即 12,000 万公顷，富碳农业工厂占 3.7%；
- 2) 全国沙漠面积 130 万平方公里，富碳农业工厂占 1.5%；
- 3) 全球每年沙漠化土地 500~700 万公顷，中国的富碳农业工厂的面积相当于全球 1 年所失去的可耕地。

以上三个比较可以旁证本文所提出的大规模的富碳农业工厂的实施，在土地使用上是可行的。另外，由于富碳农业工厂使用了大规模的光电技术，所以它们最好建立在中国北方阳光充沛、雨水缺少的地方。然而我们并不认为在一开始的阶段，应当将富碳工厂置于荒芜地区，这是考虑到农业人口城镇化的因素和所供农作物市场的因素，在第四章的计算中，我们仅仅将全年峰值阳光的时间值假设为 1500 小时，这就说明了本项目的实现可以在阳光 2 类地区进行。

5.3. 对碳酸氢铵的投资

由于碳酸氢铵中二氧化碳的含量为 55.7%，所以 3.6 亿吨二氧化碳需要 6.5 亿吨碳酸氢铵产生。目前，全国碳酸氢铵的生产分布在各个中小城镇和县城，其生产成品的主要用途是作为含氮的化肥；在上世纪的七、八十年代，曾经十分发达。然而近年来，由于尿素逐渐成为主要的氮肥，碳酸氢铵的生产逐渐退出历史舞台，尽管这种化肥的售价已经大幅度下降到 1 元/公斤的水平，相当多的工厂仍然面临关闭和转产的命运。本项目提出将碳酸氢铵作为吸收二氧化碳的主要媒介(氮肥的使用倒还是次要的应用，如果在实际应用中，由于对二氧化碳浓度的要求很高而导致氮肥过剩，还必须实施氨水的回收)，如果以上项目能够付诸

实施，将会把一个面临破产的工业系统挽救过来，并且我们相信碳酸氢铵的生产成本可以降为 0.5 元/公斤。对二氧化碳的吸收塔可以布置在任何大量排放废气的工业基地周围，特别是水泥制造厂，石灰制造厂，钢铁制造厂，火电厂，煤锅炉厂，大型化工厂，有色金属厂，玻璃制造厂等等。根据以上所估计的碳酸氢铵的单元成本，每年碳酸氢铵的总费用应当为 0.324 万亿人民币。

5.4. 对发光二极管的投资

如果上述的 450 万公顷的农业工厂的面积全部使用人造光源，我们可以计算在这样的情况下，到底需要多少发光二极管。当然，以上这个要求是苛刻了一些，然而计算的结果可以作为一个实施项目的重要的参考数据。我们知道，对于 C_3 植物，光合作用的饱和点是在太阳峰值照度(夏季中午直射光下为 100,000 勒克斯)的四分之一左右，我们可以要求发光二极管的平均照度为 20,000 勒克斯，如果 LED 的效率能够达到每一瓦电产生 150 流明的光照的话，对于发光的供电要求则应该达到 133 瓦/平方米，这样的计算导致对发光二极管的总功率的要求为 6×10^{12} 瓦，如果每瓦的 LED 的价格，根据最新技术的发展，能够达到 0.4 元/瓦，总计发光二极管的成本将为 2.4 万亿元。然而，这是一次性的投资，考虑到最新发展的发光二极管的平均寿命可达 12.5 年，每年消耗在发光二极管上的费用为 0.19 万亿元。

5.5. 对低倍聚光光伏光热的投资

仍然使用富碳农业工厂的总面积 450 万公顷即 $4.5 \times 10^{10} \text{ m}^2$ 来进行计算，尽管低倍聚光光伏的平均土地使用率已达到 50~60 瓦/ m^2 ，在我们的计算中，由于农业工厂的其他要求，可以将平均土地使用率降为 30 瓦/ m^2 ，这样的话总面积的富碳农业工厂可以铺设低倍聚光光伏 1.3×10^{12} 瓦即 1300 GW 或 1.3 TW，对这么大规模的光伏电站，其单元造价降为 6 元/瓦，应当是十分合理的。这样的话，对低倍聚光光伏光热的总投资则为 7.8 万亿元，考虑到它的工作寿命为 25 年，每年投资为 0.31 万亿元。

5.6. 半埋式富碳农业工厂车间建设的投资

从投资的角度看来，本提案的主要投资部分应当

是车间的建设，因为富碳农业工厂的车间要求全密封，保温，透光，控温，防风等，按照当前的建筑造价，应当在每平方千元以上。然而，富碳农业工厂的车间的设计如果考虑到控温的要求而采用上章所提出的半埋式的方式的话，由于车间设计的一致性，可重复性，所使用材料的简单性，特别是所使用材料的可循环性(主要是玻璃、钢材、铝材)等等，应当在如此大规模的建筑中将成本降低，其造价可以参考我国陕北地区窑洞的建筑成本，另外，半埋式车间的设计还会有许多优化的方法以减少材料的运用。在一般的情况下，对于一个经过优化处理的半埋式车间，其主要费用的单位成本能够降为 400 元/m²，其中大约包括：钢化玻璃 90 元，钢架 80 元，水泥 50 元，土方工程 50 元，人工 80 元，其他 50 元。按照这样的估算，450 万公顷车间的建设的总投资为 18 万亿元，假设车间的工作寿命为 100 年，每年平均投资为 0.18 万亿元。

富碳农业工厂的车间的建设的最大的难题应当是车间的保温和控温。地面以上的车间会更多地受到年气温的变化的影响而使车间的建造更加昂贵。其实，由于上述的富碳工厂的设计和构思已经使车间的存在与地面的阳光无关了，因此，为了克服冬夏气温变化所引起的控温的困难，可以将富碳农业工厂的车间建造在地下，根据当地的地质条件的不同，其深度可以在 5 米到 30 米之间。在这样深度的地下环境，其气温是基本上稳定的，不需要耗费更多的能量去进行控温。这种完全地下的农业工厂的设计的造价会比较高，太阳光引入的成本也会过高。本文所讨论的半埋式的设计会更加适合于大规模推广。大量的建造在地下的富碳农业工厂的出现，将根本缓解人类对耕种土地的危机性的需求，我们更加可以有条件将广袤的沙漠及盐碱地改造成农业工厂，在这些地区的地下，而不是地上。

我们也深信，随着人类社会的进一步发展，当我们的人口爆炸到一定程度时，富碳农业工厂不但会在地下开设，也会逐渐转入海洋。

5.7. 社会总效益

为了计算总效益，需对以上数据进行归一化处理，那么我们可以将以上各项投资按每年的价值加起来，即 $(0.324 + 0.19 + 0.31 + 0.18)$ 万亿元 = 1.0 万亿

元，为每年平均投资额。其投资收获为 7.2 亿吨有机干物质(包括粮食与蔬菜水果等)，如果估计这些干物质的平均售价为 2.5 元/公斤则每年的总收益为 1.8 万亿元，这样计算得到的是单纯的直接经济总增益为 80%。

在本文中我们提出的依托太阳能的富碳农业工厂其特点是：以工厂化的高效、立体农业为我国农村城镇化的新试验点，避免农村致富往往脱离务农的倾向，确保粮食安全；以碳酸氢铵为载体，将沉重的工业减碳任务转化为农业富碳增产手段，在农业增产、实现节能减排的同时，为燃烧产生的二氧化碳找到固化为有机物的最佳出路；以大面积低倍聚光光伏发电、LED 频谱变换技术、光热利用等技术为主提供农业工厂所需能源，同时兼顾对作物的充分光照，以最佳条件下的高效率光合作用实现远超常规的农业丰产，某些时段产生的电能(也许加上集中大量产生、可炼油的作物秸秆)还能有效补充、优化能源结构。

同美国等地的大规模的农业生产的机械化生产方式不同，本文所提出的是一种农作物生产的工业化的概念，同我国多年以来的传统耕作方式有一定的联系，根据我国国土资源的特点，富碳农业工厂是在已发展起来的农业温室、大棚等农业科技的基础上提出来的新的生产方式，它将近代科学技术的许多分支，包括光伏光热技术、气肥技术、LED 技术、机器人技术、光导纤维技术、近代建筑控温技术、新种子技术、超净无菌车间技术等有机地溶合入新的农业生产，农作物的生产可以以一种生产线的方式进行大规模的工业化生产。

实现本文所提出的农业工厂的主要困难是在初期的实践阶段，其成本可能会比较高，小规模操作的投资成本很可能是本章中所估算的比例数据的 150%~200%，然而随着规模化过程中农业工厂各要件的标准化的实现，此困难是可以克服的。

在克服了初期的本创新模式的产出阵疼以后，我们希望本提案可以在尽可能大的规模上进行实践，并在实践中不断地进行修正和完善。这种工农业生产一体化的提案自然不是旨在鼓励各国无限制的使用化石能源，而是强调必须顾及低碳工业和富碳农业之间的平衡，以达到修复地球生态的目的。

本文提出了使用碳循环的方法，将化石能源所产

生的碳排放通过植物转化为碳水化合物储存于地球表面，以抑止地球表面温度的继续升高，在保证人类的粮食安全的同时，其干物质还可以作为燃料逐步代替化石能源，成为真正的可替代能源。人类的发展，必须对新能源进行远景规划，具体落实^[16]。这样可以保证我们在这个星球上的持续发展。

6. 结束语

人类社会经过漫长的发展进程，从自然界中吸取养分并进行交换，已经同生态环境浑为一体，形成了一个类似于人体结构的硕大的自适应系统。这种将社会各业当作大系统来考虑，是许多智者的想法。汉文帝在两千多年以前就讲过，“农，天下之本，务莫大焉”；谁又知道外星人对我们的考察，可能是将我们的社会当作一个整体进行研究，而不是对我们的个人有兴趣，这即可解释为什么外星智物很少同我们个人进行沟通。在这个大系统中，哲学、科学、文学作为大脑，通讯、语言、媒介作为神经，欲望、信仰、好奇作为激素，工农业生产作为营养循环系统，生态环境作为所依托的肉体和骨骼，我们每个人只是系统中亿万细胞中的一员。现在的问题是，经过几百年的工业革命，这个大系统开始生病了，四大难题则是主要病症。生病是自适应系统的一种自然反应，图4给出的测量已表明大系统确实由于生病感染而“发烧、升温”。究其原因，应当是工农业生产的营养系统的碳循环出了毛病，碳循环很像人体中的血液或气体循环，大系统的碳循环出现了怪异的不平衡症候，呼出的二氧化碳太多，供吸入的氧气太少；希望本文给出的药方，四元方程的解，能够在改善碳循环方面迈进

一步，这就需要将整个系统进行调整和休养生息，在生存发展的同时，修复地球。而这个过程，可能需要几十年到上百年甚至上千年，虽则在历史的长河中，也只是瞬间。

参考文献 (References)

- [1] Mandiola, J., et al. (2013) Sperm counts may have declined in young university students in Southern Spain. *Andrology*, **1**, 408-413.
- [2] Rackley, S. (2010) Carbon capture and storage. Elsevier Inc., Amsterdam, 3.
- [3] Pearce, F. and Page, M. (2008) Climate change: The next ten years. *New Scientist*, **199**, 26.
- [4] Gore, A. (2013) The future. Virgin Books Press.
- [5] Wigley, T. and Schimel, D. (2000) The carbon cycle. Cambridge University Press, Cambridge.
- [6] Adams, J. (1998) Estimates of total carbon storage in various important reservoirs. Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory, TN37831, USA.
- [7] Barrett, P.M. and Willis, K.J. (2001) Did dinosaurs invent flowers? Dinosaur-angiosperm coevolution revisited. Cambridge Philosophical Society, Oxford.
- [8] 许大全 (2002) 光合作用效率. 上海科学技术出版社, 上海.
- [9] NOAA Mauna Loa Data (2013) NOAA release date for monthly CO₂ data: Atmospheric CO₂ Mauna Loa Observatory monthly mean CO₂ concentrations since March 1958.
- [10] (2007) IPCC fourth assessment report: Climate change.
- [11] (2009) Global carbon budget, decadal averages. Calculations by Pro Oxygen on Annual Data Published in Nature Geoscience.
- [12] 户莉义次. 薛德榕, 译 (1979) 作物的光合作用与物质生产. 科学出版社, 北京.
- [13] Zhu, X. and Long S. (2008) What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current Opinion in Biotechnology*, **19**, 153-159.
- [14] Chen, Y.T. and Ho, T.H. (2013) Design method of non-imaging secondary (NIS) for CPV usage. *Journal of Solar Energy*, **93**, 32-42.
- [15] Patel, P. (2012) Cheaper LED light bulbs are on the way. *MIT Technology Review*.
- [16] 杨名舟 (2013) 中国新能源. 中国水利水电出版社, 北京.