

# Interactive Relationship in CO<sub>2</sub> Spirulina-Fixation System and Energy Consumption Assessment

Xiaoyi Yang<sup>1\*</sup>, Ziyu Liu<sup>2</sup>, Chaozong Liu<sup>2</sup>, Shun Tang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Energy and Environment International Center, School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing

<sup>2</sup>Centre for Materials Research, University College London, London UK

Email: \*yangxiaoyi@buaa.edu.cn

Received: Apr. 25<sup>th</sup>, 2020; accepted: May 8<sup>th</sup>, 2020; published: May 15<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Carbon sequestration by microalgae performs its unique advantage on available for wide range of CO<sub>2</sub> concentration in CCUS technologies. The upstream of CO<sub>2</sub> fixation system involves CO<sub>2</sub> capture, purification and transportation, while the downstream involves CO<sub>2</sub> supply and algal carbon fixation. There are several coupling impacts in system and uncertain factors with external environmental conditions. The CCUS-algae model, based on full life cycle theory, was established to quantitatively evaluate the effects of coupling factors, including relationship of flue gas with capture purification and transport distance, relationship of CO<sub>2</sub> source supply with the type of bioreactor, relationship of nutrient supply with protein content. The effects of environmental impact factors of radiation and temperature on growth rate were established according to a practical large-scale algae cultivation. The flue gas from coal-burning power plant or coal chemical industry is compared with this approach for cultivating algae as edible food and biomass. The energy consumption of the system is optimized by coupling the upstream and downstream key factors from the perspective of the whole life cycle, and the energy consumption of carbon sequestration is compared with CO<sub>2</sub> storage technology.

## Keywords

CO<sub>2</sub> Biofixation, Spirulina, Whole Life Cycle, Environmental Factors

# 螺旋藻烟气固碳系统能耗及耦合因子交互关系

杨晓奕<sup>1\*</sup>, 刘子钰<sup>2</sup>, 刘朝宗<sup>2</sup>, 唐 顺<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京航空航天大学能源与动力工程学院, 能源与环境国际中心, 北京

\*通讯作者。

<sup>2</sup>伦敦学院大学, 材料研究中心, 英国 伦敦  
Email: yangxiaoyi@buaa.edu.cn

收稿日期: 2020年4月25日; 录用日期: 2020年5月8日; 发布日期: 2020年5月15日

## 摘要

在CO<sub>2</sub>利用技术中, 微藻固碳因可利用宽浓度CO<sub>2</sub>中显示出其特有的优势。微藻固定CO<sub>2</sub>体系上游涉及CO<sub>2</sub>捕获、提纯与运输, 下游涉及CO<sub>2</sub>供给与微藻固碳, 具有诸多内部交互及与外界环境交互的不确定因素。本研究基于全生命周期理论建立的CCUS-algae模型, 通过规模化螺旋藻固碳实践数据, 建立了体系中交互耦合的定量关系。上下游交互关系涉及烟气源与捕获净化耦合关系, CO<sub>2</sub>源与运输距离耦合关系, CO<sub>2</sub>源供给与反应器耦合关系, 营养盐与蛋白含量耦合关系。体系与环境交互关系包括辐射、温度与生长率耦合关系。定量评价了环境影响因子对微藻固碳体系的定量影响。从全生命周期角度, 针对燃煤电厂和煤化工两种典型燃煤烟气, 比较了采用食品级与非食品级螺旋藻固碳的能耗, 并与封存技术进行了技术对比。

## 关键词

CO<sub>2</sub>固定, 螺旋藻, 全生命周期, 环境因子

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国能源体系和迅速发展的经济需求导致 CO<sub>2</sub> 排放逐年攀升, CO<sub>2</sub> 利用和封存亟待高效、低成本的有效措施。减少温室气体排放, 降低大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度, 在可持续发展的道路上寻找到应对气候变化和经济发展的双赢道路。我国的 CO<sub>2</sub> 排放源头主要来自燃煤电厂和煤化工, 燃煤电厂烟气 CO<sub>2</sub> 浓度约为 10%~15%, 煤化工烟气有高密度(CO<sub>2</sub> 大于 90%)与中密度(CO<sub>2</sub> 约 60%)。低能耗低成本的 CO<sub>2</sub> 捕集运输与后端利用的耦合成为 CCUS 的技术关键。

在 CO<sub>2</sub> 捕集与利用中, 微藻生物固定 CO<sub>2</sub> 与物理法、化学法固碳相比, 不仅周期短和环境适应性强, 而且处理速率高、更安全和可靠[1] [2]。特别是微藻固碳可利用宽浓度 CO<sub>2</sub> 在众多利用技术中显示出其特有的优势。微藻光能利用率 10%~20%, 而陆生植物中生长最快的柳枝稷太阳能利用率不到 0.5% [3]。高效光合作用支撑了其具有较高的固碳效率和高生物质产量。光能自养螺旋藻碳占微藻干重的 44%~55%, 即每吨微藻可吸收固定 1.6~2.1 吨 CO<sub>2</sub>。螺旋藻不仅生长速度快, 而且含有丰富、均衡优质蛋白及多种维生素和矿物质, 具有增进免疫、抗核辐射、调整代谢机能等多方面作用[1] [4] [5], 是一种保健食品和药品的天然资源。因此, 螺旋藻固碳不仅可作为生物能源载体加以后端利用[6], 也可提高培育等级作为饲料和营养品。

微藻固定 CO<sub>2</sub> 体系产业链长, 上游涉及 CO<sub>2</sub> 捕获、提纯与运输, 下游涉及 CO<sub>2</sub> 供应方式、微藻生长环境, 具有诸多内部交互因子及与外界环境交互的不确定因素。本研究针对两种典型排放烟气, 比较了食品级与非食品级螺旋藻的能耗, 并从烟气 - CO<sub>2</sub> 源 - 藻产品, 从全生命周期角度耦合上下游关键因素

优化了系统的能耗，并于现有的 CO<sub>2</sub> 封存技术进行了技术对比。

## 2. 研究方法

CCUS 模型是基于全生命周期理论建立的基于烟气 CO<sub>2</sub> 固定或封存的数学模型。其中烟气微藻固碳、烟气海洋封存与陆地封存的全生命周期模型框架见图 1。全生命周期系统分为三个阶段：捕集与净化，运输，吸收与固定/封存。

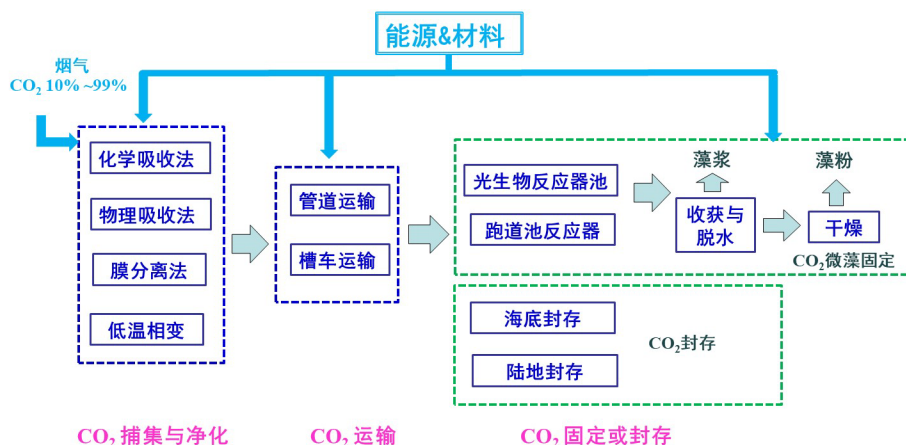


Figure 1. CCUS computational framework  
图 1. CCUS 模型计算框架

捕集与净化、运输、封存数据清单来自于已发表的文献[7] [8]。螺旋藻固碳数据来自于蒙加力公司实际培养数据。培养地点位于中国内蒙古鄂尔多斯市，北温带半干旱大陆性气候区。螺旋藻碳源来自煤化工烟气。养殖期为每年 4 月~10 月。4 月份为启动期，鄂尔多斯月辐照强度、月平均气温与螺旋藻产量见图 2。最高产量在 5, 6, 7 月，与月辐照度变化呈现相同的变化趋势。

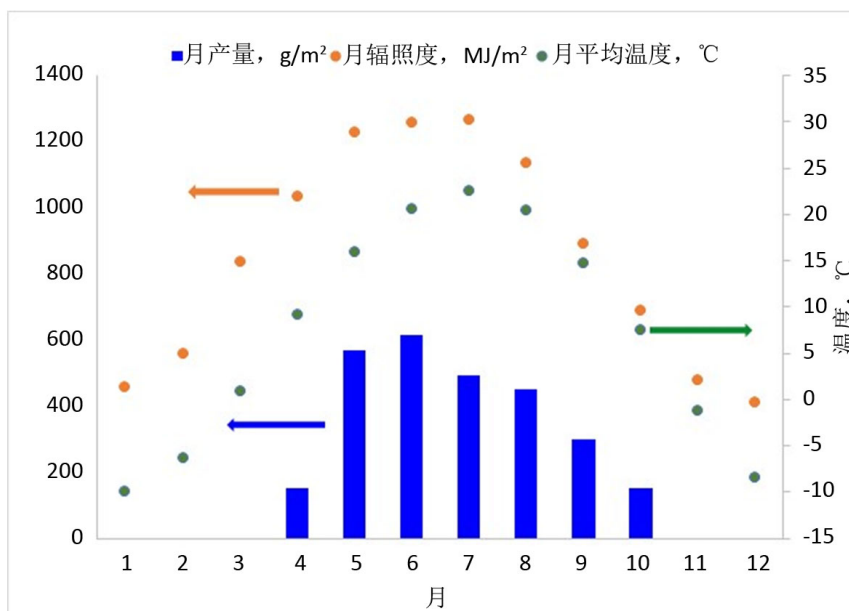


Figure 2. Monthly average of irradiation intensity, temperature and spirulina yield (Ordos)  
图 2. 月辐照强度、月平均气温与螺旋藻产量(鄂尔多斯)

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 螺旋藻固碳耦合因子交互关系

##### 3.1.1. 烟气 CO<sub>2</sub> 源与捕获净化耦合关系

高浓度 CO<sub>2</sub> 会促进光合作用而加速藻类生长, 但高浓度 CO<sub>2</sub> 会导致 pH 值降低偏离其可耐受的 pH 值范围。当高浓度 CO<sub>2</sub> 作为碳源供应微藻生长时, 由于分压较高, 溶解速率较快, 因此 pH 下降较快。螺旋藻适应碱性环境, 且碱性环境有利于防止污染。pH 值不但影响培养液中营养基质的离解程度, 而且对螺旋藻的生长、代谢乃至细胞形态都造成显著的影响。在微藻固定 CO<sub>2</sub> 过程中, 微藻光合作用吸收 CO<sub>2</sub> 导致 pH 值上升。螺旋藻对高浓度 CO<sub>2</sub> 的耐受性, 通过调节 pH 控制 CO<sub>2</sub> 供给以维持螺旋藻的高增长。

藻类对烟气 CO<sub>2</sub> 源的需求主要是控制污染物的浓度。煤电和煤化工活动排放烟气中 CO<sub>2</sub> 浓度含少量 SO<sub>x</sub> 和 NO<sub>x</sub>, 其通过降低溶液 pH 值抑制微藻正常生长。烟气中 SO<sub>2</sub> 浓度高于 60 ppm 时, 微藻生长开始受到抑制[9]。微藻生长需要氮营养源, 因此对 NO<sub>x</sub> 具有比 SO<sub>x</sub> 更好的耐受性, 但 NO<sub>x</sub> 中 NO 是 NO<sub>2</sub> 在水溶液中溶解速度的 1/5, 为防止微藻固碳过程中再次挥发, NO<sub>x</sub> 水相中溶解速度以及微藻吸收速度成为限制烟气中 NO<sub>x</sub> 浓度的因素。因此, 藻类养殖 CO<sub>2</sub> 源通常应达到 SO<sub>x</sub> ≤ 60 ppm, NO<sub>x</sub> ≤ 300 ppm。

典型燃煤电厂烟气含 CO<sub>2</sub> 10%~15%, 以及 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 和痕量重金属。典型煤化工烟气 CO<sub>2</sub> 95%~98%, 以及 CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、COS、CH<sub>3</sub>OH 和痕量重金属。这就要求捕集净化后污染物浓度降低到满足微藻生长的要求, 或净化得到食品级 CO<sub>2</sub>, 培育食品级螺旋藻。

在烟气捕获与净化技术中, 化学吸收, 物理吸附, 膜分离可分离烟气中污染物, 得到净化后满足微藻生长的 CO<sub>2</sub> 气源。依次能耗顺序[10]为膜分离 0.25~0.27 MJ/kg CO<sub>2</sub>, 物理吸附 0.58~0.66 MJ/kg CO<sub>2</sub>, 化学吸收 1.19~1.22 MJ/kg CO<sub>2</sub>, 低温分馏 2.16~2.38 MJ/kg。低温分馏可得到高纯度食品级的 CO<sub>2</sub>。

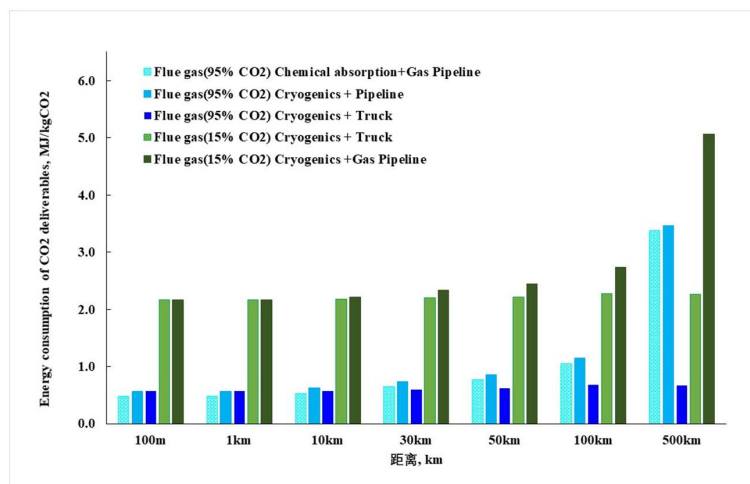
从能耗角度, 膜分离能耗低而低温分馏能耗高, 但最终产品质量与状态不同。低温技术可获得高质量液态 CO<sub>2</sub>, 而其他技术获得的是浓缩的 CO<sub>2</sub> 气体。因此, 低温分馏满足 CO<sub>2</sub> 长距离运输要求, 而其他技术适合 CO<sub>2</sub> 近距离利用。低温分馏净化能耗与初始 CO<sub>2</sub> 浓度和压力有关, 初始 CO<sub>2</sub> 浓度和压力随初始压力的增大而减小, 初始 CO<sub>2</sub> 浓度增大, 低温分馏的能耗也随之减小。因此, 低温分馏更适用于高浓度 CO<sub>2</sub> 烟气的捕集和净化。

##### 3.1.2. CO<sub>2</sub> 源与运输距离耦合关系

CO<sub>2</sub> 从捕集地输送到封存地点或使用地点, 输送方法主要有管道输送和槽车输送。运输方式的选择取决于体积负荷和 CO<sub>2</sub> 浓度以及运输距离。管道运输在长距离高容积负荷时优势明显。船舶、铁路和公路只能在较低的压力和温度下进行长距离小规模作业。CO<sub>2</sub> 管道输送可分为气态、液态、超临界以及密相状态。由于 CO<sub>2</sub> 液化后体积缩小为原来的 1/500, 而且 CO<sub>2</sub> 长距离输送时必须保持单相态以避免两相状态引起管道震动, 因此 CO<sub>2</sub> 采用液体形式输送。图 3 给出了技术上可行的 CO<sub>2</sub> 源与运输距离耦合后的能耗。高浓度烟气 CO<sub>2</sub> 净化与运输能耗小于低浓度 CO<sub>2</sub> 烟气的净化与运输。对于 15% CO<sub>2</sub> 烟气, 膜分离法与 30 km 管道输送能耗较低。运输距离超过 30 公里, 低温净化与卡车运输优势明显。耦合运输距离和净化模式, 低 CO<sub>2</sub> 浓度烟气适用于 10 km 以内现场利用。

##### 3.1.3. CO<sub>2</sub> 供给与培养反应器耦合关系

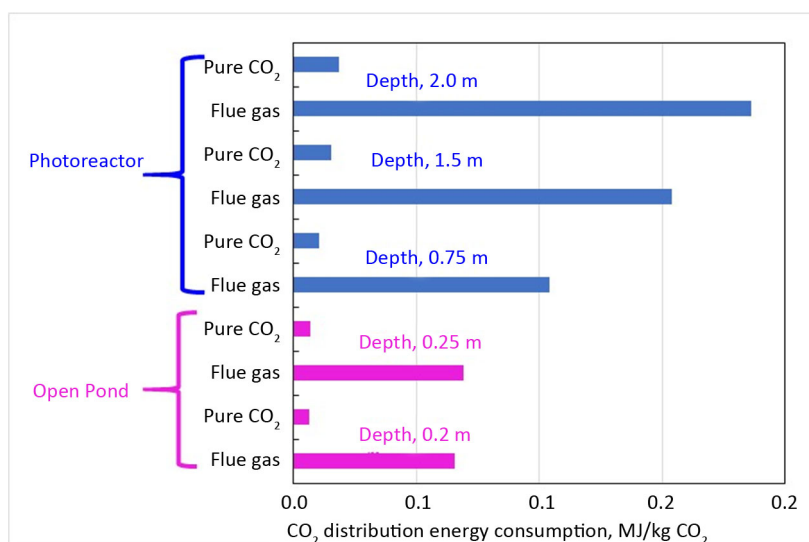
微藻培养系统可采用开放式或封闭式, 为增加 CO<sub>2</sub> 传质和吸收充足的太阳光, 反应器主要有跑道式、柱式、管式、板式、螺旋式形式。不同形式反应器采用不同搅拌方式以保持微藻和 CO<sub>2</sub> 在反应器内均匀分布, 搅拌方式有机械搅拌和非机械搅拌。机械方式多采用搅拌浆, 优点是能耗低, 但只适用于浅层跑道池, 其能耗需求与反应器体积和藻类密度成正比。由于藻类密度通常控制在 2% 左右, 其与水的搅拌能



**Figure 3.** Energy consumption coupling CO<sub>2</sub> source and transportation distance  
**图 3.** CO<sub>2</sub> 源与运输距离耦合能耗

耗相当。开放式跑道池反应器结构简单，成本低且易实现规模化，但光能利用效率、产率低。非机械类型主要适用于密闭式反应器，通过压缩的 CO<sub>2</sub> 气体曝气方式实现高效传质而且对藻类细胞破坏性低。密闭式反应器结构较复杂，成本高不易实现规模化，但光能利用效率和产率较高。

CO<sub>2</sub> 供给方式与 CO<sub>2</sub> 源及生物反应器类型和深度有关。图 4 列出了能耗与三种形式 CO<sub>2</sub> 气源和反应器深度的关系。非机械生物反应器，烟气 15% CO<sub>2</sub> 深度 0.75 m 时能耗 0.104 MJ/kg，深度 2 m 时能耗 0.186 MJ/kg，在机械生物反应器中，深度 0.25 m 能耗为 0.069 MJ/kg。对于 99.5% CO<sub>2</sub>，深度 0.25 m 能耗为 0.007 MJ/kg。无论是开放式还是密闭式，随着反应器深度增加能耗增加，随烟气中 CO<sub>2</sub> 源浓度的增加能耗下降。



**Figure 4.** Energy consumption in distribution coupling CO<sub>2</sub> source and bioreactor  
**图 4.** CO<sub>2</sub> 源及反应器类型对 CO<sub>2</sub> 供给能耗的影响

### 3.1.4. 营养盐投入与微藻蛋白含量耦合关系

螺旋藻产率与微藻中碳含量的乘积为 CO<sub>2</sub> 微藻固碳效率，因此增加产率和微藻中碳含量将会增加固碳效率。氮和磷是螺旋藻代谢过程的重要元素，合适配比的氮、磷在提高螺旋藻生物量和组成分布上有



重要影响。高氮培养不仅提高生长率，而且提高螺旋藻中蛋白含量。低氮培养会降低生长率但会提高脂肪含量，这是由于当氮浓度不足以激活代谢途径中满足生长所需要的蛋白，光合作用中过量的碳就以甘油三酯或淀粉形式储存。磷主要以聚磷酸盐形式参与代谢过程。但增加氮营养盐导致藻类固碳能耗的增加，这是因为氮营养盐主要来自高能耗的合成氨工艺。以藻类为保健品培养时，为保持较高蛋白质水平，必须增加营养源中氮含量。增加蛋白含量导致营养盐消耗增加，进而导致微藻固碳间接能量消耗的增高。蛋白含量与营养盐导致的间接能耗关联关系见图 5。藻浆为产品时，蛋白质浓度为 65.3%，营养盐能耗占总能耗 94%，蛋白质为 24.1% 占总能耗 13.5%，蛋白质浓度 10% 总能耗 2.41%。当蛋白浓度低于 15% 时，氮、磷营养盐需求引起的间接能耗维持在较小的水平，而当蛋白浓度高于 15% 时，蛋白含量与间接能耗成线性增长关系。

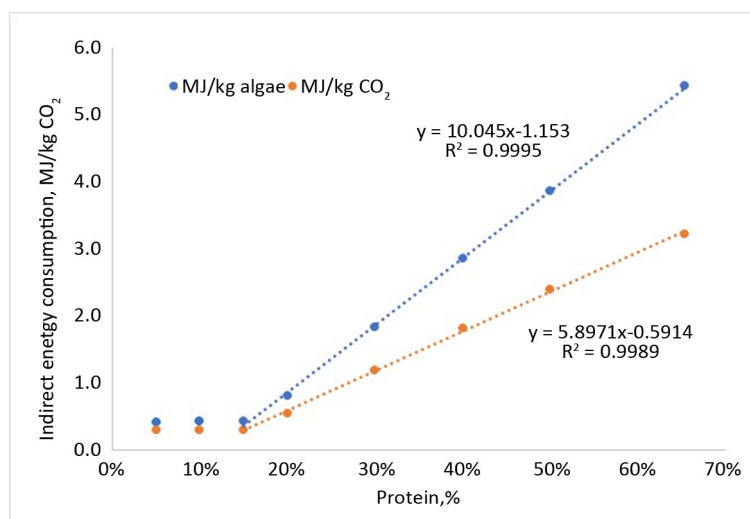


Figure 5. Indirect energy consumption of nutrients related with protein concentration in algae

图 5. 蛋白含量与营养盐间接能耗的关联关系

### 3.1.5. 辐射、温度与生长率耦合关系

光强对螺旋藻生长影响主要是通过影响藻胆体捕光色素合成及其构成比例来实现的。入射光在穿透微藻培养液时强度衰减，光沿入射方向上的衰减量与螺旋藻浓度及光程呈指数降低[11]。微藻自身遮蔽现象导致培养后期微藻光利用率降低，限制了其光合效率。光强增强可促进光合作用，但当光强超过其光饱和强度时，一定程度会产生光抑制和生物损伤。在适宜温度和营养供应充分条件下，大规模培养中，微藻细胞对自然光吸收和利用效率将是限制微藻高密度培养的主要因素。

温度对藻类生长和代谢有重要影响。螺旋藻其适宜温度范围为 15℃~26℃。此外，温度变化也影响 CO<sub>2</sub> 在水中溶解度和存在形式。培养基保持在较低温度，增加 CO<sub>2</sub> 在水中溶解度促进藻类生长。在达到最佳温度峰值之前，微藻固碳量随温度升高而增加。通常温度越高，电子传递效率越高，修复机制越活跃，有助于藻类呼吸和光合作用。较高温度虽提高代谢速率而且 HCO<sub>3</sub><sup>3-</sup> 在高温环境下脱水产生 CO<sub>2</sub>，但总体上降低了 CO<sub>2</sub> 在水体系中的溶解度。温度超过峰值后，随温度升高微藻固碳量下降。温度峰值与光照强度影响是相互耦合共同作用的。低温条件下螺旋藻对光胁迫具有较高敏感性，这与受损蛋白合成速率降低有关。当温度高于最佳温度时，藻类受到破坏是由于产生较多的热休克蛋白导致光合效率下降。

为探究环境因子对螺旋藻培养过程的综合影响，以实际规模化培养基地 180 天运行数据分析温度、光照对生长率影响的规律。将依赖外界环境的因素分为温度因子和辐照因子。辐照因子定义根据辐照量

的比值，即日辐照强度与日辐照时间的乘积与统计 180 天中最大日辐照量的比值作为辐照因子，见公式(1)。

$$R_{\text{有效辐照因子}} = \text{辐照强度}(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{h}) * \text{辐照时间}(\text{h}) / \text{日最大辐照量}(\text{W}/\text{m}^2) \quad (1)$$

温度因子根据 180 天统计中由于环境温度导致的生长量的变化，回归得到由于温度引起的微藻产量变化见公式(2)。回归方程显示螺旋藻最佳生长温度为 17.36℃。

$$T_{\text{温度因子}} = -0.0025(T_{\text{日平均温度}}^{\circ\text{C}} - 17.36^{\circ\text{C}})^2 + 0.79 \quad (2)$$

根据温度因子与辐照因子，通过回归得到环境综合因子(公式 3)，并得到环境因子为 1 时的最大产量 33.6 g/m<sup>2</sup>·d。

$$\text{环境综合因子} = \text{有效辐照因子}1.2 * \text{温度因子} \quad (3)$$

根据环境综合因子表达式可得到螺旋藻产量预测公式：

$$\text{产量}(\text{kg}/\text{a}) = 33.6 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{d} * \text{环境综合因子} * \text{面积} * \text{天数} \quad (4)$$

根据预测公式，耦合环境因子其预测的常量与实际产量的误差在 5%以内，见图 6。

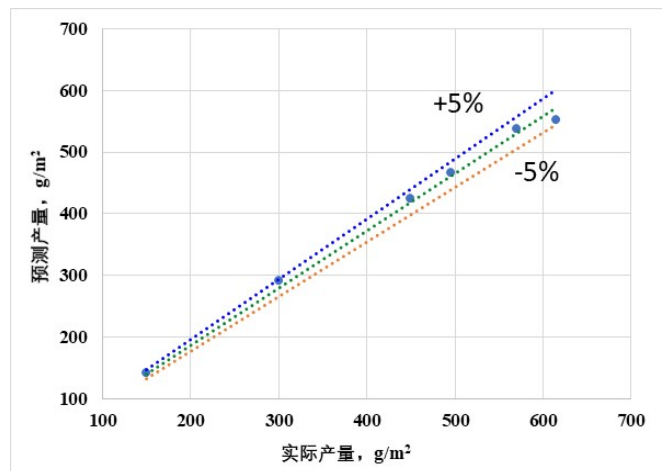
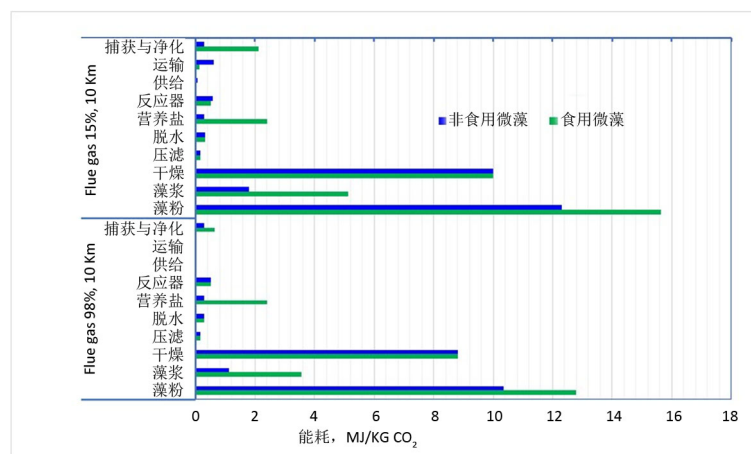


Figure 6. Simulation and actual yield of spirulina  
图 6. 螺旋藻预测产量与实际产量

### 3.2. 螺旋藻固碳规模化养殖系统优化

针对两种典型烟气分别采用食用微藻固碳和非食用微藻固碳的能耗，见图 7。对于非食用微藻固碳，原料气采用脱硫、脱痕量金属的捕获与净化工艺，得到气体 CO<sub>2</sub> 源，其中燃煤电厂烟气 CO<sub>2</sub> 浓度 15%，煤化工烟气 CO<sub>2</sub> 浓度 98%，不满足远距离管线运输技术要求，运输距离设定为 10 km。对于食用微藻固碳，原料气采用冷凝方法净化到食用标准 CO<sub>2</sub>，其可以实现远距离管线运输和槽车运输。为与非食用微藻固碳技术进行比较，运输距离也设定为 10 km，二氧化碳运输效率均设定为 99%。

微藻固碳采用倒式旋流二氧化碳曝气方式增强二氧化碳传质效率并降低挥发量。通过双重缓释方法 (NaHCO<sub>3</sub>/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>/Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) 控制微藻培养的 pH 值及 CO<sub>2</sub> 浓度，以保证微藻处于高效固碳培养环境，CO<sub>2</sub> 吸收效率 75%~90%。虽然培养基中营养物质浓度通常高于藻类的浓度，但由于水循环利用，氮、磷营养盐补充依据微藻吸收量，并增加 5% 由于挥发过程导致的氮营养盐损失。混凝沉淀脱水采收，压滤脱水得到螺旋藻浆，进一步喷雾干燥得到螺旋藻粉。



**Figure 7.** Energy consumption of typical flue gas algal fixation in whole life cycle  
**图 7.** 典型烟气全生命周期螺旋藻固碳能耗

对于两种典型烟气，无论是培育食用微藻还是非食用微藻，煤化工高浓度烟气其固碳能耗都低于燃煤电厂的固碳能耗。由于 CO<sub>2</sub> 捕集与净化能耗随初始浓度降低成指数关系增加，而且运输能耗在相同运输距离随浓度降低能耗升高，其主要能耗差异单元体现在捕获净化与运输阶段。煤化工高浓度烟气其非食用微藻与食用微藻全生命周期能耗相差 2.43 MJ/kg CO<sub>2</sub>，而燃煤电厂低浓度烟气其非食用微藻与食用微藻全生命周期能耗相差 3.33 MJ/kg CO<sub>2</sub>。从图中可以看出，微藻藻粉产品比藻浆能耗提高了 8.8~10.0 MJ/kg CO<sub>2</sub>，说明藻浆的直接利用将显著降低微藻固碳的整体能耗。

### 3.3. 螺旋藻固碳与二氧化碳封存技术能耗分析

CO<sub>2</sub> 封存主要有海上封存和陆地封存。海洋封存是将排放源捕集运输到海港，通过轮船或管道输送到 3000 m 深海中，利用海底沉积层封存。地质封存是将超临界状态 CO<sub>2</sub> 注入地质结构中石油或天然气储层、咸水层、煤层等。封存在海水中 CO<sub>2</sub> 遇到温度压力波动或洋流变化可从海水中逃逸，海水表面 CO<sub>2</sub> 浓度增大将改变海洋化学特征。封存在地下的 CO<sub>2</sub> 在咸水层中流动，其固化能力以及在地下咸水层中稳定封存与环境的影响还需要进一步探索。无论海洋封存还是地质封存，在理论上潜力较大，但是仍存在诸如安全与封存时间与稳定性问题。

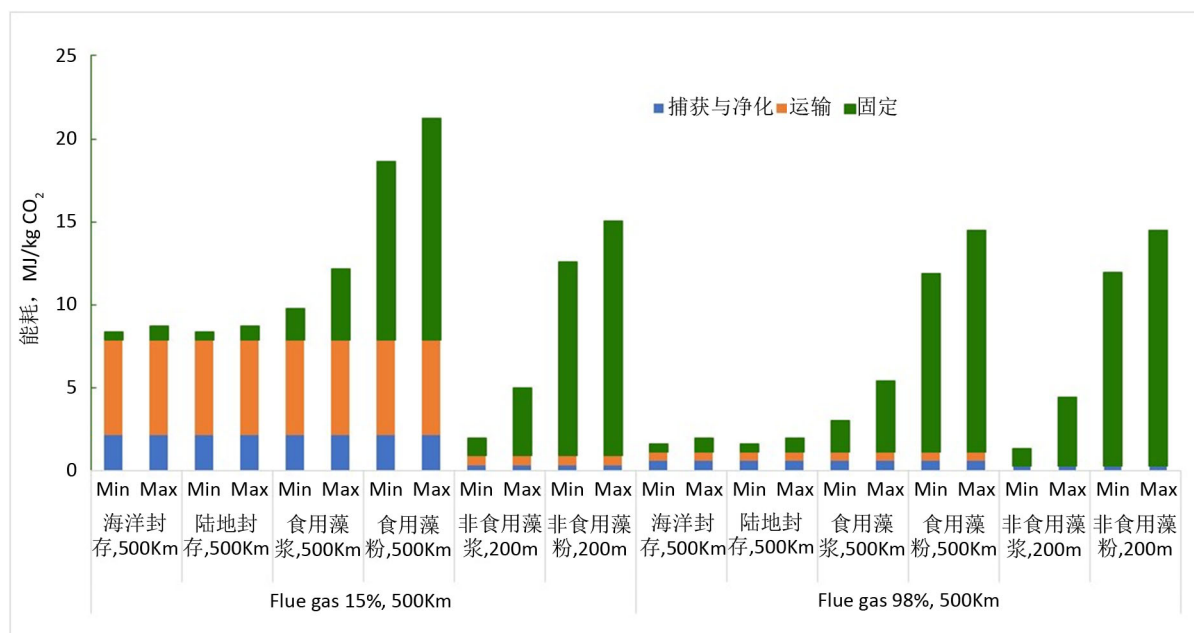
基于 CCUS 模型，模拟两种典型烟气螺旋藻固碳与海洋封存、陆地封存全生命周期能耗，见图 8。两种典型烟气，培育食用微藻在能耗上与其他封存技术相比没有优势。但非食用微藻的藻浆不论是固定低浓度 CO<sub>2</sub> 的燃煤电厂烟气还是煤化工的高浓度 CO<sub>2</sub>，其能耗优势明显。对于低浓度 CO<sub>2</sub> 的燃煤电厂烟气由于可以实现近距离的固定，在捕获与净化、运输上都显著节省了能耗。而封存技术由于远距离运输条件的约束，导致低浓度 CO<sub>2</sub> 的燃煤电厂烟气封存能耗较高。

## 4. 结论

燃煤电厂烟气与煤化工烟气，食用螺旋藻固碳在能耗上与封存技术相比没有优势，但非食用螺旋藻浆固碳能耗优势明显。增加螺旋藻蛋白含量将增加营养盐消耗，进而导致增高了微藻固碳间接能量的消耗。当蛋白浓度高于 15% 时，蛋白含量与间接能耗成线性增长关系。

对于低浓度燃煤电厂烟气由于可以实现近距离固定，在捕获与净化、运输上都显著节省了能耗。高浓度烟气 CO<sub>2</sub> 净化与运输能耗小于低浓度 CO<sub>2</sub> 烟气的净化与运输，低浓度 CO<sub>2</sub> 烟气适用于 10 km 以内固碳利用。





**Figure 8.** Energy consumption of total life cycle in algal fixation, terrestrial sequestration, ocean sequestration  
**图 8.** 螺旋藻固碳与海洋封存、陆地封存的全生命周期能耗

通过实际规模化培养基地 180 天运行数据得到了温度、光照对螺旋藻生长率影响的规律，依此建立了螺旋藻产量预测模型，误差小于 5%。

## 致谢

感谢国家高技术重点研发项目支持，感谢蒙加力有限公司为本研究提供的微藻培育数据。

## 基金项目

国家高技术重点研发项目(2016YFB0601004)。

## 参考文献

- [1] Aiello, G., Li, Y.C., Boschin, G., Bollati, C., Arnoldi, A. and Lammi, C. (2019) Chemical and Biological Characterization of Spirulina Protein Hydrolysates: Focus on ACE and DPP-IV Activities Modulation. *Journal of Functional Foods*, **63**, Article ID: 103592. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103592>
- [2] Chen, H.P., Zeng, F., Li, S.M., Liu, Y.L., Gong, S.Y., Lv, X.C., Zhang, J.C. and Liu, B. (2019) Spirulina Active Substance Mediated Gut Microbes Improve Lipid Metabolism in High-Fat Diet Fed Rats. *Journal of Functional Foods*, **59**, 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.04.049>
- [3] Khoo, H.H. and Tan, R.B.H. (2006) Life Cycle Investigation of CO<sub>2</sub> Recovery and Sequestration. *Environmental Science & Technology*, **40**, 4016-4024. <https://doi.org/10.1021/es051882a>
- [4] Liu, Z.Y., Liu, C.Z., Han, S.J. and Yang, X.Y. (2020) Optimization Upstream CO<sub>2</sub> Deliverable with Downstream Algae Deliverable in Quantity and Quality and Its Impact on Energy Consumption. *Science of the Total Environment*, **709**, Article ID: 136197. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136197>
- [5] Mehar, J., Shekh, A., Nethravathy, M.U., Sarada, R., Chauhan, V.S. and Mudliar, S. (2019) Automation of Pilot-Scale Open Raceway Pond: A Case Study of CO<sub>2</sub>-Fed pH Control on Spirulina Biomass, Protein and Phycocyanin Production. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **33**, 384-393. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.07.006>
- [6] Packer, M. (2009) Algal Capture of Carbon Dioxide; Biomass Generation as a Tool for Greenhouse Gas Mitigation with Reference to New Zealand Energy Strategy and Policy. *Energy Policy*, **37**, 3428-3437. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.12.025>
- [7] Rajak, U., Nashine, P. and Verma, T.N. (2019) Assessment of Diesel Engine Performance Using Spirulina Microalgae

- 
- Biodiesel. *Energy*, **166**, 1025-1036. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.098>
- [8] Sengupta, S., Koley, H., Dutta, S. and Bhowal, J. (2018) Hypocholesterolemic Effect of *Spirulina Platensis* (SP) Fortified Functional Soy Yogurts on Diet-Induced Hypercholesterolemia. *Journal of Functional Foods*, **48**, 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.07.007>
- [9] Singh, H.M., Kothari, R., Gupta, R. and Tyagi, V.V. (2019) Bio-Fixation of Flue Gas from Thermal Power Plants with Algal Biomass: Overview and Research Perspectives. *Journal of Environmental Management*, **245**, 519-539. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.043>
- [10] Zhao, B.T. and Su, Y.X. (2014) Process Effect of Microalgal-Carbon Dioxide Fixation and Biomass Production: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **31**, 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.054>
- [11] 曾文炉, 李浩然, 蔡昭铃, 欧阳藩. 螺旋藻细胞培养与光能利用的关系[J]. 植物资源与环境学报, 2001(3): 7-10.