

徐少琨,张峰,向文洲,等. 微藻应用于煤炭烟气减排的研究进展[J]. 地球科学进展,2011,26(9): 944-953. [ Xu Shaokun, Zhang Feng, Xiang Wenzhou, et al. Progress in the study of removal from coal fired flue gas by microalgae[J]. Advances in Earth Science,2011,26(9):944-953. ]

## 微藻应用于煤炭烟气减排的研究进展\*

徐少琨<sup>1,2</sup>,张峰<sup>1,2</sup>,向文洲<sup>1</sup>,吴园涛<sup>3</sup>,任小波<sup>3\*</sup>

(1. 中国科学院海洋生物资源可持续利用重点实验室,中国科学院南海海洋研究所,广东 广州 510301;  
2. 中国科学院研究生院,北京 100049; 3. 中国科学院资源环境科学与技术局,北京 100864)

**摘要:**长久以来,我国因煤炭燃烧产生的大量 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、烟尘等对生态环境造成了严重危害,煤炭烟气的减排也愈来愈受到重视,利用微藻进行烟气减排正逐渐成为研究热点。主要介绍了微藻固碳和减排生理机制等相关理论基础,阐述了微藻藻种筛选驯化、光生物反应器等减排关键技术研究进展,阐述了国内外微藻煤炭烟气减排应用现状,探讨了微藻烟气减排技术规模化应用存在的问题和发展趋势。

**关键词:**微藻;煤炭;烟气减排;CO<sub>2</sub>;固碳

中图分类号:X701.7

文献标志码:A

文章编号:1001-8166(2011)09-0944-10

### 1 引言

近年来,日益加剧的温室效应和环境污染对人类的生存和发展构成了严重威胁,其中主要原因之一就是 CO<sub>2</sub> 等温室气体的无节制排放。截至 2008 年,全球源于化石燃料燃烧的 CO<sub>2</sub> 排放量达到 293.81 亿 t,而煤炭作为主要能源之一,每年燃烧产生的 CO<sub>2</sub> 占排放总量的 42.9%<sup>[1]</sup>。国际能源机构 2011 年 5 月 30 日宣布,2010 年全球 CO<sub>2</sub> 排放量达到 306 亿 t,创历史新高。在能源消费以煤为主的中国,来自煤炭燃烧的 CO<sub>2</sub> 更超过了总排放量的 80%;除了 CO<sub>2</sub>,煤炭烟气还是大气中 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、烟尘等有害成分的主要来源,产生的煤烟型污染日益严重。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)的数据,所有能源中煤炭的碳排放系数最大<sup>[2]</sup>,即产生单位能源,煤排放的 CO<sub>2</sub> 最多。另外,全国煤炭的消耗有近一半集中在电力生产行业,煤电作为 CO<sub>2</sub> 排放大而集中的固定排放源,减排空间巨大。

目前,对工业排放的废气中 CO<sub>2</sub> 的净化处理主要有永久性固化储存(CCS)和资源化利用 2 种途径。前者将 CO<sub>2</sub> 捕集、压缩后深埋入地下封存并用于油气资源的开采;后者则是把 CO<sub>2</sub> 收集吸收后用于生产饮料、化工原料、燃料等产品<sup>[3]</sup>。微藻可通过光合作用固定大量 CO<sub>2</sub> 并用于自身生长和繁殖,相比其他物理化学方法,应用于煤炭烟气减排具有独特的优势:微藻生长周期短、光合效率高,CO<sub>2</sub> 固定效率高,一定条件下可达陆生植物的 10 倍以上<sup>[4]</sup>,不仅可以减少 CO<sub>2</sub> 排放,同时也降低了培养成本;除 CO<sub>2</sub> 外,废气中的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等成分也随着微藻的代谢被净化处理<sup>[5]</sup>,有效减少有害气体排放;微藻含油量高,还可积累多种活性物质(蛋白、多糖、色素等),开发潜力大<sup>[6]</sup>;环境适应能力强,可在滩涂、盐碱地等区域进行养殖,开放式培养模式较为成熟。近年来,国内外都已展开大量相关理论和应用研究。本文将系统阐述当前微藻应用于煤炭烟气减排开发的现状和发展趋势,为我国有关技术的研

\* 收稿日期:2011-02-25;修回日期:2011-06-20.

\* 基金项目:海洋公益专项经费项目“电厂废气联产微藻生物柴油研究与示范”(编号:201005031-5);广东科技计划项目“电厂废气的微藻减排技术研究”(编号:2009B080701093)资助.

作者简介:徐少琨(1988-),男,江西宜春人,硕士研究生,主要从事微藻生物技术研究. E-mail:xsskkk@163.com

\* 通讯作者:任小波(1971-),男,四川合江人,副研究员,主要从事大气海洋科研管理研究. E-mail:xbren@cashq.ac.cn

究和开发提供参考。

## 2 微藻烟气减排的理论研究进展

微藻对  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等有害物质的吸收和代谢是应用于节能减排的生理基础,因此相关机制的研究对微藻减排技术的开发和应用有着重要的理论指导意义。

### 2.1 微藻固碳的生理机制研究进展

微藻是一类具高效固碳能力的光合自养生物,能够利用光能驱动核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(Rubisco)固定  $\text{CO}_2$ ,作为碳源进入卡尔文循环进行生物合成。微藻减排正是利用了这一生理特性将烟气中大量的  $\text{CO}_2$  吸收固定,减少污染同时也降低培养成本。研究发现,微藻中 Rubisco 同时具有羧化和氧化活性,需高浓度  $\text{CO}_2$  环境,是决定光合速率的限速酶之一。水生藻类所处环境通常无机碳(包括  $\text{CO}_2$  和  $\text{HCO}_3^-$ ) 浓度很低且时常波动,水中  $\text{CO}_2$  扩散速度较空气中要慢得多,为了保证 Rubisco 固碳所需的高浓度  $\text{CO}_2$  环境,微藻进化出了多种无机碳浓缩机制( $\text{CO}_2$ -Concentration Mechanism, CCM)以提高光合反应速率<sup>[7]</sup>。

CCM 机制广泛存在于光合细菌、蓝藻、真核藻类、大型藻中<sup>[8]</sup>,都可将外界无机碳吸收、浓缩并提供给 Rubisco,但在不同生物之间具体机制略有不同。在蓝藻中,无机碳通过主动运输等方式被吸收,并以  $\text{HCO}_3^-$  的形式在胞内储存和转运,由于质膜对  $\text{HCO}_3^-$  通透性低,可积累到很高浓度。而羧酶体(Carboxysome),包含着蓝藻中几乎所有的 Rubisco 和碳酸酐酶(CA),催化  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{CO}_2$  之间的相互转化达到平衡,由高浓度的  $\text{HCO}_3^-$  形成高浓度的  $\text{CO}_2$  供 Rubisco 利用,在羧酶体、质膜中都有防止  $\text{CO}_2$  泄露的保护机制<sup>[9,10]</sup>。真核微藻中 CCM 的作用和机理与蓝藻类似,但由于本身结构更加复杂,出现了叶绿体、蛋白核等细胞器,其 CCM 运行机制也更为复杂和多样。蛋白核(Pyrenoid)被认为是和羧酶体具有类似结构和功能的细胞器,在碳浓缩中起重要作用;同时,叶绿体本身也能进行无机碳的浓缩<sup>[11]</sup>,如莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*),可依靠光激活的电子传递链在类囊体膜内外建立 pH 梯度,使 Rubisco 周围环境酸化,有利于无机碳以  $\text{CO}_2$  的形式存在,同时依赖于  $\text{HCO}_3^-$  转运系统和能够快速将  $\text{HCO}_3^-$  转化为  $\text{CO}_2$  的碳酸酐酶,有效提高  $\text{CO}_2$  浓度<sup>[12]</sup>;此外,CCM 还涉及质膜、细胞骨架等多个部位<sup>[13]</sup>,在海洋硅藻(*Thalassiosira weissflogii*)中发现

有类似  $\text{C}_4$  途径的 CCM 机制<sup>[14]</sup>。大量研究表明,微藻通过多种无机碳吸收和转运系统来完成  $\text{CO}_2$ 、 $\text{HCO}_3^-$  从细胞外到 Rubisco 的浓缩,是微藻高效固碳最为关键的生理基础之一,对利用微藻固碳的应用具有重要理论指导意义。

一些微藻,随着其光合生长,经 CCM 途径,培养液的无机碳( $\text{HCO}_3^-$ ) 被不断吸收利用,水体中 pH 逐渐升高,即出现 pH 漂移现象<sup>[15,16]</sup>,如部分蓝藻、绿藻在生长后期水体逐渐高碱化,这种固碳的附加效应不仅可以帮助耐高碱的藻类在生存竞争中获得优势<sup>[17]</sup>,同时碱性条件也有利于烟气中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$  等酸性气体在培养液中的溶解,并使其以酸根离子的形式存在,可有效避免烟气的逃逸,此外,pH 漂移刚好可平衡烟气补充对培养液的酸化,使培养物的 pH 在烟气不断添加的情况下维持生长适宜的范围,因此这一特性成为该类微藻应用于烟气减排的重要生理基础,藻种的 pH 漂移越快、耐碱能力越强,其应用于烟气减排的性能越好。减排微藻的这一特性在烟气减排中的应用潜力在后文还将进一步论述。

### 2.2 微藻吸收 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 的研究进展

煤炭烟气中所含  $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$  是危害大气的主要污染源之一,微藻对这些有害成分的耐受性和清除效果是烟气减排研究的重要部分。

微藻对烟气具有生理敏感性,其中适宜浓度的  $\text{CO}_2$  等可以明显提高其生长速率<sup>[18]</sup>, $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$  等酸性气体通过对 pH 的影响也对微藻生长有显著影响。 $\text{SO}_2$  是  $\text{SO}_x$  中主要污染成分,溶于水后以  $\text{HSO}_3^-$ 、 $\text{SO}_3^{2-}$  形式存在,研究证明, $\text{SO}_3^{2-}$  可降低植物的光合作用,增加其氧化损伤,降低叶绿素含量,使植物叶片出现脱绿漂白现象<sup>[19]</sup>,对微藻也有类似作用,如盐藻(*Dunafialla safina*) 在较高浓度  $\text{SO}_3^{2-}$  中可产生明显的光抑制作用,叶绿素活性明显下降<sup>[20]</sup>。在生物体中广泛存在的一种含铜蛋白酶,亚硫酸盐氧化酶(Sulfite Oxidases, SOs),可催化  $\text{SO}_3^{2-}$  氧化为  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $\text{SO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ ),参与硫代谢并能维持氧化还原平衡,解除过量的亚硫酸盐毒害<sup>[21]</sup>,目前在小球藻(*Chlorella vulgaris*)、莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)<sup>[22]</sup>、球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)等多种微藻中都已发现该蛋白存在<sup>[22,23]</sup>;Rabinowitch 等<sup>[24]</sup> 研究证明,小球藻(*Chlorella sorokiniana*) 处在较高浓度的  $\text{SO}_3^{2-}$  环境中叶绿素含量明显下降,同时超氧化物歧化酶(SOD)含量增加明显,以对抗因  $\text{SO}_3^{2-}$  氧化产生的氧自由基;Cas-

tenholz 等<sup>[25]</sup>对颤藻的研究表明,  $\text{SO}_3^{2-}$  可减缓 DCMU 对光合作用的抑制, 提供电子进入光合电子传递链, 因此在低浓度时对生长有促进作用。已用于烟气减排研究的微藻多为绿藻和蓝藻。这些藻不仅可在高浓度  $\text{CO}_2$  条件下快速生长, 还具有耐高温、耐  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等气体的特性。如岳丽宏等<sup>[26]</sup>筛选出的小球藻 ZY-1 (*Chlorella* ZY-1), 可耐受含  $50 \times 10^{-6}$  (v/v)  $\text{SO}_2$  的废气, 若将 pH 控制在 6.0 以上还可耐受更高, 研究还显示  $\text{SO}_2$  溶解造成的 pH 下降对藻类的影响比亚硫酸盐的毒害更大; 韩国学者 Lee 等<sup>[27]</sup>的研究也显示小球藻 (*Chlorella* sp. KR-1) 可在充入  $60 \times 10^{-6}$  (V/V)  $\text{SO}_2$  废气的环境中生长, 但固碳速率有所降低; 除小球藻外, 布朗葡萄藻 (*Botryococcus braunii*) 也可耐受至少含 1.0 mmol/L  $\text{HSO}_3^-$  的环境<sup>[28]</sup>。

氮氧化物是煤炭烟气中的另一种主要污染物, 主要成分为 NO 和  $\text{NO}_2$ , 而其中 NO 约占氮氧化物总量的 90% 以上<sup>[29]</sup>。NO 在水中溶解性很小, 能被微藻吸收的量较小, 但  $\text{O}_2$  存在时, 依然可以被高效去除。Nagase 等<sup>[30]</sup>的研究表明, 在充入气体中含 2%  $\text{O}_2$  时, 杜氏盐藻 (*Dunaliella tertiolecta*) 对 NO 去除率可达 65%, 15 天连续培养中杜氏盐藻可保持 50% ~ 60% 的去除效率<sup>[31]</sup>。Yoshihara 的研究中海藻株 NOA-113 对 NO 去除速率可达 40 mg/d, 而用含  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  的混合气体进行小球藻 (*Chlorella* sp. KR-1) 培养的研究也显示, 当充入气含有  $100 \times 10^{-6}$  (v/v) NO 时小球藻仍可保持旺盛生长<sup>[27]</sup>。Doucha 等<sup>[32]</sup>通过研究发现小球藻 (*Chlorella* sp.) 对  $\text{NO}_x$  等有害物质具有相当耐受性, 以含 30.0 mg/m<sup>3</sup>  $\text{NO}_x$ 、3.45 mg/m<sup>3</sup> CO 的烟气培养小球藻 (*Chlorella* sp.), 培养效果与只充入  $\text{CO}_2$  无明显差异。NO 的水溶性较差, 但微藻之所以能达到吸收去除烟气中 NO 的目的, 原因就在于 NO 易于与  $\text{O}_2$  反应生成  $\text{NO}_2$ , 该反应虽为可逆, 但在常温下逆向反应难以发生, 加上  $\text{NO}_2$  较易溶于碱性藻液, 同时  $\text{O}_2$  供应充足, NO 可以大量转化为  $\text{NO}_2$  并以  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$  形式溶于培养液中。另外, 也有小部分 NO 以扩散形式直接进入藻细胞内, 作为一种重要的信号分子参与微藻胞内多种代谢调控<sup>[33]</sup>, 如抗氧化<sup>[34]</sup>、氨基酸代谢<sup>[35]</sup>等, 可能会对烟气处理中的藻细胞生理作用产生影响, 进而影响烟气处理效果。

### 3 微藻减排关键技术研究进展和应用

#### 3.1 减排藻种的选育

要利用微藻进行煤炭烟气减排, 优良的藻种是

最关键的一环。相比于空气中 0.03% ~ 0.06% 的  $\text{CO}_2$  浓度, 工业排放的煤炭烟气含  $\text{CO}_2$  10% ~ 20%, 同时还有  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、烟尘等有害物质和高温等危害因素, 烟气的冷却和污染物的去除将大幅增加技术性成本, 如能找到生长快速、耐高温, 同时可在含高浓度  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 、烟尘等有害物质的环境中生长的微藻, 将可直接处理工业排放的烟气, 大大简化操作, 节约成本。此外, 所选藻类还应有开发生物柴油、色素、多糖、蛋白等产品的潜力, 增加技术的经济可行性。从 20 世纪 80 年代开始, 已有不少具减排潜力的优良藻种被选育出来(表 1)。

目前用于烟气减排的微藻多为绿藻、蓝藻等生长快、光合效率高的种类, 其中小球藻对烟气耐受性较好, 且生长迅速, 被广泛用于烟气减排的研究。岳丽宏等<sup>[26]</sup>筛选出的 *Chlorella* ZY-1 可在 25 °C、10% ~ 15%  $\text{CO}_2$  环境中保持旺盛生长, 同时还可直接耐受  $50 \times 10^{-6}$  (v/v)  $\text{SO}_2$  和  $300 \times 10^{-6}$  (v/v) NO, 若将 pH 控制在 6.0 则  $\text{SO}_2$  的存在对小球藻 ZY-1 的生长几乎没有影响。ZY-1 对以  $\text{V}_2\text{O}_5$ 、NiO、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等为主要成分的溶解性烟尘也具有相当耐受性, 在 0.2 g/L 浓度时仍可快速生长, 对于通常烟气中所含的 50 mg/m<sup>3</sup> 溶解性烟尘, 小球藻 ZY-1 完全可以适应<sup>[26,40,41]</sup>。Sung 等<sup>[42]</sup>从火电厂附近水样中筛选出一株可耐受高浓度  $\text{CO}_2$  的绿藻 (*Chlorella* KR-1), 25 °C 连续充气培养, 在充入 10%  $\text{CO}_2$  时生长最快, 产率为 0.667 g/(L·d),  $\text{CO}_2$  浓度为 30%、50% 时仍能快速生长, 该藻株模拟煤炭烟气试验可耐受 10% ~ 15%  $\text{CO}_2$ 、 $60 \times 10^{-6}$  ~  $100 \times 10^{-6}$  (v/v)  $\text{SO}_2$ 、 $100 \times 10^{-6}$  (v/v) NO, 生物量产率可达到 0.87 ~ 1.24 g/(L·d), 进一步通过柴油烟气补加  $100 \times 10^{-6}$  (v/v)  $\text{SO}_2$  模拟煤炭烟气, 进行烟气直接处理, 生物量产率达到 0.71 g/(L·d)<sup>[27]</sup>。印度 Fulke 等<sup>[43]</sup>从富含碳酸盐的地区筛选具有减排潜力的藻种, 经过低碳源、高温培养的筛选, 得到的小球藻 (*Chlorella* sp.) 可耐受 33 °C、15%  $\text{CO}_2$  的环境, 在含 3%  $\text{CO}_2$  气体充入时生长最快, 产量达 0.322 g/(L·d), 培养 7 d 总脂积累达 0.161 g/L, 都明显高于充入空气(含  $\text{CO}_2$  0.03%) 培养时的 0.190 g/(L·d) 和 0.145 g/L。具有生长快、耐极端环境的蓝藻也是用于减排的候选者之一。Hsueh 等<sup>[44]</sup>从台湾温泉中分离到的一株蓝藻 (*Thermosynechococcus* sp. CL-1) 具有耐高温、高浓度  $\text{CO}_2$  的特性, 在 55 °C 时生长最为旺盛。充入气体含 10%  $\text{CO}_2$  时达到最大比生长速率 2.7 d<sup>-1</sup>,  $\text{CO}_2$  浓度增加至 20% 时由于 pH 降低使生长受到抑制, 但在

表1 部分用于烟气减排研究的微藻

Table 1 Part of microalgae used in research on flue gas emission mitigation

藻种	烟气浓度	烟气流速 /(V/V)*	温度/°C	pH	光照	产率 /g dw/(L·d)	培养方式
小球藻 <i>Chlorella</i> sp. KR-1 <sup>[27]</sup>	10% ~ 15% CO <sub>2</sub> , 60×10 <sup>-6</sup> ~ 100 × 10 <sup>-6</sup> SO <sub>2</sub> , 100 ×	0.5	25	5.2 ~ 7	450 μmol/(m <sup>2</sup> ·s)	0.78 ~ 1.24	室内玻璃洗瓶 培养
小球藻 <i>Chlorella</i> sp. <sup>[32]</sup>	10 <sup>-6</sup> NO 6% ~ 8% CO <sub>2</sub> , 33.6 ×	0.57	32	7.0	太阳光	3.23 ~ 3.80	开放式薄层培 养
小球藻 <i>Chlorella</i> ZY-1 <sup>[26]</sup>	10 <sup>-6</sup> NO 10% ~ 15% CO <sub>2</sub> , 50×10 <sup>-6</sup> SO <sub>2</sub> , 300×10 <sup>-6</sup> NO	0.0005	25	6.0	-	1.03 ~ 1.08	室内摇瓶培养
栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp. <sup>[36]</sup>	10% CO <sub>2</sub>	0.3	25	-	150 μmol/(m <sup>2</sup> ·s)	0.22	光生物反应器
斜生栅藻 <i>Scenedesmus</i> <i>obliquus</i> <sup>[37]</sup>	12% CO <sub>2</sub>	0.075	30	5.5 ~ 7.8	3 200 Lux	0.11	垂直管式反应 器
微拟球藻 <i>Nannochlorop-</i> <i>sis salina</i> <sup>[38]</sup>	10% ~ 12% CO <sub>2</sub> , 70 × 10 <sup>-6</sup> ~ 90×10 <sup>-6</sup> SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub>	0.0017	20 ~ 27	6.6 ~ 7.2	太阳光	0.033	开放式跑道池
螺旋藻 <i>Spirulina</i> sp. <sup>[37]</sup>	6% CO <sub>2</sub>	0.075	30	6.8 ~ 9.0	3 200 Lux	0.21	垂直管式反应 器
纤细裸藻 <i>Euglena</i> <i>gracilis</i> <sup>[39]</sup>	10% CO <sub>2</sub>	0.06	29	3.5	480 μmol/(m <sup>2</sup> ·s)	0.12	光生物反应器

注:为统一单位,数据经过换算;部分干重产率按固碳量2倍估算;\*:烟气流速用一段时间内冲入气体的体积与培养液体积的比值表示

经过约 100 h 的迟滞期后也可快速生长。若在初始时培养液中无机碳浓度增至 94.5 mmol/L, *Thermosynechococcus* sp. CL-1 比生长速率可达 3.5 d<sup>-1</sup>。台湾大仁科技大学将开放式螺旋藻 (*S. maxima*) 培养用于火电厂烟气的减排,当 CO<sub>2</sub> 浓度为 6% 时产量最大,为 9.1 g dw/(m<sup>2</sup>·d),固碳速率达 15.83 g CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·d)<sup>[45]</sup>。

此外,杜氏盐藻、雨生红球藻、纤细裸藻、布朗葡萄藻等具有高值化产品开发潜力的藻种也成为了研究对象。Yoo 等<sup>[36]</sup>对栅藻 (*Scenedesmus* sp.)、布朗葡萄藻 (*Botryococcus braunii*) 的研究表明,充气中含 5.5%、10% CO<sub>2</sub> 时斜生栅藻生长速率都可达 0.2 g/(L·d) 以上,通过对脂类含量的测定,发现当充入烟气(含 CO<sub>2</sub> 5.5%)时,栅藻和布朗葡萄藻总脂产量分别为 39 和 21 mg/(L·d),后者中油酸含量很高,都具有相当应用前景。Olalizola<sup>[46]</sup>通过直接充入燃烧煤炭、丙烷产生的烟气培养雨生红球藻 (*Haematococcus pluvialis*),可达到较高固碳效率,固定效率依赖于 pH 而与烟气中气体成分关系不大;Chae 等<sup>[39]</sup>在室内光生物反应器中培养纤细裸藻,在 10% CO<sub>2</sub> 条件下可实现快速生长。

### 3.2 微藻高效培养技术与光生物反应器的研制

实现微藻的低成本、高效培养是应用于烟气减排的重要前提,针对烟气减排的特点,开发出高效、经济的规模化培养模式,是微藻减排走向产业化必

须打通的关节。已有的规模化培养可分为开放式、封闭式 2 种培养模式。相比于传统的开放式培养,封闭式光生物反应器具有培养密度高、培养条件易控制、产品安全无污染等优点<sup>[47]</sup>,在微藻减排、产氢、生物柴油等应用中都受到极大重视。

封闭式光生物反应器主要有管道式、平板式、柱状气升式、搅拌式发酵罐、薄膜袋等类型。在反应器的开发设计中,光的利用效率是微藻高密度生长最主要的限制因素之一。光作为藻类生长和代谢的能量来源,反应器内光源的分布、光强、光暗周期<sup>[48]</sup>等都会直接影响到生产效率。采用菲涅尔透镜、抛物面反射镜、紫外冷光镜等进行阳光收集的光捕集系统<sup>[49]</sup>,应用光纤、通体发光光纤<sup>[50]</sup>、荧光灯<sup>[51]</sup>、LED 阵列的新型光传递和照明技术,使微藻培养中光的分布和吸收越来越高效。Masojidek 等<sup>[52]</sup>在捷克建立的光生物反应器采用以菲涅尔透镜为主体的阳光收集系统,将入射阳光收集浓缩后传至玻璃培养管,光强超过 2 mmol/(m<sup>2</sup>·s),最大可达 7 mmol/(m<sup>2</sup>·s),同时该反应器可根据 pH 变化充入 CO<sub>2</sub>,对 pH、温度、溶氧量等各项参数进行全面检测和调控,培养钝顶螺旋藻 (*Spirulina platensis* strain M2) 最高产量可达 0.5 g/(L·d)。

气液传质效率是影响生产效率的另一大因素<sup>[53]</sup>,对于微藻烟气减排来说尤其如此。传统的气升式反应器中直接充入气体,使 CO<sub>2</sub> 等随藻液一同

循环流动并溶解,另外还有采用泡沫发生器、微孔纤维膜、气体循环系统等增加气体在培养液中保留时间,提高利用效率。Nagase 等<sup>[54]</sup>利用改进的气升式光生物反应器培养杜氏盐藻,可使其对 NO 的去除率达 96%;Cheng 等<sup>[55]</sup>在封闭式光反应器基础上串联微孔膜组件来改善供气效果,发现气泡在藻液中的停留时间从原来的 2 s 增加到 20 s,所培养小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 固定 CO<sub>2</sub> 速率从 80 mg/(L·h) 提高到 260 mg/(L·h);Yun 等<sup>[56]</sup>通过加入气体循环系统来改善反应器的气体利用效率,除了以 0.001 dm<sup>3</sup>/min 流速充入 20% CO<sub>2</sub> 外,反应器内气体还以 0.3 dm<sup>3</sup>/min 流速进行循环以增加气体保留时间,可使反应器内 CO<sub>2</sub> 保持在适合该藻生长的最佳浓度,CO<sub>2</sub> 固定速率为 0.14 g CO<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>·h;Vunjak-Novakovic 等<sup>[57]</sup>构建了一套三角形的内循环气升式光生物反应器用于小型火电烟气的减排并完成了接近 1 t 水体的室外小规模中试,CO<sub>2</sub> 减排效率高达 82.3%。加大进气量、加快循环速度是促进 CO<sub>2</sub> 溶解的有效方法,但同时产生的湍流会对藻类生长产生负面影响,因此,将 CO<sub>2</sub> 保持在适当浓度并提高气液传质效率,才能满足高密度培养的要求。

此外,将沼气、太阳能、工厂余热等与光生物反应器整合,可有效降低能耗、优化培养条件。如蒙沛南等<sup>[58]</sup>将有机废水发酵后的沼液和沼气燃烧后的废气用于钝顶螺旋藻 (*Spirulina platensis*) 培养,并利用太阳能水解淀粉液作为营养源,流加培养产率可达 1.62 g/(L·d),降低培养成本的同时也减少了环境污染。

### 3.3 微藻煤炭烟气减排的应用研究进展

早在 20 世纪 60 年代,通过大规模培养微藻来净化废水、废气同时生产甲烷的设想就已被提出。随着能源和环境危机的不断加剧,特别是温室效应导致的冰山融化、温度上升等问题,温室气体减排越来越受到国际社会的重视,为了建立高效率、低成本的微藻减排模式,各种技术手段正不断出现和完善。由于煤炭烟气的气体成分为酸性气体,NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 还具有较强的氧化性,这些毒害因素均对藻细胞的生长带来抑制、损伤甚至是致死<sup>[59,60]</sup>,因此,微藻—煤炭烟气减排的核心科学问题是藻种对烟气的适应性问题,而在应用技术上,如何突破烟气的毒害作用最为关键。目前已尝试多种技术策略和途径,如煤炭烟气经前处理后进行微藻减排,微藻直接进行煤炭烟气减排,通过控制 pH 提高微藻减排效率等,来突破煤炭烟气毒害这一技术难点。本节将讨论微藻

治理煤炭烟气的几种主要策略和途径,分析其中关键技术,为更好地促进我国发展微藻煤炭烟气减排技术提供参考。

#### 3.3.1 煤炭烟气经前处理后进行微藻减排

由于烟气成分复杂,其中 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、烟尘等对微藻都具有明显毒害作用<sup>[59,60]</sup>,因此一些研究者将烟气经脱硫、脱硝等前处理后,再用微藻培养液进行处理。Douskova 等<sup>[61]</sup>将城市废物焚化炉产生的烟气经过静电除尘、NO<sub>x</sub> 去除、SO<sub>2</sub> 吸收、重金属处理等一系列前处理,充入反应器中用于小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 的培养,处理后烟气含 CO<sub>2</sub> 10%~13%,小球藻产率达 2.5 dw g/(L·d),CO<sub>2</sub> 固定速率为 4.4 g CO<sub>2</sub>/(L·d),均高于使用 11% 纯 CO<sub>2</sub> 培养的小球藻;以色列 Ashkelon 公司已建立起 400 m<sup>2</sup> 开放式养殖池,利用经脱硫处理的电厂烟气(含 CO<sub>2</sub> 约 13%)培养微绿球藻 (*Nannochloropsis*) 生产生物柴油和 EPA,发现烟气培养效果优于纯 CO<sub>2</sub> 气体培养;捷克 Doucha 等<sup>[32]</sup>在室外建立的薄层平板式反应器中,锅炉燃烧产生的烟气在冷却、前处理之后和小球藻 (*Chlorella* sp.) 培养液在饱和吸收系统中进行混合,再泵入露天培养槽。结果显示含 CO<sub>2</sub> 6%~8% 的烟气培养效果和纯 CO<sub>2</sub> 培养效果相当,烟气中含有的 NO<sub>x</sub> 和 CO 等对小球藻生长无负面影响;利用物理、化学等方法将 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等完全或部分去除,可以降低烟气对微藻的耐受性,进而提高产率,但同时烟气前处理也会增加相应的成本,而这一技术仍然要求微藻的藻种对高浓度的 CO<sub>2</sub> 具有良好的耐受性。近年来,随着电厂脱硫、脱硝技术的日益普及,特别是 CCS 技术的快速发展,使对 CO<sub>2</sub> 具有良好耐受性的微藻(如螺旋藻),在煤炭烟气(CO<sub>2</sub>)的减排上将具有巨大的产业应用空间。

#### 3.3.2 微藻直接进行煤炭烟气减排

为了尽可能降低成本和能耗,不少研究者正在研究直接将烟气充入微藻培养液进行减排的技术。日本 Negoro 等<sup>[38]</sup>在小型开放式跑道池中进行微拟球藻 (*Nannochloropsis salina*) 和三角褐指藻 (*Phaeodactylum tricornutum*) 培养,将锅炉燃烧产生的烟气直接以 1 L/min 流速充入藻池中,该烟气中含 CO<sub>2</sub> 10%~12%,SO<sub>x</sub> 和 NO<sub>x</sub> 浓度(v/v)为 70×10<sup>-6</sup>~90×10<sup>-6</sup>,由于不稳定的阳光、搅拌等原因,2 种藻产量都较低,约为 10 g/(m<sup>2</sup>·d),但通过和充入纯 CO<sub>2</sub>、脱硫烟气的培养进行比较,证明煤炭烟气中含有的 SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、烟尘等杂质对微藻生长基本无负面影响<sup>[38]</sup>;Olaizola<sup>[46]</sup>通过在室外大型光生物反应器中

培养雨生红球藻(*Haematococcus pluvialis*)发现,直接充入燃烧煤炭、丙烷产生的烟气,藻类均可以很好地捕获煤炭烟气中的 $\text{CO}_2$ ,最高净光合速率可达 $0.13 \text{ mg CO}_2/(\text{L} \cdot \text{min})$ ,固定效率依赖于pH而与烟气中气体成分关系不大;台湾大仁科技大学和台电公司合作,将开放式螺旋藻(*Spirulina maxima*)培养用于火电厂烟气的减排,以空气混合煤炭烟气,当 $\text{CO}_2$ 浓度为6%时产量最大,为 $9.1 \text{ g dw}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,固碳速率为 $15.83 \text{ g CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。整个规模化培养系统年产螺旋藻 $29.49 \text{ t dw}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,年固碳量为 $51.53 \text{ t CO}_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[45]</sup>。Lee等<sup>[27]</sup>对小球藻(*Chlorella* KR-1)利用柴油烟气、补加 $\text{SO}_2$ 模拟煤炭烟气,产量达到 $0.71 \text{ g dw}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ,显示该藻株应用于煤炭烟气直接减排的前景。关于烟气中有毒有害物质对藻类的影响仍在不断研究之中,从部分已有结果来看,微藻直接处理煤炭烟气是可行的,但需要将pH、温度、溶氧量等控制在一定范围内。属蓝藻的螺旋藻对 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 较为敏感,但台湾大仁科技大学和台电公司的研究表明通过降低烟气浓度是可行的,为煤炭烟气处理提供了一个新的思路<sup>[45]</sup>。尽管如此,由于烟气耐受性越高的藻种,其处理效率越高,技术过程越简单,经济可行性越强,因此筛选耐受性强、生长旺盛的优良藻种是实现规模化减排的重要前提,优良藻种的应用必然是煤炭烟气直接减排的技术关键。

### 3.3.3 通过控制pH提高微藻减排效率

如何降低煤炭烟气对微藻的毒害和提高微藻对烟气的吸收效率,对实现高效的烟气减排有重要意义。研究发现,烟气中的 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 等不仅对微藻有直接毒害作用,溶于培养液后还可降低pH,影响藻类的生长<sup>[26]</sup>,并且酸性条件不利于烟气的溶解和吸收。因此培养液pH的调控成为了提高微藻减排效率的有效方法。Lee等<sup>[62]</sup>的研究表明,向小球藻(*Chlorella* sp KR-1)中分别充入含 $250 \times 10^{-6}$ (v/v) $\text{SO}_2$ 和 $300 \times 10^{-6}$ (v/v) $\text{NO}$ 烟气时,小球藻生长被抑制,pH显著下降。但通过向培养溶液中加入NaOH提高pH后,该藻对 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}$ 的耐受性明显提高,生长速率与正常对照组持平;某些微藻在生长过程中具有pH漂移、耐高碱的特性,可使培养液中pH持续升高,不仅可利用碱性条件促进烟气的吸收,而且还可利用pH漂移特性使培养物在补充烟气的同时维持pH稳定,为烟气减排提供了独特的生理基础。赖文亮等<sup>[45]</sup>即利用螺旋藻的这一特性,在白天阳光充足螺旋藻生长快速、pH上升时充入煤炭烟气,使

pH始终保持在8.5~9.7范围内,单位面积产率可达 $9.1 \text{ g dw}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,由于其本身光合生长造成的pH漂移免去了人为调节(加碱)所需成本,因此类似具有耐高碱、pH漂移特性的藻种在烟气减排中显示出了独特优势,而Xiang等<sup>[63]</sup>通过对硅藻MD-1的研究也进一步论证了藻种的高碱、高pH适应及pH漂移对烟气减排的重要生理意义。

### 3.3.4 近年微藻减排商业化的尝试

随着对微藻烟气减排研究的投入不断加大,技术不断成熟,国内外众多企业和研究机构都开始进行商业化微藻减排模式的探索。其中一个重要策略就是将微藻烟气减排、微藻能源和微藻高值化利用技术耦合起来,突破微藻产能和减排的高成本瓶颈<sup>[64,65]</sup>。

美国绿色燃料技术公司(GreenFuel)和亚利桑那公共服务公司于2007年12月在西班牙西南部开展的微藻减排项目,利用水泥厂工业废气中的 $\text{CO}_2$ 进行微藻培养并开发高附加值的食品、饲料和燃料,培养温室规模已达 $100 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,微藻年产量达25 000 t。第二期工程已于2008年10月展开,建立 $100 \text{ m}^2$ 的培养温室,以垂直薄膜光生物反应器进行微藻培养,并计划扩大到 $1 000 \text{ m}^2$ 规模;另据国际能源网(<http://www.in-en.com/>)报道,美国UOP公司于2010年3月获美国能源部150万美元的资助,开展通过微藻生长捕集 $\text{CO}_2$ 及用于生产生物燃料和能源的系统验证,该系统将从霍尼韦尔公司位于弗吉尼亚州Hopewell的制造装置排放的烟气中捕集 $\text{CO}_2$ ,然后从培养的微藻中提取生物燃料,微藻残渣则转化成热解油用于电力再生;工业气体巨头德国林德集团与美国Algenol Biofuels LLC公司也于2010年合作发展一种捕获、存储、运输及供给 $\text{CO}_2$ 的技术,应用于Algenol生产第三代(3G)生物燃料。该公司所拥有的这项专利技术是利用 $\text{CO}_2$ 、海水以及藻类生物中提取生物燃料,并从光生物反应器中去除 $\text{O}_2$ ([www.gasworld.com](http://www.gasworld.com));美国瓦莱罗能源公司(VLO)于2010年5月与微藻基燃料公司Algenol生物燃料公司签约开发协议。瓦莱罗公司已成为美国最大的乙醇生产商之一,拥有年生产量约11亿加仑的生产能力,瓦莱罗公司与Algenol生物燃料公司合作将在一些炼油厂附近开发微藻养殖场,以吸收 $\text{CO}_2$ 来生产乙醇和化学品([www.greencarcongress.com](http://www.greencarcongress.com))。

我国新奥集团的“ $\text{CO}_2$ —微藻—生物柴油关键技术研究”项目入选国家高技术研究发展计划的高

技术研究项目,目前已经通过中试,其在内蒙古达旗的微藻生态基地 2013 年将达到  $280 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 计划 3 ~ 5 年内逐步实现藻类生物能源的产业化(资料来源 www.ceweekly.cn)。微藻烟气减排易与微藻产油、污水处理、高值化产品开发等技术进行耦合,这也正成为商业化微藻减排的研究热点,微藻在解决环境、资源问题中所具备的潜力正在被不断发掘<sup>[64,65]</sup>。

## 4 问题与展望

综上所述,利用微藻进行煤炭烟气减排在理论上已日趋成熟,但要真正实现规模化应用仍有不少困难,原因主要在于微藻对烟气的适应性和大规模养殖技术的不成熟,导致微藻培养成本较高,因此我们认为应该从以下几个方面深入展开研究。

(1) 将微藻烟气减排和生物柴油、废水处理、生物活性物质开发等其他技术耦合起来进行综合研究。根据当前的研究现状,单一的烟气减排成本太高,如果在减排同时将藻类用于其他高值化产品的开发,以高值化利用和市场需求为烟气减排的驱动力,减排成本将大幅降低,可提高整个技术的经济性。

(2) 通过优良藻种的筛选和大型反应器技术的开发实现低成本、高效率的微藻养殖。筛选出抗逆性强、生长快、富含油脂等生物活性物质的藻种,利用基因工程技术对其进行改良,同时,进一步加强有关微藻的高碱适应和 pH 漂移特性的生理基础及应用技术研究,开发和放大高效光生物反应器和活性物质提取纯化技术。

(3) 在微藻规模化培养中,因地制宜,有效整合与利用一些可用的低成本、低能耗的资源,如太阳能、沼气资源、工厂废热废气废水等资源,进一步降低培养成本,提高生产效率。

(4) 将微藻烟气减排技术与  $\text{CO}_2$  捕获和封存的技术(CCS 技术)相结合。以火电厂为主,目前国内外都在广泛探索 CCS 技术,可望获得大量较高纯度的  $\text{CO}_2$ , 为微藻规模化生产提供优质碳源,降低储存或填埋  $\text{CO}_2$  的成本,同时促进微藻的产业开发。

综上所述,微藻烟气减排技术的产业化是个多学科交叉的复杂工程,未来的研究需要重点关注优良藻种的筛选,关注大型光生物反应器的研制,关注产业化过程中技术难题的突破。随着温室气体大量排放,能源和生态环境问题不断凸显,开发高效的减排技术迫在眉睫,规模化微藻减排技术将带来可观

的生态效益、社会效益和经济效益,微藻烟气减排技术有望成为新型高效减排技术的突破口。

## 参考文献 (References):

- [1] Agency I E. Key World Energy Statistics 2010 [M]. Paris: OECD/IEA, 2010.
- [2] Eggleston H S. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. Japan: Hayama, 2006.
- [3] Zhu Chuan, Jiang Ying, Wu Linlin. Discussion on quantification of  $\text{CO}_2$  emission reduction and treatment technologies and classification assessment [J]. *Sin-Global Energy*, 2010, 15 (3): 19-23. [朱川, 姜英, 武琳琳.  $\text{CO}_2$  减排、处理技术的量化讨论与分类评价 [J]. 中外能源 2010, 15 (3): 19-23.]
- [4] Usui N, Ikenouchi M. Biological  $\text{CO}_2$  fixation and utilization project by RITE .1. Highly-effective photobioreactor system [J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38 (1): 487-492.
- [5] Kumar A, Ergas S, Yuan X, et al. Enhanced  $\text{CO}_2$  fixation and biofuel production via microalgae: Recent developments and future directions [J]. *Trends Biotechnol.*, 2010, 28 (7): 371-380.
- [6] Skjanes K, Lindblad P, Muller J.  $\text{BiOCO}_2$ —A multidisciplinary, biological approach using solar energy to capture  $\text{CO}_2$  while producing H-2 and high value products [J]. *Biomolecular Engineering*, 2007, 24 (4): 405-413.
- [7] Giordano M, Beardall J, Raven J A.  $\text{CO}_2$  concentrating mechanisms in algae: Mechanisms, environmental modulation, and evolution [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2005, 56: 99-131.
- [8] Raven J A. Inorganic carbon assimilation by marine biota [J]. *Journal of Experimental Marine Biology Ecology*, 1996, 203: 39-47.
- [9] Fu Xiang, Han Boping, Lin Qiuqi. Review of the  $\text{CO}_2$  concentration mechanism in cyanobacteria [J]. *Marine Sciences*, 2003, 27 (4): 13-17. [付翔, 韩博平, 林秋奇. 蓝细菌  $\text{CO}_2$  浓缩机制的研究概况 [J]. 海洋科学, 2003, 27 (4): 13-17.]
- [10] Qiu Baosheng, Gao Kunshan. Carbon dioxide concentrating mechanism in blue-green algae [J]. *Plant Physiology Communications*, 2001, 37 (5): 385-392. [邱保胜, 高坤山. 蓝藻浓缩二氧化碳的机制 [J]. 植物生理学通讯, 2001, 37 (5): 385-392.]
- [11] Moroney J V, Chen Z Y. The role of the chloroplast in inorganic carbon uptake by eukaryotic algae [J]. *Canadian Journal of Botany*, 1998, 76 (6): 1 025-1 034.
- [12] Moroney J V, Ynalvez R A. Proposed carbon dioxide concentrating mechanism in *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. *Eukaryotic Cell*, 2007, 6 (8): 1 251-1 259.
- [13] Spalding M H. Microalgal carbon-dioxide-concentrating mechanisms: *Chlamydomonas* inorganic carbon transporters [J]. *Journal of Experiment Botany*, 2008, 59 (7): 1 463-1 473.
- [14] Roberts K, Granum E, Leegood R C, et al. Carbon acquisition by diatoms [J]. *Photosynthesis Research*, 2007, 93 (1/3): 79-88.
- [15] Zhi Yanli, Chu Zhaosheng, Zhong Yuan, et al. Photosynthetic  $\text{HCO}_3^-$  utilization of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus quadricauda* [J]. *Lake Sciences*, 2008, 20 (4): 443-449. [支彦丽,

- 储昭升, 钟远, 等. 铜绿微囊藻和四尾栅藻光合利用碳酸氢盐探讨[J]. 湖泊科学, 2008, 20(4):443-449. ]
- [16] Lopez-Archilla A I, Moreira D, Lopez-Garcia P, *et al.* Phytoplankton diversity and cyanobacterial dominance in a hypereutrophic shallow lake with biologically produced alkaline pH[J]. *Extremophiles*, 2004, 8(2):109-115.
- [17] Badger M R, Price G D, Long B M, *et al.* The environmental plasticity and ecological genomics of the cyanobacterial CO<sub>2</sub> concentrating mechanism[J]. *Journal of Expany Botany*, 2006, 57(2):249-265.
- [18] Du Jijun, Zeng Ping, Shi Yingjie, *et al.* Cultivation of wild mixed microalgae by synthetic flue gas[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(3):366-370. [都基峻, 曾萍, 石应杰, 等. 模拟烟气条件下野生混合微藻的培养[J]. 环境科学研究, 2010, 23(3):366-370. ]
- [19] Qian Yongchang, Yu Shuwen. Oxidation of sulfur dioxide on plants and anti-oxidation of plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 1991, 27(5):326-331. [钱永常, 余叔文. SO<sub>2</sub> 对植物的氧化作用和植物的抗氧化作用[J]. 植物生理学通讯, 1991, 27(5):326-331. ]
- [20] Peng Changlian, Lin Zhifang. Effects of SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> on chlorophyll fluorescence in *Dunaliella Salina* 1009 [J]. *Tropical and Subtropical Botany*, 1998, 6(2):117-123. [彭长连, 林植芳. 强光下 SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 对盐藻叶绿素荧光的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 1998, 6(2):117-123. ]
- [21] Xia Zongliang, Wang Yongxia, Zhang Xuecai, *et al.* Advances in studies on sulfite oxidase in higher plants[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(9):302-306. [夏宗良, 王永霞, 张学才, 等. 高等植物亚硫酸盐氧化酶研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(9):302-306. ]
- [22] Aguilar M, Cardenas J, Fernandez E. Quantitation of molybdopterin oxidation product in wild-type and molybdenum cofactor deficient mutants of *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. *Biochim Biophys Acta*, 1992, 1160(3):269-274.
- [23] Solomonson L P, Barber M J, Howard W D. Electron paramagnetic resonance studies on the molybdenum center of assimilatory NADH:Nitrate reductase from *Chlorella vulgaris*[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1984, 259(2):849-853.
- [24] Rabinowitch H D, Fridovich I. Growth of *Chlorella Sorokiniana* in the presence of sulfite elevates cell content of superoxide-dismutase and imparts resistance towards paraquat [J]. *Planta*, 1985, 164(4):524-528.
- [25] Castenholz R W, Utkilen H C. Physiology of sulfide tolerance in a thermophilic *Oscillatoria* [J]. *Archives of Microbiology*, 1984, 138(4):299-305.
- [26] Yue Lihong, Chen Weigong, Li Jianguo, *et al.* *Chlorella* ZY-1 cultivation and its CO<sub>2</sub> fixation in the environmental condition of flue gases [J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2005, 26(6):15-19. [岳丽宏, 陈为公, 李建国, 等. 烟气环境条件下小球藻的生长及其 CO<sub>2</sub> 固定[J]. 青岛理工大学学报, 2005, 26(6):15-19. ]
- [27] Lee J S, Kim D K, Lee J P, *et al.* Effects of SO<sub>2</sub> and NO on growth of *Chlorella* sp KR-1 [J]. *Bioresource Technology*, 2002, 82(1):1-4.
- [28] Yang S L, Wang J, Cong W, *et al.* Effects of bisulfite and sulfite on the microalga *Botryococcus braunii*[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2004, 35(1):46-50.
- [29] Zhang Min, Chen Jun. Control and development situation of nitrogen oxide at domestic coal-fired power plant [J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2009, 12(5):44-52. [张敏, 陈军. 国内燃煤电厂氮氧化物的控制现状及其发展[J]. 四川化工, 2009, 12(5):44-52. ]
- [30] Nagase H, Yoshihara K, Eguchi K, *et al.* Characteristics of biological NOx removal from flue gas in a *Dunaliella tertiolecta* culture system [J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 1997, 83(5):461-465.
- [31] Nagase H, Yoshihara K, Eguchi K, *et al.* Uptake pathway and continuous removal of nitric oxide from flue gas using microalgae [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2001, 7(3):241-246.
- [32] Doucha J, Straka F, Livansky K. Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2005, 17(5):403-412.
- [33] Misra A N, Misra M, Singh R. Nitric oxide biochemistry, mode of action and signaling in plants[J]. *Journal of Medicinal Plants Research*, 2010, 4(25):2 729-2 739.
- [34] Singh A K, Sharma L, Mallick N. Antioxidative role of nitric oxide on copper toxicity to a chlorophycean alga, *Chlorella*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, 59(2):223-227.
- [35] Zhang L P, Mehta S K, Liu Z P, *et al.* Copper-induced proline synthesis is associated with nitric oxide generation in *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. *Plantard Cell Physiology*, 2008, 49(3):411-419.
- [36] Yoo C, Jun S Y, Lee J Y, *et al.* Selection of microalgae for lipid production under high levels carbon dioxide [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(1):S71-S74.
- [37] de Morais M G, Costa J A V. Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C-vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors[J]. *Biotechnology Letters*, 2007, 29(9):1 349-1 352.
- [38] Negoro M, Hamasaki A, Ikuta Y, *et al.* Carbon-dioxide fixation by microalgae photosynthesis using actual flue-gas discharged from a Boiler[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1993, 39:643-653.
- [39] Chae S R, Hwang E J, Shin H S. Single cell protein production of *Euglena gracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(2):322-329.
- [40] Ono E, Cuello J L. Feasibility assessment of microalgal carbon dioxide sequestration technology with photobioreactor and solar collector[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 95:597-606.
- [41] Yue Lihong, Chen Baozhi. Isolation and determination of cultural characteristics of microalgae for greenhouse gases fixation from the stack gases[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Sci-*



- ence), 2002, 23(2):289-292. [岳丽宏, 陈宝智. 固定烟道气温室气体的微藻的分离及培养特性测定[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2002, 23(2):289-292.]
- [42] Sung K D, Lee J S, Shin C S. Isolation of a new highly CO<sub>2</sub> tolerant fresh water microalga *Chlorella* sp KR-1[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 1998, 15(4):449-450.
- [43] Fulke A B, Mudliar S N, Yadav R, et al. Bio-mitigation of CO<sub>2</sub>, calcite formation and simultaneous biodiesel precursors production using *Chlorella* sp. [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(21):8 473-8 476.
- [44] Hsueh H T, Li W J, Chen H H, et al. Carbon bio-fixation by photosynthesis of *Thermosynechococcus* sp CL-1 and *Nannochloropsis oculata*[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B-Biology*, 2009, 95(1/2):33-39.
- [45] Lai Wenliang, Li Chonggai, Su Huimei, et al. A case study of CO<sub>2</sub> fixation from the flue gas by microalgae on Talin coal-fired thermal power plant[J]. *Monthly Journal of Taipower's Engineering*, 1998, 729:1-13. [赖文亮, 李崇垠, 苏惠美, 等. 微藻固定烟道气中二氧化碳之效益——以大林火电发电厂为例[J]. 台电工程月刊, 1998, 729:1-13.]
- [46] Olaizola M. Microalgal removal of CO<sub>2</sub> from flue gases: Changes in medium pH and flue gas composition do not appear to affect the photochemical yield of microalgal cultures[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2003, 8(6):360-367.
- [47] Pulz O. Photobioreactors: Production systems for phototrophic microorganisms[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, 57(3):287-293.
- [48] Jacob-Lopes E, Scoparo C H G, Lacerda L M C F, et al. Effect of light cycles (night/day) on CO<sub>2</sub> fixation and biomass production by microalgae in photobioreactors[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2009, 48(1):306-310.
- [49] Ono E, Cuello J L. Design parameters of solar concentrating systems for CO<sub>2</sub>-mitigating algal photobioreactors [J]. *Energy*, 2004, 29(9/10):1 651-1 657.
- [50] Takano H, Takeyama H, Nakamura N, et al. CO<sub>2</sub> Removal by high-density culture of a marine cyanobacterium *Synechococcus* sp using an improved photobioreactor employing light-diffusing optical fibers[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1992, 34(5):449-458.
- [51] Jacob-Lopes E, Lacerda L M C F, Franco T T. Biomass production and carbon dioxide fixation by *Aphanothece microscopica Nageli* in a bubble column photobioreactor[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2008, 40(1):27-34.
- [52] Masojidek J, Papacek S, Sergejevova M, et al. A closed solar photobioreactor for cultivation of microalgae under supra-high irradiance: Basic design and performance[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2003, 15(2/3):239-248.
- [53] Sato T, Usui S, Tsuchiya Y, et al. Invention of outdoor closed type photobioreactor for microalgae[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(6):791-799.
- [54] Nagase H, Eguchi K, Yoshihara K, et al. Improvement of microalgal NO<sub>x</sub> removal in bubble column and airlift reactors[J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 1998, 86(4):421-423.
- [55] Cheng L H, Zhang L, Chen H L. Carbon dioxide removal from air by microalgae cultured in a membrane-photobioreactor[J]. *Separation and Purification Technology*, 2006, 50(3):324-329.
- [56] Yun Y S, Park J M. Development of gas recycling photobioreactor system for microalgal carbon dioxide fixation [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 1997, 14(4):297-300.
- [57] Vunjak-Novakovic G, Kim Y, Wu X, et al. Air-lift bioreactors for algal growth on flue gas: Mathematical modeling and pilot-plant studies[J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(16):6 154-6 163.
- [58] Meng Peinan, Deng Dingxun, Zhou Ke. Experimental study on disposing the organic sewage and cultivating fodder *Spirulina* with solar energy light-organic reactor[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2002, 23(1):1-3. [蒙沛南, 邓鼎勋, 周科. 利用太阳能光生物反应器处理有机污水并培养饲料级螺旋藻实验研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(1):1-3.]
- [59] Burlew J S. *Algal Culture from Laboratory to Pilot Plant* [M]. Washington DC: Carnegie Institution of Washington Publication 600, 1953.
- [60] Kurano N, Ikemoto H, Miyashita H. Fixation and utilization of carbon-dioxide by microalgal photosynthesis[J]. *Energy Conversion and Management*, 1995, 36(6):689-692.
- [61] Douskova I, Doucha J, Livansky K, et al. Simultaneous flue gas bioremediation and reduction of microalgal biomass production costs [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, 82(1):179-185.
- [62] Lee Juno, Lee Jinsuk, Shin Chulseung, et al. Methods to enhance tolerances of *Chlorella* KR-1 to toxic compounds in flue gas [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2000, 84/86(1):329-342.
- [63] Xiang W Z, Su J, Liu J. Isolation of an extremophilic diatom strain and its potential in biotechnology[C]//China Energy Society. Proceedings of Conference on China Technological Development of Renewable Energy Source, Beijing. Scientific Research Publishing, USA, 2010, 17/19:493-497.
- [64] Wang B, Li Y, Wu N, et al. CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, 79(5):707-718.
- [65] Mata T M, Martins A A, Caetano N S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(1):217-232.

## Progress in the Study of Removal from Coal Fired Flue Gas by Microalgae

Xu Shaokun<sup>1,2</sup>, Zhang Feng<sup>1,2</sup>, Xiang Wenzhou<sup>1</sup>, Wu Yuantao<sup>3</sup>, Ren Xiaobo<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Bio-resources Sustainable Utilization, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Bureau of Science and Technology for Resources and Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China)

**Abstract:** For a long time, a large amount of harmful materials, like CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and smoke-dust brought by coal's burning in both China and the world has been creating grievous atmospheric pollution. Much emphasis has been putting on reducing the emission of flue gas, and using microalgae to achieve the aim, which is one of the international research hotspots. In this paper, the theories about the physiological mechanism of carbon fixation and emission reduction of coal fired flue gas by microalgae, the research progress in some key techniques such as microalgae strain selection and design of new photobioreactors are outlined. Meanwhile, the existing problems and future trends of large-scale application of emission reduction by microalgae are discussed.

**Key words:** Microalgae; Coal; Flue gas; CO<sub>2</sub>; Carbon dioxide fixation.

## 最新研究发现古冰川融化过程与目前格陵兰 冰盖的融化过程相似

几千年前“海因里克现象”的发生导致大量的冰山沉积物进入北部大西洋,相关分析证明地下水温度轻微的增高就能引起冰川架的急剧坍塌。该研究结果发表于2011年8月1日的《美国科学院院刊》,该研究报告提供的历史依据证实地下水温度升高3~4℃就足够引起目前加拿大地区的冰原进行阶段性或突发性坍塌。

研究者认为此项研究工作十分重要,因为该研究关注南极洲或格林兰地区水升温导致的冰原较为快速的坍塌,增大冰向海洋移动的数量,最后使海平面升高。目前其中最为敏感的区域位于西部南极洲冰原,如果该地区的冰原全部融化将导致全球海平面升高11 m。研究人员表示,“我们目前还不知晓水能否升温至这种现象的发生,但必须对其予以关注,因为已证实以前曾发生过这种类型的冰川融化”。研究人员认为,如果西部南极洲冰原边缘的冰架底部水温增高2℃,那么该地区冰川融化率将超过每年30 m。这就可能导致一个世纪以内很多冰原都融化,这也是导致冰原面临快速变化的主要机制。

为了寻找史前这种事件的例子,科学家们用计算机进行模拟,用过去海洋温度和“海因里克现象”发生过程中的不同时期进行重建。结果显示某些时期这种事件的发生主要与气候变化相关,但结果未显示气候变化是主导因素还是辅助因素。

研究人员称,“目前已有证据证实现在的气候比海因里克现象时期冷的多,这使得海洋表层的水温变冷,但事实上地下水温却增高了。我们在努力求证地下水温度较高的水如何影响地上冰架的升温 and 坍塌,同时触发‘海因里克现象’”。

目前研究人员关心的是海洋水温大范围升高之前海洋的变化趋势。如果当前海洋的变化及升温直接影响冰架,那么就会导致更快速的融化。

(赵红译 张树良校)

原文题目: Ancient glacial melting process existing concerns about Antarctica, Greenland

来源 [http://www.innovations-report.com/html/reports/earth\\_sciences/ancient\\_glacial\\_melting\\_process\\_similar\\_existing\\_179566.html](http://www.innovations-report.com/html/reports/earth_sciences/ancient_glacial_melting_process_similar_existing_179566.html)