



奋进新征程 建功新时代 | 牢记嘱托 再立新功 再创佳绩 喜迎二十大

# 神奇小微藻 吃碳产蛋白

石科院国际首创的微藻脱硝并兼产高价值生物产品技术,一方面可减少炼化企业生产过程中的二氧化碳及污染物排放;另一方面可增加蛋白质供应,用于水产养殖,保障粮食安全

□李 煦 陈子佩 朱俊英 程琳 文/图

近日,由石科院牵头、多家参研单位共同合作的“微藻脱硝并兼产高价值生物产品技术开发与工业示范”项目通过了中国石化科技部组织的技术评议。评议专家一致认为,石科院自主研发的微藻脱硝成套工艺技术属国际首创,其脱硝率和氮源固定效率达到国际领先水平,为采用微藻生物技术实现我国“碳中和”目标及粮食安全战略开辟了新道路。

另辟蹊径

从微藻制油到减排  
与蛋白质生产并举

从20世纪末开始,欧美政府及企业就已陆续展开微藻能源研究项目,尝试以含二氧化碳的废气饲养微藻获取液体生物燃料,但由于技术经济性、国际油价等多方面的原因,他们都逐渐退出了这一领域,微藻生物能源技术也未能实现真正的工业应用。但同时,科学界与工程界还对微藻脱硝技术(通过微藻减排氮氧化物的技术)寄予厚望。

微藻脱硝技术通常是直接将含有氮氧化物的烟气通入微藻养殖体系,利用微藻细胞对氮氧化物进行吸收与固定。但由于氮氧化物在水中溶解度低、微藻细胞不能直接利用中性氮氧化物分子等一系列原因,微藻脱硝技术始终无法满足大规模工业化应用对于效率和稳定性的要求。

中国石化抓住这一机遇,开始超前布局。早在2008年,在集团公司科技部的支持下,石科院就组建了微藻生物技术团队。作为一项典型的跨学科研究课题,微藻生物技术涉及生物技术、环境科学与化学化工等多个领域,因此,研发团队中既有研究微藻出身的科班力量,又有工程开发经验丰富的技术专家,还有干了大半辈子石油化工却依然保持着对新领域、新知识的渴求,选择踏入微藻行业的“新人”。知识、阅历及经验不同的成员们在一起交融碰撞,形成了一支思路开阔、敢试敢拼的优秀队伍。

虽然具备了高素质的研发团队,但是这项技术的攻关并非一帆风顺。“与国际上绝大多数团队类似,石科院微藻生物技术团队的研究方向最初也集中在微藻生物物质能源开发方面。经过数年的努力,我们形成了从含油藻种筛选、微藻规模化养殖、高效低成本采收与液体燃料加工全流程的技术体系。但在迈向工业化示范的过程中,石科院也同国内外其他研究机构一样,遇到了经济性的障碍。”石科院院长李明丰介绍,“以生物柴油为例,根据成本核算,只有当原油价格高于90美元/桶时,以微藻油为原料制备的生物柴油才具有经济优势。然而自2014年起,国际油价始终徘徊在90美元/桶之下。微藻生物物质能源受困于这一成本劣势,始终难以实现大规模工业应用。”

面对微藻生物技术发展的困境,石科院研发团队不得不再向“无人区”进发,从荒野中探索出一条新路。研发团队重新分析审视了微藻的组成与性质,发现微藻在生长过程中除了能生成用于制备生物燃料的油脂,还能积累大量的蛋白质、糖类及其他生物活性物质。其中,蛋白核小球藻与螺旋藻等藻种的蛋白质含量甚至可在40%~70%,远高于常见的植物蛋白质含量。而且微藻中蛋白质的氨基酸可消化性好、组成均衡,是非常理想的食物与饲用蛋白来源。

研发团队敏锐地意识到,将微藻碳氮减排与蛋白质资源生产相结合,才是微藻生物技术未来能实现大规模应用的发展路径。

寻根究底

开展基础研究剖析  
科学规律

技术的不足,归根到底在于对基本原理的理解不够透彻。石科院研发团队决定从基础研究入手,深入剖析微藻脱硝技术背后所隐藏的科学本质。研发团队层层分解,从反应原理、传递过程及细胞生理状态等不同角度,对氮氧化物固定与微藻生长所涉及的各个环节进行逐个击破,“对症下药”开发技术。

氮氧化物在水中溶解度低,团队就针对烟气中氮氧化物的催化氧化机理进行分析,找出提高氮氧化物吸收率的关键点;氮氧化物高效脱除的条件与适宜微藻生长的条件不一致,团队就想方设法将化工过程和生物过程剥离,分别进行优化后再组合;微藻对氮氧化物的吸收速度慢,团队就对微藻细胞氮代谢机制展开研究,筛选氮转化效率高的微藻品种。最终通过藻种采集、分离纯化、驯化筛选及性能评价等一系列手段,他们获得了能高效固定氮氧化物和二氧化碳的优势藻种35株,成功建立起了藻种库。



►石科院研发人员进行试验。

花开两朵

创新养殖模式助推  
技术突破

基础研究获得突破后,团队开始进行技术开发。在建立技术体系之前,首先要确定微藻的养殖模式。

“微藻养殖分为自养、兼养等多种模式。自养模式就是微藻仅以阳光为能源进行生长,具有技术简单、易于大规模实施、成本低等优势,但自然光的能量密度低,导致微藻生长速度较慢。”中国石化新能源研究所所长、微藻生物技术团队带头人荣峻峰介绍,“兼养模式是指微藻同时利用光能和外源有机物作为能源生长,这种模式的生长速度快、脱氮效率高,但对装置设备要求也更高,额外添加的有机物‘饲料’也会增加养殖成本。”

两种路线各有优劣,到底选择哪种方式更适合微藻脱硝技术?团队中存在不同意见。在难以达成一致的情况下,研发团队暂时搁置了对于养殖方式的争论,将目光投向脱硝技术的处理对象——污染源。

石油化工技术复杂多样,不同技术排放出的含氮污染物的质与量也有很大差异,单一的技术路线很可能无法满足未来工业化应用对脱硝技术的需求。在精准分析后,石科院研发团队创造性地提出两条路线并行开发的思路,以最大程度地发挥两条技术路线各自的优势:自养模式应用于处理低浓度大流量的含氮污染物,兼养模式应用于处理棘手的高浓度含氮污染物。两种技术路线并行使用,可极大程度提升工艺的适应性,增强技术应对复杂市场需求的整体竞争力。

确定了两种养殖方式并行的研发方向后,团队乘势而上,迅速推进技术开发与实验室小试、中试研究,联合催化剂公司、石家庄炼化、湖北化肥、上海工程,以及华南理工大学、中国科学院武汉植物园、暨南大学、中粮营养健康研究院等单位,在藻种选育、烟气吸收、新型光生物反应器、光能兼养技术、微藻刺激技术、养殖液循环利用技术、微藻高效采收与生物物质利用等方面实现了创新与突破。

世界首创

工业示范装置成绩斐然

在中国石化科技部十余年的持续投入和大力支持下,2021年,石科院在国际范围内率先建立了微藻脱硝组合工艺,将优化后的单项技术有机结合,使烟气脱硝与微藻养殖两个关键过程既紧密耦合又独立运转,完成了微藻碳氮减排与高蛋白生物物质生产利用的全流程技术开发,获得了一系列核心技术成果。

石科院世界首创的微藻脱硝组合工艺在业界引起了广泛关注,项目被列入国家重点基础研

究发展计划(“973”计划),课题验收专家组认定该项目“在国际上首次研究论证了微藻生物脱除工业烟气氮氧化物的工业适用性,构建了完整的专利网”“提供了一条烟气氮氧化物减排的新路线,在本领域产生了重要影响”。在中国石化科技部组织的项目评议会上,评议专家一致认定石科院自主研发的微藻脱硝成套工艺技术属国际首创,其脱硝率和氮源固定效率达到国际领先水平,为采用微藻生物技术实现我国“碳中和”目标及粮食安全战略开辟了新道路。

目前,该项目已申请中国专利67项,获授权34项;申请国际专利2项,美国专利授权1项,形成了完整可自由运作的专利网,技术自主可控,相关科研项目获得集团公司2019年度前瞻性基础性研究一等奖。同时,中国石化先后在催化剂长岭分公司、石家庄炼化及湖北化肥等企业开展微藻碳氮减排的示范工作,均收到了良好效果,为微藻生物技术的进一步工业化实施奠定了基础。

微藻脱硝组合工艺工业示范装置的数据显示:脱硝装置出口氮氧化物含量在20毫克/立方米左右,仅为规定排放标准的1/5,达到超洁净排放标准。这说明该技术脱硝率达到90%以上,可成功将烟气中的氮氧化物转化为稀硝酸并作为微藻生长的养料,实现了一定规模的微藻生产,且微藻产品重金属含量等安全指标均满足饲料卫生标准的要求。

而微藻自养处理氮废水示范装置的数据表明,微藻对于工业废水中的硝酸和磷酸盐也有良好的处理能力。饲养出的螺旋藻产品蛋白质含量近60%,超过常规饲料近五成,目前已作为饲料成功应用于饲养仔猪及多宝鱼、罗氏沼虾等,同时还验证了通过后续深度加工生产出亚麻酸、胡萝卜素、藻蓝素等高附加值代谢产物的可行性,未来可以进一步应用于保健品生产。

生机无限

微藻广阔天地大有可为

随着我国生态文明建设不断推进,发展绿色经济、低碳经济、循环经济是大势所趋、潮流所向。微藻脱硝成套技术能够变废为宝,利用污染物生产高价值生物产品,将粮食安全、新能源与环境保护等国家战略有机结合,实现环境保护与社会经济发展的和谐统一,具备极大发展潜能。

同时,微藻脱硝成套技术还可建立起循环经济的新体系。一家千万吨级规模的石化生产企业,利用微藻脱硝成套技术可实现二氧化碳和氮氧化物大幅减排,年可产出约500万吨高蛋白微藻,市场价值超过500亿元,环保效益及经济效益极为显著。

微藻脱硝成套技术是中国石化践行绿色高质量发展、以科技创新引领转型升级的有力举措。下一步,中国石化将进一步提升技术水平,并在海南建设万吨级二氧化碳减排示范基地,以实际行动守护绿水青山。

## ●知识链接

## 喝“西北风” 产蛋白质

微藻是指在显微镜下才能看到的微小藻类群体,包括螺旋藻、小球藻等多种藻类,广泛存在于天然水体中,是水生态环境的重要组成部分。通过从自然环境中筛选出部分合适的藻种,并在人工环境下进行养殖,微藻就可通过光合作用,以极高的效率吸收环境中的无机碳(如二氧化碳)与无机氮(如氨氧化物),依靠自身生物代谢过程将其转化为有机碳(主要为糖类与油脂)和有机氮(主要为蛋白质),用以维持自身的生长与发育。

据集团公司首席专家宗保宁介绍,微藻的独特属性使其在实现“双碳”目标与保障粮食安全方面都能够发挥独特作用。

一方面,微藻可用来“做减法”,减少炼化企业生产过程中的二氧化碳及污染物排放。通过对工业生产废气中的二氧化碳及氮氧化物进行富集、转化与提纯,生产出食品级二氧化碳和化肥级含氮化合物(如硝酸),作为养殖微藻的“养料”。之后,微藻通过自身的生化反应,将其转变为富含脂肪与蛋白质的生物物质,在“喝西北风长大”的过程中实现二氧化碳、氮氧化物的吸收固定和无害化处理。

另一方面,微藻可用来“做加法”,增加蛋白质供应,保障粮食安全。目前,我国养殖饲料中的蛋白质来源主要依赖进口大豆制成的豆粕。2020年,我国水产养殖所需高蛋白鱼粉的对外依存度高达68.1%;进口的大豆突破1亿吨,对外依存度高达83.7%,创历史新高。微藻能生产大量富含脂肪与蛋白质的生物物质,其蛋白质含量比豆粕等大规模应用的饲料高近50%,具有较高的营养价值。最重要的是,微藻可利用边角料余土地开展养殖,不与粮争地,因此可作为一种自主可控的新型蛋白质来源保障我国养殖业稳定和粮食安全。



微藻脱硝组合工艺示范装置。

## 行业动态



## 国家将探索建立氢能产供储销体系 引导工业企业开展清洁能源替代

本报讯 近日,国家发展改革委、国家能源局发布《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》。《意见》提出,推动炼化行业转型升级,加大减污降碳协同力度;支持生物燃料乙醇、生物柴油、生物天然气等清洁燃料接入油气管网;制定煤制油气技术储备支持政策;探索建立氢能产供储销体系。

完善能耗“双控”一直是业界关注的焦点。为此,《意见》提出,强化能耗强度降低约束性指标管理,有效增强能源消费总量管理弹性,新增可再生能源和原料用能不纳入能源消费总量控制,合理确定各地区能耗强度降低目标。制修订重点用能行业单位产品能耗限额强制性国家标准,组织对重点用能企业落实情况进行监督检查。研究制定重点行业、重点产品碳排放核算方法。推动地方建立健全用能预算管理制度,探索开展能耗产出效益评价。

工业领域是能源消费和二氧化碳排放的重要来源,为完善工业领域绿色能源消费支持政策,《意见》提出,引导工业企业开展清洁能源替代,降低单位产品碳排放,鼓励具备条件的企业率先形成低碳、零碳能源消费模式。鼓励建设绿色用能产业园区和企业,发展工业绿色微电网,支持在自有场所开发利用清洁低碳能源,建设分布式清洁能源和智慧能源系统,对余热余压余气等综合利用发电减免交叉补贴和系统备用费,完善支持发自自用分布式清洁能源发电的价格政策。在符合电力规划和电网安全运行条件的前提下,鼓励通过创新电力输送及运行方式实现可再生能源电力项目就近向产业园区或企业供电,鼓励产业园区或企业通过电力市场购买绿色电力。鼓励新兴重点用能领域以绿色能源为主满足用能需求,并对余热余压余气等进行充分利用。

近期,我国出现了煤炭供应紧缺的问题。《意见》强调,科学评估煤炭企业产量减少和关闭退出的影响,研究完善煤炭企业退出和转型发展及从业人员安置等扶持政策。健全煤炭产品、产能储备和应急储备制度,完善应急调峰产能、可调节库存和重点电厂煤炭储备机制,建立以企业为主体,市场化运作的煤炭应急储备体系。

煤炭清洁开发利用方面,《意见》提出,大力推动煤炭清洁高效利用;制定煤制油气技术储备支持政策。

《意见》要求完善油气清洁高效利用机制。提升油气田清洁高效开采能力,推动炼化行业转型升级,加大减污降碳协同力度。完善油气与地热能及风能、太阳能等能源资源协同开发机制,鼓励油气企业利用自有建设用地发展可再生能源和建设分布式能源设施,在油气田区域内建设多能融合的区域供能系统。持续推动油气管网公平开放并完善接入标准,梳理天然气供气环节并减少供气层级,在满足安全和质量标准等前提下,支持生物燃料乙醇、生物柴油、生物天然气等清洁燃料接入油气管网,加强二氧化碳捕集、利用与封存技术推广示范,扩大二氧化碳驱油技术应用,探索利用油气开采形成地下空间封存二氧化碳。加快形成政府储备、企业社会责任储备和生产经营库存有机结合、互为补充,实物储备、产能储备和其他储备方式相结合的石油储备体系。建立健全地方政府、供气企业、管输企业、城镇燃气企业各负其责的多层次天然气储气调峰和应急体系。完善煤炭、石油、天然气产供储销体系。

当前,我国氢能产业发展正步入快车道,氢能也成为关键词之一。《意见》提出,探索输气管道掺氢输送、纯氢管道输送、液氢运输等高效输氢方式。鼓励传统加油站、加气站建设油气电氢一体化综合交通能源服务站。探索建立氢能产供储销体系。推行氢能等清洁能源交通工具,完善充换电、加氢、加气(LNG)站点布局及服务设施。

根据《意见》,“十四五”时期,我国基本建立推进能源绿色低碳发展的制度框架,形成比较完善的政策、标准、市场和监管体系,构建以能耗“双控”和非化石能源目标制度为引领的能源绿色低碳转型推进机制。到2030年,基本建立完整的能源绿色低碳发展基本制度和政策体系。(郭工)

中国石化供应商

锡安达防爆电机  
与世界同进步

电话:0510-83591888 83591777  
网址: http://www.xianda.com  
单位:江苏锡安达防爆股份有限公司