

微藻固碳与生物能源技术发展分析

王琳 朱振旗 徐春保 刘敏胜

(新奥科技发展有限公司 煤基低碳能源国家重点实验室,河北 廊坊 065000)

摘要 微藻固碳与生物能源技术因兼具二氧化碳(CO₂)减排、可再生能源生产、环境治理及粮食补给的独特优势,日益受到各国政府和业内学者的高度关注。笔者阐述了微藻固碳与生物能源技术的研发历程与发展趋势,分析了该产业的进步对各国摆脱发展窘境和中国加快特色经济建设的促进作用,回顾了我国在该领域的研发部署及成就,并对“十二五”期间我国在微藻固碳与生物能源领域的技术发展方向进行了展望。

关键词 微藻; 生物能源; 固碳

中图分类号 S 216

文章编号 1007-4333(2012)06-0247-06

文献标志码 A

Analysis of CO₂ consolidation and bioenergy production via microalgae

WANG Lin, ZHU Zhen-qi, XU Chun-bao, LIU Min-sheng

(State Key Laboratory of Coal-based Low Carbon Energy, ENN Science & Technology Development Co. Ltd., Langfang 065000, China)

Abstract Microalgae technology for carbon consolidation and sustainable bioenergy production has been focused by governments, academia and industries of many countries due to its unique advantages, including CO₂ sequestration, renewable energy production, and environmental remediation. This paper summarized an overview of the published research and development in microalgae technology. Related investigations of microalgae technology in China has been reviewed. An outlook for the development directions of China's microalgae technology during the Twelfth Five-Year Plan period has been discussed.

Key words microalgae; bioenergy; carbon consolidation

微藻是一类光合效率高、产油能力强的单细胞低等植物。目前,地球上存活的微藻已超过 20 万种,藻类(包括大型海藻和微藻)每年可固定 CO₂ 约 0.95×10^{11} t,占全球净光合作用产量的 47.5%;其产量远高于大豆和麻风树籽,含油率可达 50% 以上,被公认为是最具发展潜力的第三代生物能源原料。在碳元素循环和能量品位提升中有着举足轻重的地位。

微藻固碳与生物能源技术是利用微藻吸收工、农业生产过程中排放的 CO₂ 废气,并通过其自身光合作用机制将 CO₂ 转化为脂类和糖类及蛋白等细胞组分。细胞中饱和脂类经一系列物理及化学过程将进一步转化为生物液体燃料(如生物柴油和生物

航煤等),而多不饱和脂类、多糖和蛋白等可作为营养补充剂或饲料添加剂应用于食品、保健及饲料行业。该技术实现了 CO₂ 资源化利用,不仅可与沙荒地综合利用及工、农业废水治理相结合实现工业化生态减排,还可与农、牧、渔业相辅相成形成区域性绿色循环经济。同时兼顾国家利益(CO₂ 减排、能源安全和粮食安全)和地区效益。

1 微藻固碳与生物能源技术历经考验是时代发展的必然趋势

在人类追求经济迅猛发展的同时,温室效应和能源危机也接踵而至,正威胁着全球安全。CO₂ 捕集与利用已成为多国政府关注的重点。一方面,从

收稿日期:2012-06-27

基金项目:国家能源应用技术研究及工程示范项目(NY20111103-1)

第一作者:王琳,工程师,主要从事微藻后处理及产业化放大技术研究,E-mail:wanglinh@enn.cn

京都议定书到哥本哈根会议,减排已成为全人类公认的共同使命;我国也制定了2020年单位国内生产总值CO₂排放量比2005年下降40%~45%的减排目标^[1],已将节能减排提上日程。同时,国际航空运输协会作为全球航空业的代表,提出“到2020年每年燃效提高1.5%,从2020年起通过碳中和增长稳定碳排放量,在2050年碳的净排放量比2005年减少50%”的三大减排目标^[2];欧盟从2012-01-01起对所有在欧盟境内飞行且未使用生物航煤的航空公司予以碳排放量限制,或征收“绿色买路钱”;中国民航总局在2011年4月出台了《关于加快推进节能减排工作的指导意见》明确指出,在未来数年中国民航业要全面建立适应国际节能减排发展趋势的技术和管理体系,到2020年我国民航单位产出能耗和排放比2005年下降22%,达到航空发达国家水平^[3]。另一方面,加拿大、巴西、比利时和奥地利等国,纷纷制定了生物柴油强制性添加政策;我国在2007年9月发布的《可再生能源中长期发展规划》中宣布了“2020年生物柴油年利用量将达到200万t”^[4]的宏伟目标。

在CO₂减排和新兴生物能源生产的双重压力下,微藻固碳与生物能源技术因能同时满足“固碳”和“产能”需求而备受瞩目。

1.1 微藻固碳与生物能源技术国际研发历程与现状

国外对微藻固碳与生物能源技术的研发起步较早,并历经起伏。1950年,美国麻省理工学院在校园内建筑物的屋顶开始进行养殖藻类生产生物燃料的试验,并在研究报告中第一次提到微藻生物能源;1978年,受第一次石油危机的影响,美国能源部可再生能源国家实验室启动了历时19年、耗资2505万美元的水生物种项目(Aquatic Spices Program,简称ASP项目)的研究,研究内容从微藻筛选、微藻生化机理分析、工程微藻制备到中试。该项目筛选出300余株产油藻种,重点开发适于微藻生物柴油生产的培养系统和制备工艺;上世纪90年代,日本国际贸易和工业部投资25亿美元,支持了一项“地球研究更新技术计划”,着力开发密闭光合生物反应器技术,利用微藻吸收火力发电厂烟气中的CO₂来生产生物质能源,筛选出多株耐受高浓度CO₂、生长速度快、可高密度养殖的藻种,建立了光合生物反应器的技术平台以及微藻生物质能源开发的技术方案。后来由于90年代后期油价大幅降低,而微藻生物能源的关键技术未获突破,成本过高,国际微藻固

碳与生物能源技术研究处于停滞状态。但进入21世纪,石油价格再度大幅上扬,人们对未来化石能源供应短缺普遍感到担忧,再加上对“使用化石能源导致全球气候变暖”的普遍认知,微藻固碳与生物能源技术重新受到高度关注,多国政府、研究机构、高校与大公司等纷纷投入巨资,以期占领战略制高点和实现技术垄断。此阶段微藻固碳与生物能源技术的研究工作取得了新进展,逐步从实验室走向中型规模验证和生产放大阶段。2002年,美国圣地亚国家实验室在Live Fuels公司资助下,利用分子生物学反应工程技术进行增加微藻细胞含油量和产量方面的研究,历经5年制取出了性能类似大豆油的海藻油,其研究表明,仅需美国土地面积的0.3%就可生产出满足全美国需要的运输燃料。2005年12月,第一辆采用海藻燃料和大豆油(调合体积比为1:9)的示范轿车在印度成功完成了1500 km的实车试验,开辟了微藻生物能源在交通运输领域应用的新纪元。随着微藻固碳与生物能源技术的不断发展,人们对其应用领域又进行了新的探索,将关注点转向航空业。美国国际能源公司(International Energy)于2007年11月启动“海藻变油”研发计划,从基于海藻的光合成来生产可再生柴油和喷气燃料;Solazyme利用异养法养殖高含油微藻,炼制出的微藻生物航油已成功用于试飞。国际航空界普遍认为:随着微藻固碳与生物能源技术的不断成熟和其在航空领域优势的日益显现,微藻生物能源终将成为世界航空领域重要的能源供应体系。

我国微藻固碳与生物能源技术研究起步较晚,但近几年随着国际趋势的推动和专家学者对该领域的关注,我国微藻固碳与生物能源技术也取得了快速进展。在新奥集团搭建的微藻能源联盟框架下,依托我国已有的藻种资源和生理生态学等研究基础,拥有了一批具有自主知识产权的产油藻株。自“十一五”开始布局以生物能源生产为目标的微藻能源研究以来,新奥集团和暨南大学、中科院海洋所、过程工程所、青岛生物能源与过程所,以及清华大学和华东理工大学等众多科研单位相继开展了微藻生物能源技术研究。目前,我国在高产油藻种的选育与改造、高效微藻光反应器、高密度培养、高效加工等技术研究方面有了显著进步。

尽管当前我国微藻固碳与生物能源技术研究水平基本与国际同步,部分领域研究思路和进展甚至领先,但所做工作主要集中在上游,对工艺的研发还

基本处于实验室阶段,为数不多的拥有中试系统的企业也和国际微藻行业一样面临“高成本”与“难量产”的产业化瓶颈。要实现微藻生物能源商业化生产,必须以“高光效”、“低成本”为核心,以微藻代谢机理为基础,深入问题本质,在藻种技术、养殖技术、采收与提油技术的低成本、产业化放大等方面取得重大突破。

1.2 微藻固碳与生物能源产业国际发展现状与趋势

在“节能减排”及“低碳环保”的时代要求与历史责任驱动下,许多国家在“温室气体回收”和“绿色替代能源开发”等方面都付出了不懈努力,积极寻求一种可同时解决 CO₂ 排放和能源问题的可持续发展途径。微藻作为工业化固定 CO₂ 的有效方法和清洁能源的载体,已成为各国研究开发重点。

各国政府为加速微藻固碳与生物能源技术产业化进程,对该技术研发给予大力资金及政策支持。美国作为微藻固碳与生物能源技术的传统强国,政府支持不遗余力,2010年美国能源部为微藻生物能源的研发和产业化示范投入了近1亿美元,美国农业部也拨付了超过1亿美元支持微藻生物柴油的生产并指出应将更多研发资金用于支持藻类和油料作物开发;2011年8月,美国政府宣布未来3年中,美国农业部、能源部和海军将投资5.1亿美元,与私营部门开展合作,生产用于军事和商业运输的航空与海洋生物燃料;2012年2月,奥巴马宣布能源部当年将投入1400万美元用于藻类交通燃料的开发^[5],至此主要由美国能源部支持的藻类生物燃料项目已超过30个。欧盟亦着手加强藻类生物能源研究,2011年11月,欧盟投入1400万欧元支持一项藻类生物能源合作研究计划(Energetic Algae, EnAlgae),该项目由欧盟6个成员国(英国、比利时、德国、法国、爱尔兰和荷兰)的19个大学、研究机构、产业协会和企业等共同参与。印度、巴西、南非等国政府也纷纷在政府主导下,组织本国机构、公司进行微藻生物能源的研发和产业化示范,2011年6月,EADS、欧洲直升机公司和阿根廷一家生物燃料公司在巴西宣布达成协议,将合作开发商业规模藻类生物燃料项目;同年11月,印度九个国家实验室开始进行由微藻生产生物柴油的可行性研究,参加其启动会议的一些国外客户还包括美国能源部、丰田汽车、戴姆勒汽车和通用汽车等单位;同年12月,智利投资超过1430万美元在沙漠地带利用微藻生产生物柴油。与此同时,我国也对微藻生物能源予

以了持续支持和高度重视:近年来中国政府已投入亿元左右用于支持微藻生物能源技术开发,2011年11月,在“十二五生物技术发展规划”中明确指出“研究开发微藻生物固碳核心关键技术,建立年固定 CO₂ 总量超过万 t 的工业化示范系统,率先在国际上首次实现微藻固碳的产业化”^[6]。

各国政府为保障民用、军用能源安全,对生物航海、航空燃料,特别是微藻航海、航空燃料的开发和试用予以高度关注。2011年,美国国防部后勤署签署了170万L(45万加仑)生物燃料(混有藻油)购买合同,将交与海军用于开发以生物燃料为驱动的船只;美国军方也制定了“到2020年微藻生物柴油在军用飞机、舰船中的添加比率达到50%”的发展目标。同时,由于生物燃料清洁、可再生,已被视为当前航空业摆脱减排与能源困境的唯一选择。自2008年开始,美国、德国、巴西、新西兰等纷纷开展了以大豆、麻风树果等为原料的航空生物燃油研发及试飞实验;此后,美国和欧洲加大了对微藻生物航油研发与试用的投入,继波音公司加载微藻航空生物航油完成首航后,2010年6月欧洲第一架使用微藻航油的DA42型飞机在柏林航空展上进行了首航^[7]。近年来中国也在生物航油领域进行了积极探索,已于2011年10月由中国国航、中国石油、波音公司和霍尼韦尔UOP公司、普惠公司等各方共同合作完成了麻风树生物航油的首次试飞^[8];2012年2月末中石化向中国民用航空局正式提交了以餐饮废油为主要原料的生物航油适航审定申请,并获得受理^[9];目前新奥集团正在为准备我国微藻生物航油首航,与空客、中石化等单位开展密切合作。

2 微藻固碳与生物能源技术造福人类是社会发展的必然选择

2.1 微藻固碳与生物能源技术的开发,有利于世界各国应对发展窘境

在温室效应、能源危机和粮食问题并存的国际局势下,各个国家都在积极寻求可持续解决方案。针对温室效应,各国在 CO₂ 填埋、CO₂ 生物转化等方面进行了不懈探索;针对能源危机,各国在核能、风能、水能、潮汐能和生物能等领域开展了规模化实践;针对粮食问题,各国在粮食增收、农副产品增产与开发方面,也进行了不断尝试。总体而言,人类在各个问题上均取得了可喜进展,并可在一定程

度上缓解上述危机。然而,人类探寻真理、追求卓越的理想并未因此而驻足。随着微藻固碳与生物能源技术的逐步发展,人们对该技术的认知度亦在不断提升。微藻固碳与生物能源技术集 CO₂ 减排、可再生能源和营养藻粉生产于一体,可同时缓解温室效应、能源危机和粮食问题,真正实现工业 CO₂ 资源化利用,是适合当前国际新能源行业发展的新兴战略型产业。

开发应用微藻固碳与生物能源技术,可满足全球 CO₂ 减排需求。微藻固碳能力强,每生成 1 t 微藻干物质可吸收 2 t CO₂。所吸收 CO₂ 在微藻体内能够转化为其细胞组分,且各组分经进一步分离提取后还可制成多种微藻产品,全过程安全、稳定。与植物/森林固碳相比,微藻生长迅速(10~20 h 繁殖一代)单位面积固碳能力更强,且不受质地条件制约,在不利于植物生长的沙荒地、盐碱地及滩涂地区仍然可实现微藻规模化养殖;与填埋固碳相比,微藻固碳可实现对重度污染源就地减排,无需 CO₂ 压缩、运输投入,且不存在日后泄漏隐患。可见,微藻固碳是一种安全经济的天然减排手段,对缓解重工业迅猛发展带来的温室效应具有重要意义。

开发应用微藻固碳与生物能源技术,可满足各国能源安全需求。微藻产油量高,细胞含油量可达自身干重的 50% 以上。可通过规模化养殖微藻,实现能源原料的持续稳定供给。与核能相比微藻能源投资少、危险小、应用范围广(微藻液体燃料可广泛应用于民用交通业);与风能、水能和潮汐能相比,微藻能源持续稳定,不受特定自然资源限制;与麻风树能源、大豆能源相比,微藻能源产油量更高、便于机械化操作,且不与入争粮、不与粮争地。可见,微藻能源是一种持续稳定、应用广泛的生态能源,对缓解能源危机、保障能源安全意义重大。

开发应用微藻固碳与生物能源技术,可满足贫困国家粮食需求。微藻生长速率快,富含蛋白、淀粉、油脂,且不同种类还会含有多不饱和脂肪酸、抗氧化剂及多糖等高质量特殊营养组分,可满足人类日常营养物摄取要求,个别种类还可作为特殊营养素补充剂。与传统农作物相比,微藻产量更高,不受土地资源限制,在沙漠、荒地、滩涂上均可实现规模化生产,特别适合耕地稀少、土地贫瘠、人口众多的贫困国家。可见,微藻是一种产量高、营养丰富、易于“种植”的粮食来源,对帮助落后国家摆脱贫困、保障粮食安全意义非凡。

2.2 微藻固碳与生物能源技术的开发,有利于我国特色经济发展

大力推进微藻固碳与生物能源技术产业化,是实现我国“2020年单位国内生产总值 CO₂ 排放量比2005年下降 40%~45%”和“2020年生物柴油年利用量达到 200 万 t”宏伟目标的必要保障。当前,我国正处于实施“十二五”规划的关键时期,开发适合我国国情的微藻固碳与生物能源技术,将更有利于中国特色社会主义经济快速蓬勃发展。

1) 微藻固碳与生物能源技术的开发,可与沙荒地综合利用相结合。我国约 16% 的国土被沙漠覆盖,主要分布在西北和北部地区;同时我国富煤少油,在沙漠地带恰有丰富煤炭资源。由于煤炭不便于运输,不少省份支持“就地转化”以带动当地经济发展、增加就业机会。因此在我国沙漠及沙荒地,多煤电、煤化工等 CO₂ 重排企业。微藻固碳与生物能源技术,不与农争地,可利用工业 CO₂ 及部分废水在沙漠/沙荒地开展微藻规模化养殖,生产生物能源及饲料等微藻产品。在实现 CO₂ 资源化利用的同时,缓解了沙漠/沙荒地利用与废水治理问题。

2) 微藻固碳与生物能源技术的开发,可与绿色循环经济发展相结合。我国是传统型农业大国,渔业、禽畜养殖业成“小聚居”特点分布,多以“区域性”经济模式发展。养殖业聚集区内禽畜排泄物的集中处理,一直是困扰养殖户及当地环保部门的一大难题。近年来随着“沼气下乡工程”的逐步推广,才使这一问题得以缓解。微藻固碳与生物能源技术,因地制宜,可利用农业 CO₂ 废气(沼气中分离出的 CO₂)、废水(发酵沼液)进行微藻规模化集中或/农户分散式养殖,生产动物饲料,就地自产自销,形成区域性绿色循环经济。

3) 微藻固碳与生物能源技术的开发,可与传统工业改造相结合。我国“十二五”规划中制定了加速“传统工业改造”的发展目标。我国已进入后工业时代,传统工业模式已无法满足社会发展要求。但在一定时期内,传统工业仍是支持社会经济发展的中坚力量,因此要对其进行改造,以扬长避短、实现平稳过渡。微藻固碳与生物能源技术,可与现有发电厂、炼钢厂、化工厂等 CO₂ 排放大户结合,利用工业 CO₂ 废气进行微藻规模化养殖,生产生物能源。在确保企业原有生产力的情况下,实现“产能减排”以满足现代工业要求。

总之,我国微藻固碳与生物能源技术的发展要

与资源分布、经济发展特性和产业发展规划相匹配，从而在推进该技术产业化的同时，实现我国经济可持续增长。

3 我国在微藻固碳与生物能源领域的研发部署及未来发展方向

3.1 微藻固碳与生物能源领域的已有部署及主要成就

在全球微藻研发热潮持续高涨的形势下，我国也对微藻固碳与生物能源技术予以了高度关注，近年来，国家依托 973 项目“微藻能源规模化制备的科学基础”、863 项目“CO₂-油藻-生物柴油关键技术的研究”、863 项目“生物质高效转化与生物炼制”子课题、国家科技支撑计划“微藻二氧化碳减排技术研发及示范”和“能源微藻育种与高效生产关键技术研究及示范”、国际科技合作项目“面向中美先进煤炭技术合作的新一代煤转化与发电技术”子课题和国家能源局项目“利用 CO₂ 养殖微藻的综合利用技术研究及示范”等，已相继投入亿元左右用于支持我国“微藻固碳与生物能源全套技术”的基础研究、应用技术研究及工程示范。

2010 年，国家能源局为推动我国微藻生物能源技术发展，批复了第一个微藻生物能源产业化示范工程——“微藻固碳制生物质能源示范项目”（国能科技[2010]204 号）。同时，国家发改委在资金方面也对该项目予以了大力支持。该工程由新奥集团承担，建于内蒙古鄂尔多斯达拉特旗新奥煤基低碳循环经济产业基地沙荒地上，利用新能能源有限公司 60 万 t 甲醇/40 万 t 二甲醚装置排放的 CO₂ 和工业废水，规模化养殖能源微藻，联产以生物柴油为主的微藻产品。该项目目前已完成一期建设，并已投入研发及运营实践，发现并解决了“微藻固碳与生物能源技术”放大过程中呈现出的问题，获得了详实的工程设计及现场实践数据，为项目后期建设提供了经验保障。该项目的实施对“微藻固碳与生物能源技术”的放大与转化具有重大意义，是我国微藻能源技术面向产业化的第一次实质性迈进。

3.2 “十二五”期间微藻固碳与生物能源领域的技术发展方向

开发非粮生物液体燃料是当今国际能源界发展的必然趋势，微藻生物能源以 CO₂ 为资源、非农耕地利用为基础、可实现工业化稳定生产，具有原料来源稳定、可持续性、品质可控、应用广泛等优势，已

成为世界各先进国家的研发与产业化推进热点。我国相关工作起步较晚，但技术水平已进入世界前列。未来几年微藻固碳与生物能源技术要以“高光效”、“低成本”为核心，以微藻代谢机理为基础，深入问题本质，在低成本藻种技术、养殖技术、采收与提油产业化技术等方面取得重大突破。

1) 藻种技术。利用诱变育种技术对藻种生产性和抗逆性进行定向筛选，并采用基因工程方法对光合、脂肪酸合成等相关基因进行特异性改造，从而改变藻种原始代谢特性。培育出生长速率高、含油量高、抗(病虫害及杂藻)污染能力强，可适应极端气候、可耐受高浓度工业 CO₂ 废气的产业化藻种。

2) 养殖技术。采用代谢调控方式对藻细胞代谢途径和代谢速度进行定向调节，并利用工农业 CO₂ 废气、沙荒地和工业废水进行微藻规模化养殖，从而提高养殖产量、降低生产成本并综合提高社会效益。开发出水耗低、产量高、稳产性好的工业化连续养殖工艺。

3) 采收与提油技术。采用电、磁、絮凝剂等物理及化学方法对藻细胞进行预处理，并结合现有工业化分离设备进行收集浓缩，从而降低过程运行成本。开发出回收率高、能耗低、可操作性强、易于放大的连续收集技术。

利用物理及化学手段对湿藻泥进行预处理，并采用多项多级萃取工艺，以提高提取效率。开发出提油效率高、质量稳定、油品好、能耗低、溶耗低、污染少、易于工业放大的湿藻提油工艺。

4) 生物燃料转化技术。开发转化率高、品质稳定、工艺简单、环境友好的工业化生物燃料转化技术，逐步开发生物柴油、生物航煤等多种生物液体燃料。

4 结束语

微藻固碳与生物能源技术的先进性与发展前景已在全球范围内受到广泛认可。西方发达国家出于抢占新能源技术制高点和保障能源安全考虑，均在大力支持本国微藻生物能源产业的迅速发展。我国正处于该项技术面向产业化发展的关键时期，一方面国家要加快制定微藻生物能源发展战略，加大科技支持力度，尽快建立产业扶持政策；另一方面科研院所和企业研究机构要明晰技术实施路径、构建广泛的产学研联盟，加速实现技术突破。从而打造出具有中国特色的微藻生物能源新兴战略性产业，实现社会经济的可持续发展。

参 考 文 献

- [1] 朱永斌. 到 2020 年中国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%[EB/OL]. (2009-11-26)[2012-6-18]. <http://news.xinmin.cn/rollnews/2009/11/26/2984457.html>
- [2] 梁爽. 生物燃料能否撑起机翼[EB/OL]. (2010-12-06)[2012-6-18]. http://news.youth.cn/sdbd/201012/t20101206_1420443_2.htm
- [3] 张宁. 我国航空运输业节能减排仍需推进[EB/OL]. (2012-6-18) [2012-6-20]. http://finance.eastmoney.com/news/1345_20120618211436513.html
- [4] 郭泽德. 2007 年中国生物能源发展 10 大关键词(下)[EB/OL]. (2007-12-21) [2012-6-20]. <http://finance.gansudaily.com.cn/system/2007/12/21/010555372.shtml>
- [5] 毛开云, 彭博社. 美国将为藻类生物燃料投资 1400 万美元 [EB/OL]. (2012-3-19) [2012-6-20]. <http://www.hyqb.sh.cn/publish/portal0/tab1172/info8005.htm>
- [6] 李永强. “十二五”生物能源技术主攻方向确定[EB/OL]. (2011-12-12) [2012-6-20]. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2011-12/12/content_975787.htm
- [7] 朱洪波. 海藻制航油飞行获成功[EB/OL]. (2010-7-9) [2012-6-20]. http://enews.sinopecnews.com.cn/shb/html/2010-07/09/content_113453.htm
- [8] 沈欣. 中国国航成功进行国内首次航空生物燃料试飞[EB/OL]. (2011-10-31) [2012-6-20]. http://www.syntao.com/PageDetail.asp?Page_ID=14521
- [9] 李海燕. 民航局受理中石化生物航油适航审定申请[EB/OL]. (2012-2-29) [2012-6-20]. <http://www.caacnews.com.cn/news2011/newsshow.aspx?idnews=185805>

责任编辑: 苏燕