

海水螺旋藻产业发展战略研究*

The Strategic Studies on Developing Industry of Seawater *Spirulina* with Efforts

向文洲^{1**},李涛¹,吴华莲¹,王兵²,王广华¹,戴世鲲¹,何慧^{3**}

XIANG Wen-zhou¹,LI Tao¹,WU Hua-lian¹,WANG bing²,Wang Guang-hua¹,DAI Shi-kun¹,HE Hui³

(1. 中国科学院南海海洋研究所,中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室,广东广州 510301;2. 深圳海王药业有限公司,广东深圳 518057;3. 广州市海怡康生物科技有限公司,广东广州 501301)

(1. Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong, 510301, China; 2. Shenzhen Neptunus Pharmaceutical Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518057, China; 3. Guangzhou Haiyikang Biotechnological Co., Ltd., Guanzhou, Guangdong, 510301, China)

摘要:回顾我国海水螺旋藻产业的发展历程,并综述海水螺旋藻的优势,产业化过程中出现的主要问题,海水螺旋藻养殖新进展和海水螺旋藻的发展经验,展望海水螺旋藻养殖开发的前景,提出海水螺旋藻未来产业发展的新战略,为我国更好地发展海水螺旋藻提供参考。

关键词:海水螺旋藻(节螺旋藻) 产业化养殖 CO₂ 综合利用 战略

中图分类号:Q949.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2014)06-0573-07

Abstract: In this paper, the history of developing the industry of seawater *Spirulina* was reviewed. The advantages of seawater *Spirulina*, the main problems encountered in its industrialization, and the new progresses in its cultivation and utilization of its resource were over-viewed. The experience in developing the industry of seawater *Spirulina* was summarized. The development trend and the strategies of developing the industry of seawater *Spirulina* were proposed. All above focused on a purpose to provide technological advice for better developing the industry of seawater *Spirulina* in China.

Key words: seawater *Spirulina* (*Arthrospira*), industrialized cultivation, CO₂, comprehensive utilization, strategies

收稿日期:2014-10-10

作者简介:向文洲(1967-),男,研究员,主要从事微藻生物技术研究。

* 海洋经济创新发展区域示范专项(SZHY2012-B01-003),国家科技计划项目(2013BAD10B04-1)和海洋公益项目(201305018-3)资助。

** 通信作者:向文洲;何慧(1964-),女,助理研究员,主要从事藻类产品开发等方面的研究,E-mail:gz_beh@hotmail.com。

螺旋藻是一种开发价值极高的新资源微藻。螺旋藻产业于20世纪80年代初在国际上兴起,80年代末90年代初,我国开始进行螺旋藻产业化技术攻关,90年代中期,已成为国际上最大的螺旋藻产业国^[1,2]。

海水螺旋藻是指利用自然海水为基质培养的螺旋藻。利用自然海水培养螺旋藻的初衷是降低培养成本,但进一步研究发现,自然海水培养螺旋藻可以提高其活性物质的产量,增加细胞的抗逆性,并有效避免重金属离子富集与超标。20世纪90年代初,中

中国科学院南海海洋研究所与深圳海王集团合作,建立了国际上第一个海水螺旋藻产业化基地^[1,2]。

近年来,国际上兴起了微藻固碳减排、能源开发和资源利用的热潮,螺旋藻产业经验将成为发展微藻产业的重要借鉴^[3,4]。本文针对我国海水螺旋藻的研发历程,海水螺旋藻的优势、产业化过程出现的主要问题,以及海水螺旋藻养殖及其资源利用的新进展等方面进行综述,旨在为更好地发展海洋微藻生物技术产业提供参考。

1 生物学特性及养殖技术发展概况

螺旋藻(*Spirulina*)属于蓝藻门(Cyanophyta)、段殖藻目(Hormogonales)、颤藻科(Oscillatoriaceae)、螺旋藻属(*Spirulina*),螺旋藻已改名为节螺旋藻(*Arthrospira*)并得到国际上的正式认可,但由于螺旋藻(*Spirulina*)这一名称已在世界范围内广泛使用,因此这一名称仍然沿用至今,而在许多学术文献中,两种名称往往被同时使用。目前,用于商业化生产的螺旋藻物种主要有钝顶螺旋藻(*S. platensis*)和极大螺旋藻(*S. maxima*),其中前者的应用更为广泛^[5]。

研究发现,螺旋藻含有60%~71%的蛋白质以及其他丰富而独特的生物活性物质,如 γ -亚麻酸、藻蓝蛋白、 β -胡萝卜素、肌醇、螺旋藻多糖、维生素B₁₂等。螺旋藻含有大量矿物质,可以作为硒、铬等微量元素富集和有机化的载体。螺旋藻具有抗艾滋病、抗肿瘤、抗氧化、抗辐射、抗衰老、改善肠胃功能、降血脂等多种药理活性,已成为一种国际公认的超级营养与保健食品^[6,7]。

螺旋藻在高碱性淡水湖泊等特定的自然环境中可大量繁殖并形成藻华,丝状藻体易采集。墨西哥Aztec和非洲Chad湖地区的土著居民将螺旋藻作为食物已有400多年的历史。20世纪60年代以来,螺旋藻的丰富营养保健成分和功能被逐步发现。螺旋藻生长速度快,同时具有高碱、高pH值、强光和高温适应性,这些特性既是其自然水华形成的生物学基础,也是建立室外开放池人工养殖的重要保障。特别是利用高碱、高pH值适应性,采用高浓度碳酸氢钠培养螺旋藻,是其在自然环境中避免敌害生物污染,实现产业化生产的关键^[5,6]。

80年代初,墨西哥在Texcoco湖建立了国际上第一个螺旋藻产业化基地,此后,螺旋藻大规模养殖技术逐步在全球范围内得以推广^[5,7]。自20世纪80年代初期开始我国开展螺旋藻养殖技术研究,90年代初期进入产业化推广阶段,至90年代中期,我国螺

旋藻养殖面积达到200万m²,年产能达2000t,受市场和技术的影 响,实际最高年产量接近1000t,自此成为国际上最大的螺旋藻生产国^[8,9]。

目前,我国螺旋藻生物质年生产能力约1.5万t,每年的实际产量受市场需求变化及气候的影响较大,最近几年,螺旋藻产量在数千吨至1万t之间波动。螺旋藻产品在食品、医药保健及饲料添加剂等领域得到了广泛应用。

2 养殖技术的研发背景和发展历程

2.1 从藻种筛选到产业化

在螺旋藻实现产业开发的早期阶段,国际上就开始关注螺旋藻的海水养殖技术。由于海水富含各种营养元素,海水培养基仅需在天然海水中添加碳、氮、磷、铁等4种元素即可满足螺旋藻的生长需求,大幅度减少养殖肥料用量,降低培养成本^[10]。此外,研究发现,螺旋藻对海水高盐度及高浓度钙镁离子具有良好的适应性,并在高盐度环境中保持较好的优势种地位,减少其他生物污染。淡水资源和陆地耕地资源日益紧缺也是发展螺旋藻海水养殖技术的另一个主要原因^[1,5,11]。螺旋藻产业化开发的早期阶段,企业和研究机构多以碳酸氢钠作为螺旋藻生长的碳源,以碳酸氢钠作为碳源面临的主要问题之一是“如何避免碳酸氢钠与海水中钙、镁离子形成沉淀”,钙镁离子形成沉淀导致碳的浪费,此外,钙镁沉淀对螺旋藻生长具有明显的遮光抑制作用。如在培养前去除海水中过量的钙、镁离子,可以减少螺旋藻生长期内的钙、镁沉淀^[12]。研究表明:海水中的钙离子可引起极大螺旋藻的藻丝粘聚。20世纪80年代末至90年代初,国内外相继有海水螺旋藻实现室外大量培养的报道^[13,14],但国外多个从事海水螺旋藻研究的实验室并没有将工作延续下去,主要原因可能是(1)没有筛选到适应海水生长的藻种;(2)海水适应藻种的生长特性较淡水原种差;(3)海水组成元素所节省的肥料成本有限,钙镁离子沉淀所导致的碳源损耗远大于海水节省的肥料成分^[1,2,12]。

我国在“七五”计划期间,已将螺旋藻等微藻的养殖技术列入了国家科技攻关计划。中科院南海海洋研究所承担了螺旋藻海水适应藻种的选育、海水螺旋藻大面积培养及规模化中试养殖技术的任务,在海水螺旋藻养殖开发及其资源利用方面进行了一系列开拓性工作,有关研究得到了曾呈奎院士的直接指导和支持^[15]。该团队从国外引进的淡水螺旋藻中,筛选出了多株适宜在海水培养的螺旋藻株系,其中包括极大螺旋藻(*S. maxima*)的海水适应藻株,说明适应

海水高盐度,以及高钙镁浓度的特性并非局限于钝顶螺旋藻(*S. platensis*)这一特定藻株。海水钝顶螺旋藻 SCS 展现出良好海水适应性和生长能力,特别是在强光和高温条件下,海水钝顶螺旋藻 SCS 的生长特性显著优于淡水原种^[16,17]。以海水钝顶螺旋藻 SCS 为藻种,中科院南海海洋研究所逐步开展了亚热带和热带地区的小试生产和规模化培养研究。1990年,海水螺旋藻 SCS 藻株完成了 113 m² 大面积生产试验,达到了 12.0 g·m⁻²·d⁻¹ 的单位面积生物物质产率,随后完成了 3000 m² 规模化培养,连续 84 d 的平均产量达到 10.28 g·m⁻²·d⁻¹。1992年,我国成功地建成了国际上第一个(全)海水螺旋藻产业化基地。随后的产业化生产中,海水螺旋藻的面积产量达到 7~10 g·m⁻²·d⁻¹(见文献[1,2,14,16,18])。

2.2 海水螺旋藻的优点

采用海水培养螺旋藻具有以下优点:可以开发荒芜滩涂和利用取之不尽的海洋水资源;海水含有大量的矿质营养元素,可减少肥料用量;海水具有良好的缓冲特性,更易稳定培养液的 pH 值;海水培养基可长期循环使用;海水藻种对强光、光氧化和高温具有更强的适应能力,在热带气候条件下,海水螺旋藻的质量比淡水螺旋藻显著提高,如藻蓝蛋白、可溶性多糖、肌醇、微量元素含量更丰富;海水螺旋藻具有更强的抗光氧化和抗高温能力,可以利用结构简易的封闭式光生物反应器系统进行培养,从而大幅度提高室外培养的体积产率,降低光生物反应器的构建与培养成本^[2,18,19]。

我国螺旋藻行业先后出现了多起螺旋藻产品“微囊藻毒素”和重金属(主要是铅元素)超标等公共安全事件^[20],虽然目前已证明部分事件不排除媒体误读或炒作的因素,但我国的确有少部分螺旋藻企业长期存在或潜在蓝藻毒素和重金属超标两方面的问题。研究表明,微囊藻对盐度极为敏感,微囊藻在高盐度的海水中无法生存,同时海水中大量的二价钙、镁离子可以拮抗同为二价重金属阳离子(Pb、Hg)元素的富集。因此,在海水螺旋藻实现产业化的 20 多年中,规模化生产中尚未出现微囊藻污染和重金属元素超标的现象,这也是海水养殖螺旋藻的突出优势之一^[20]。

从目前国内外的报道来看,除中科院南海海洋研究所与深圳海王集团合作生产全海水培养的螺旋藻,国内其它企业及国外企业生产的螺旋藻几乎均为淡水螺旋藻,仅有美国夏威夷公司宣称拥有“海水螺旋藻技术”,但据了解,该技术实际上仅仅添加约 30% 的海水,70% 的基质为淡水,因此,尚不是真正的全海

水螺旋藻。中科院南海海洋研究所还相继以产业化的海水螺旋藻为原料建立了海水藻蓝蛋白、海水螺旋藻多糖、富硒海水螺旋藻、富硒海水藻蓝蛋白的中试制备技术,并制定了“海水藻蓝蛋白”企业标准,该机构及其合作企业的海水螺旋藻产品已进入市场销售^[18]。

目前,国内外仍有多个实验室开展海水螺旋藻的研究,但大多尚处于藻种筛选、生理生化特性的比较等方面的探索研究,尚未见开展规模化生产的报道^[21~25],说明我国在海水螺旋藻养殖开发领域仍处于国际领先地位。

2.3 养殖开发存在的主要问题

海水螺旋藻在中试和小规模试验性生产阶段,由于试验周期较短(2~3个月)、新鲜海水良好的缓冲性,以及对营养盐的添加方式与剂量的控制,能够较好地稳定培养液的 pH 值(扩种阶段低于 10.0,生产期不超过 10.5),有效减少钙、镁沉淀的形成。即使有少量的钙、镁沉淀,由于叶轮搅拌混动效果差,反而能较好地将沉淀与藻细胞分离,没有形成明显的遮光抑制作用,海水螺旋藻在产量、质量和成本等方面的表现良好^[1,2]。

在较大规模的跑道池中,随着培养周期的延长(5~12个月)、培养基循环的次数增多、以及新鲜海水培养基的补加量减少,跑道池中培养物的 pH 值达到 10.5~10.8,钙、镁沉淀问题开始呈现并逐渐严重,虽然沉淀与藻细胞可以较好地分开,对海水螺旋藻的产量和品质没有明显影响,但沉淀造成的碳源浪费却难以避免。

海水螺旋藻养殖开发中遇到的另一个主要问题是难以克服台风的影响。虽然这一问题对淡水螺旋藻的养殖也存在较大影响,但对海水螺旋藻养殖的影响通常会放大数倍。台风暴雨使培养基盐度大幅降低(甚至接近 0‰),藻细胞渗透压的变化导致细胞生理异常、生长变缓,部分藻细胞破裂死亡,引起其他微生物的污染(如轮虫等),短时难以恢复,有时甚至使培养完全失败。

在我国螺旋藻产业发展的早期和中期阶段,由于养殖技术不完善,螺旋藻生物物质产量低和品质不稳定,成为限制螺旋藻产业发展的关键因素^[26],即使经过精心管理,单位面积生物物质产量也只能达到 15~19 g·m⁻²·d⁻¹。而在商业规模化养殖中的产量还不到该产量的一半^[10,27],我国螺旋藻的面积产率甚至还要低,尤其是绝大多数螺旋藻企业对碳酸氢钠的过量使用,导致成本过高^[1,8]。因此,在相当长一段时间内,海水螺旋藻虽然在养殖成本与淡水螺旋藻相

当,但是由于其良好的品质,海水螺旋藻产品仍然在市场上获得了良好的口碑,藻粉市场售价长期保持在8~12万元/t的较高价位。

自2007年来,我国螺旋藻产业的整体技术水平明显提高,其中,最为显著的是养殖碳源成本的控制技术发展迅速,特别是近5年来,许多淡水企业建立了替代碳酸氢钠的CO₂补充技术,采取了多种策略大幅度降低了成本^[9]。海水螺旋藻由于较高的成本,产业发展面临着越来越严重的挑战,如何避免钙镁离子沉淀,控制培养成本,是目前亟需解决的关键问题^[28]。

3 养殖技术新进展:钙镁沉淀问题的有效解决

螺旋藻等多种微藻在生长过程中,其培养液的pH值会逐渐升高,这一现象被称为“pH漂移”,微藻每吸收1分子碳酸氢根,向培养液中释放1分子OH⁻。螺旋藻培养液的pH值随着光合生长而逐步升高,最高可达11.5,过高的pH值将导致其生长缓慢、品质降低。海水螺旋藻同样具有pH漂移特性,不同之处在于海水具有较好的缓冲特性,相对淡水培养,培养液pH值漂移较慢,若不加以控制,最终也会因pH值过高(pH值为10~11)导致大量钙、镁沉淀的形成和大量积累。pH漂移所形成的高碱性培养液可以有效的吸收CO₂,而且通过控制培养液中CO₂的补充量可有效维持培养液pH值稳定,避免钙、镁离子的形成^[28]。

近期,中国科学院南海海洋所建立了耦合CO₂补充的海水螺旋藻养殖技术,采用新筛选得到的海水螺旋藻HS331藻株,在起始培养时添加少量碳酸氢钠,随着培养时间的延长培养液pH值升高,此时开始补充CO₂作为替代碳源并调控培养物的pH值,通过控制CO₂的添加速率或频率,使培养液的pH值稳定在一个较高范围内(9.3~9.7),既适宜海水螺旋藻的生长,又可有效抑制虫害,同时可以有效避免钙、镁沉淀的形成,大幅度降低海水螺旋藻的生产成本。此外,由于CO₂中没有重金属元素(碳酸氢钠是螺旋藻重金属富集的主要来源),通过建立CO₂补充技术,进一步降低了重金属元素的富集,使螺旋藻藻粉的重金属含量远低于国家限量标准。因此,建立耦合CO₂补充的海水螺旋藻培养技术,对发展海水螺旋藻产业具有十分重要的意义^[28]。

该技术中试成功后,在广州市海怡康生物科技有限公司的微藻基地内完成了总面积3000m²较小规模的产业化培养试验,历时2年。结果表明,由于

CO₂的补充,在循环使用的海水螺旋藻培养基均没有钙、镁沉淀的产生,同时碳酸氢钠用量大幅降低,藻粉的重金属元素含量远低于国家限量标准。此外,由于藻细胞长期处于适宜pH值(pH值为9~10)条件下生长,生命力旺盛、抗性强,对台风、暴雨及其引发的次生虫害均具有良好的抗性,在全开放模式的培养中,结合其它防御措施,顺利地抗住了多次台风的侵袭。

4 研发趋势与产业技术发展方向

4.1 进一步降低成本,拓展资源利用范围

目前高生产成本(≥2.5万元/t)是限制螺旋藻市场推广及下游产品开发的关键因素,而造成高成本的主要原因之一是碳酸氢钠的使用。通过CO₂补充不仅可大幅度降低螺旋藻的培养成本,而且可产生碳减排效应。但开放池补入CO₂,CO₂极易溢出而导致浪费,同时部分CO₂通过气液界面交换而丢失。研究表明,通过在培养池中安装CO₂防泄漏装置,可以大幅度提高CO₂的利用率^[28]。此外,优化搅拌速度以及培养液的pH值控制、盐度和碳酸氢钠浓度,也可显著改善CO₂的利用效率,进一步降低碳源浪费^[28,29]。

通过耦合沼气、沼液培养海水螺旋藻可望进一步降低螺旋藻的成本。沼液中富含氮、磷、铁、小分子有机物以及微量元素等一些海水缺少的元素,沼气中CO₂浓度达60%以上,“沼气、沼液”可以成为海水螺旋藻培养基的“全价”替代成分,沼气、沼液成本几乎可以忽略不计,因此,沼气、沼液培养技术的产业化推广对促进海水螺旋藻的发展,特别是低成本饲料及化工原料的开发具有重要的意义。火电厂的煤炭烟气也可以作为螺旋藻培养的碳源,但无论利用沼液或是火电厂废气,均可能存在潜在的风险,如过量沼液或烟气会对藻细胞的生长产生毒害或抑制作用,沼液中存在致病菌、以及烟气中的重金属元素、甚至二噁英可能在藻细胞中富集,目前不能完全排除危害人体健康的潜在风险,必须重视相关技术的安全性评估^[4,20]。

4.2 构建新型培养系统,减少雨水和敌害生物污染

研究发现,海水螺旋藻SCS可以适宜高温和强光条件,在高达45℃条件下仍可正常生长,在热带地区可以适应130000lx的强光,其抗光氧化能力比淡水螺旋藻强数倍^[2,30]。随后的大规模生产实践证明,在60%~70%的高盐度条件下,海水螺旋藻SCS仍可正常生长,在室外培养中,海水螺旋藻SCS可以忍耐300%以上氧饱和度,室外开放式培养池最高温度

达 42℃,实验室内经 45℃ 高温过夜,其仍然保持正常生长状态^[18]。研究表明,利用海水螺旋藻高温、高溶解氧和光氧化的适应性,可以突破螺旋藻封闭式反应器培养中出现的高温、高浓度氧和光氧化等生理障碍,简化封闭式反应器的结构,促进光生物反应器的放大乃至产业化^[2,19,31]。中科院南海海洋研究所新筛选的海水螺旋藻 HS331 也表现出显著的抗高温、强光和抗光氧化特性,该藻株预期在封闭式反应器中具有良好应用前景。采用封闭式反应器培养系统,可有效避免台风、暴雨对海水螺旋藻养殖的危害,此外,通过构建简易塑料大棚式培养池系统,也可解决螺旋藻所面临的台风、雨水和冬季低温等问题。这些培养模式的改进,将有力拓展海水螺旋藻的发展地域^[9]。

需强调的是,随着海水螺旋藻养殖技术的完善,内陆地区可以通过添加海盐或利用内陆盐碱湖海水培养螺旋藻,即通过人工海水培养海水螺旋藻,在成熟的培养基循环技术的支撑下,长期养殖后,海盐的成本可以忽略不计。最初研究螺旋藻的海水驯化,均是先用添加海盐或氯化钠的人工海水培养基进行,因此,在养殖技术上不存在问题,人工海水培养海水螺旋藻可进一步拓展海水螺旋藻的养殖地域和应用空间,同时,对控制重金属超标和有毒蓝藻的污染可能也有良好的效用。

4.3 加强产品综合利用,拓展养殖企业的发展空间

目前已报道的生物活性物质有多达 40 种经过动物学试验的验证,其药理功能几乎涵盖了人类所面临的主要代谢性和病原性疾病,如糖尿病、癌症、心血管疾病甚至艾滋病等^[6,7,32]。由于相关研究的文献数量庞大,且在螺旋藻市场推广中广为宣传,故本文不展开叙述,仅摘录近些年部分新发现、新结论、新功能和新产品。

研究表明,纯化的藻蓝蛋白可以直接抑制病菌,特别是可以抑制一些产生了抗药性的大肠杆菌、铜绿假单胞菌、肺炎克雷伯氏菌、金黄色葡萄球菌的繁殖^[33]。受到高盐胁迫的螺旋藻中还可表达多种既抑制 RNA 病毒、又抑制 DNA 病毒的蛋白质^[34]。海水培养螺旋藻还可以大幅度降低藻细胞外源无机硒添加浓度,提高螺旋藻及其藻蓝蛋白等产物的富硒效率,降低外源无机硒添加的安全性风险。研究发现,海水高盐度螺旋藻可提高藻蓝蛋白的抗氧化活性,清除超氧阴离子的能力显著高于淡水螺旋藻^[35,36]。近来,中科院南海海洋研究所研究证明,直接口服海水螺旋藻富硒藻蓝蛋白可以对人肝癌细胞裸鼠肿瘤的生长产生显著抑制作用。此外,通过将海水螺旋藻提取物与其它海洋植物提取物复方,该所还成功研制了

对关节炎有显著效果的产品。

从产品研制的角度来说,螺旋藻富含多种可独自实现产业开发的生物活性物质,从成本和效益双方面考虑,产物的梯级提取和综合利用是一种重要策略,而螺旋藻产业发展的早期就有学者提出了较为详细的技术方案,并且有大量实验室的尝试,有关研究可以作为海水螺旋藻产业发展的借鉴。在产物的工业化制备中,综合考虑产物的活性、稳定性与成本最为关键,中科院南海海洋研究所在藻蓝蛋白、螺旋藻多糖、螺旋藻油脂以及提取残渣的饲料与肥料制备的工厂化工艺等有关研究领域,开展了长期的研究并积累了良好的经验。

饲料应用应为海水螺旋藻的优先发展方向之一,海水螺旋藻已成功应用于点带石斑鱼的人工育苗,通过添加海水螺旋藻,点带石斑鱼亲鱼有 90% 以上能自然产卵,同时,也是强化石斑鱼幼苗饵料轮虫的优良饲料添加剂,通过含海水螺旋藻的复合添加剂的强化轮虫喂养后,可保证仔鱼营养平衡,降低仔鱼死亡率^[37~39]。随着海水螺旋藻成本日益降低,可望作为饲料蛋白源、营养强化剂和替代抗生素的抗病菌添加剂,更广泛地应用于各种动物的健康养殖。

5 展望

随着我国经济社会的快速发展,居民健康问题日益突出,土地和淡水资源日益紧缺,与此同时,生态环境问题也日益严重,而更为严重的是,由于工业废气的大量排放,温室气体减排也成为影响人类安全、世界经济和政治格局的重大因素^[3,28]。利用海洋资源,发展绿色、低碳经济,推动健康产业的发展,无疑是解决这些问题的有效出路,并得到了全社会的公认。在此背景下,海水螺旋藻产业将迎来前所未有的发展良机,故此提出海水螺旋藻的产业发展战略思考:

(1) 结合绿色、低碳和循环经济发展的巨大需求,利用沼气、沼液、工业废气等废气、废水资源,建立简易低成本的光生物反应器和塑料大棚式的简易培养系统,通过低成本的全价营养盐替代技术,大幅度降低螺旋藻成本,拓展其资源利用空间,特别是动物饲料的开发。

(2) 充分利用沿海地区的滩涂和海水资源,选择适宜海水螺旋藻养殖的地域,如广西南部或东部、海南西部、广东西南部与东部等,大力发展海水螺旋藻产业。同时为了更好地利用内陆地区的盐碱地、不毛山地、沙漠、盐碱水等资源,探索内陆地区的人工海水的产业化培养技术开发。

(3) 大力开发海水螺旋藻的藻蓝蛋白、多糖、不饱

和脂肪酸的功能性营养成分,通过配方优化等二次创新策略,提高海水螺旋藻资源在医药、食品、保健品、化妆品的利用水平,开发高值化系列产品。开发低成本的梯级提取、综合利用技术,制备海水螺旋藻食品或饲料添加剂、功能性食品和原料药等生物制品。

(4)加强海水螺旋藻的藻种选育、对高盐碱环境的适应与抗性机制、极端环境下的光合固碳机制、对有毒蓝藻的防护机制、对重金属元素的拮抗机制、高盐碱及高钙镁环境下的产物代谢机制、生物活性物质的抗氧化抗病菌等活性的功能评价与作用机制、及其废水废气培养中的安全性评价等方面的应用基础研究,为海水螺旋藻的产业化提供创新动力。

(5)加强产学研合作,依靠原始创新、关键技术的集成创新和产业规模上的平台与机制创新,培育重点特色终端产品,打造海水螺旋藻的品牌,推动海水螺旋藻在绿色低碳经济和健康产业中的应用推广与壮大。

总之,更大规模的海水螺旋藻产业化养殖及其更为广泛的应用推广,前景广阔,值得期待。

参考文献:

[1] Wu B T, Tseng C K, Xiang W. Large-scale cultivation of *Spirulina* in seawater based culture medium[J]. Bot Mar, 1993, 36: 99-102.

[2] Wu B T, Xiang W Z, Tseng C K. *Spirulina* cultivation in China[J]. Chin J Oceanol Limnol, 1998, 16 (supplement): 152-157.

[3] 任小波, 吴园涛, 向文洲, 等. 海洋生物质能研究进展及其发展战略思考[J]. 地球科学进展, 2009 (4): 402-410. Ren X B, Wu Y T, Xiang W Z, et al. Research progress and strategy of marine biomass energy[J]. Advances in Earth Science, 2009(4): 402-410.

[4] 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): 8-17. Xu S K, Zhang F, Xiang W Z, et al. Progress in the study of removal from coal fired flue gas by microalgae[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(9): 8-17.

[5] Vonshak A. *Spirulina platensis* (*Arthrospira*): Physiology, Cell Biology and Biotechnology [M]. London: Taylor & Francis, 1997, 1-11: 43-65.

[6] Henrikson R. Earth Food *Spirulina* [M]. Hawaii: Rono Enterprises, 1989: 17-61.

[7] Belay M. The potential application of *Spirulina* (*Arthrospira*) as a nutritional and therapeutic supplement in health management[J]. J American Nutraceutical Association, 2002, 5(2): 27-49.

[8] Li D M. *Spiulina* industry in China: Present status and future prospects[J]. J Appl Phycol, 2000, 9(1): 25-28.

[9] Lu Y, Xiang W, Wen Y. *Spirulina* (*Arthrospira*) in-

dustry in Inner Mongolia of China: Current status and prospects[J]. J Appl Phycol, 2011, 23: 263-269.

[10] Vonshak A, Richmond A. Mass production of bluegreen alga *Spirulina*: An overview[J]. Biomass, 1988, 15 (4): 233-247.

[11] Fox D F. *Spirulina* production & Potential[M]. France: Editions Edisud, 1996.

[12] Materassi R, Tredici M, Balloni W. *Spirulina* culture in sea-water [J]. Applied Microbiology Biotechnology, 1984, 19: 384-386.

[13] Tredici M R, Papuzzo T, Tomaseffi L. Outdoor mass culture of *Spirulina maxima* in seawater[J]. Appl Microb Biotech, 1986, 24(1): 47-50.

[14] 吴伯堂, 林坚士, 向文洲, 等. 热带地区钝顶螺旋藻的大量培养研究[J]. 海洋与湖沼, 1992b, 23(6): 663-668. Wu B T, Lin J S, Xiang W Z, et al. Studies on the mass cultivation of *Spirulina platensis* in tropical Hainan Island[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1992b, 23 (6): 663-668.

[15] 曾呈奎. 我们应大力发展螺旋藻产业[N]. 中国科学报, 1995-10-13(4). Zeng C K. We Should Develop Strongly *Spirulina* Industry[N]. Chinese Science Daily, 1995-10-13(4).

[16] 吴伯堂, 何汝洪, 彭云辉. 钝顶螺旋藻海水驯化的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(2): 197-200. Wu B T, He R H, Peng Y H. A preliminary study of the effects of NaCl crude salt, and sea water on *Spirulina* growth[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1988, 19(2): 197-200.

[17] 吴伯堂, 向文洲, 夏德如, 等. 钝顶螺旋藻优良品系 SCS 的生理特性研究[J]. 热带海洋, 1992a, 11(1): 1-7. Wu B T, Xiang W Z, Xia D R, et al. Studies on physiological characteristics of a new strain of *Spirulina platensis* [J]. Tropic Oceanology, 1992a, 11(1): 1-7.

[18] 吴伯堂, 向文洲. 海水螺旋藻——回顾与展望[J]. 螺旋藻产业, 1996(4): 10-13. Wu B T, Xiang W Z. Seawater *Spirulina*: Review and prospect[J]. *Spirulina* Industry, 1996(4): 10-13.

[19] 向文洲. 海水螺旋藻的生理抗性及其简易光生物反应器室外培养研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2004. Xiang W Z. Studies on the Physiological Resistance and Outdoor Cultivation in a Simple Photobioreactor of Seawater *Spirulina* [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2004.

[20] 徐海滨, 陈艳, 李芳, 等. 螺旋藻类保健食品生产原料及产品微囊藻毒素污染现状调查[J]. 卫生研究, 2003, 32(4): 339-343. Xu H B, Chen Y, Li F, et al. Investigation of concentration of microcystin in raw materials and finished products of spires health food[J]. Journal of Hygiene Research, 2003, 32(4): 339-343.

- [21] Mary Leema J T, Kirubakaran R, Vinithkumar N V, et al. High value pigment production from *Arthrospira (Spirulina) platensis* cultured in seawater[J]. *Bioreour Technol*, 2010, 101(23): 9221-9227.
- [22] Devanathan J, Ramanathan N. Pigment production from *Spirulina platensis* using seawater supplemented with dry poultry manure[J]. *J Algal Biomass Utiln*, 2012, 3(4): 66-73.
- [23] Devanathan J, Ramanathan N. *Spirulina platensis* Production Using Seawater Media[M]. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013.
- [24] Oxa P, Bastias E, Uribe E. Selection of *Arthrospira platensis* strains with productivity in brackish water with high boron levels for commercial production in the Lluta Valley[J]. *Electron J Biotechnol*, 2012. DOI: 10.2225/vol15-issue5-fulltext-20.
- [25] 关邵晨, 王璇, 李杰, 等. 海水驯化螺旋藻研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(6): 3580-3582.
Guan S C, Wang X, Li J, et al. Study on seawater-acclimation *Spirulina* [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(6): 3580-3582.
- [26] 胡鸿钧. 国外螺旋藻生物技术的现状及发展趋势[J]. *武汉植物学报*, 1997, 15(4): 369-374.
Hu H J. Current statuses and emerging prospects of the biotechnology of *Spirulina* in overseas[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1997, 15(4): 369-374.
- [27] Torzillo G, Pushparaj B, Balloni W, et al. Production of *Spirulina* biomass in closed photobioreactors[J]. *Biomass*, 1986, 11(1): 61-74.
- [28] 张峰, 向文洲, 萧邛, 等. 耦合二氧化碳减排的微藻产业化培养技术[J]. *微生物学报*, 2012, 52(11): 1249-1255.
Zhang F, Xiang W Z, Xiao B, et al. CO₂ Sequestration coupled with industrial cultivation of microalgae[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2012, 52(11): 1249-1255.
- [29] Asadollahzadeh M J, Ardjmand M, Seafkordi A A, et al. Efficient storage and utilization of CO₂ in open raceway ponds for cultivation of microalgae[J]. *Korean J Chem Eng*, 2014. DOI: 10.1007/s11814-014-0059-6.
- [30] Olguín E J, Galicia S, Camacho R, et al. Production of *Spirulina* sp. in sea water supplemented with anaerobic effluents in outdoor raceways under temperate climatic conditions[J]. *Appl Microbial Biotechnol*, 1997, 48(2): 242-247.
- [31] Vonshak A, Torzillor G, Accolla P, et al. Light and oxygen stress in *Spirulina platensis* grown outdoors in tubular reactors[J]. *Physiol Planta*, 1996, 97: 175-179.
- [32] 张恩. 中国海洋微生物多样性[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 266.
Zhang S. Diversities of Marine Microbes in China[M]. Beijing: Science Press, 2013: 266.
- [33] Sarada D L, Kumar C S, Rengasamy R. Purified C-phycocyanin from *Spirulina platensis* (Nordstedt) Geitler; A novel and potent agent against drug resistant bacteria[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2011, 27(4): 779-783.
- [34] Shalaby E A, Shanab Sanaa M M, Singh V. Salt stress enhancement of antioxidant and antiviral efficiency of *Spirulina platensis* [J]. *Journal of Medicinal Plants Research*, 2010, 4(24): 2622-2632.
- [35] 何晓燕, 向文洲, 何慧, 等. 海水螺旋藻富硒培养及藻蓝蛋白提取纯化研究[J]. *热带海洋研究*, 2005, 24(4): 30-34.
He X Y, Xiang W Z, He H, et al. A study on Se accumulation and Se-enriched phycocyanin in *Spirulina Platensis* cultured in seawater-based medium[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(4): 30-34.
- [36] 成华, 向文洲, 吴华莲, 等. 海水螺旋藻 C-藻蓝蛋白富硒及其抗氧化特性[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(5): 60-65.
Cheng H, Xiang W Z, Wu H L, et al. Selenium enrichment by C-phycocyanin of *Spirulina platensis* cultured in seawater-based medium and its antioxidant activities [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(5): 60-65.
- [37] 邹记兴, 常林, 向文洲, 等. 点带石斑鱼的亲鱼培育、产卵受精和胚胎发育[J]. *水生生物学报*, 2003a, 27(4): 378-384.
Zou J X, Chang L, Xiang W Z, et al. Parent grouper rearing, spawning, fertilization and embryonic development of *Epinephelus Malabaricus* (Bloch & Schneider)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003a, 27(4): 378-384.
- [38] 邹记兴, 向文洲, 胡超群, 等. 点带石斑鱼仔鱼营养转换期的摄食与生长[J]. *高技术通讯*, 2003b, 13(5): 87-91.
Zou J X, Xiang W Z, Hu C Q, et al. Feeding and growth of the larvae of *Epinephelus malabaricus* in the process of nourishing transformation[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2003b, 13(5): 87-91.
- [39] 邹记兴, 向文洲, 胡超群, 等. 点带石斑鱼仔、稚、幼鱼的生长与发育[J]. *高技术通讯*, 2003c, 13(4): 77-84.
Zou J X, Xiang W Z, Hu C Q, et al. Growth and development of the larva, juvenile and young fish of *Epinephelus malabaricus* (Bloch & Schneider) [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2003c, 13(4): 77-84.

(责任编辑: 陆 雁)