

海藻研究和成果应用综述

董彩娥 (广州大学环境科学与工程学院, 广东广州 510006)

摘要 介绍了海藻的分类, 综述了海藻在农业、能源、医学、食品保健、环境保护、光合机制机理方面的研究及应用, 指出了我国藻研究仍存在的问题并展望了今后的研究方向。

关键词 藻; 研究; 应用

中图分类号 S932.7 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)14-001-04

Review of Research and Application of Marine Algae

DONG Cai-e (School of Environmental Science & Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006)

Abstract The classification of marine algae was introduced, the application of marine algae in agriculture, energy, medicine, food health care, environment protection, photosynthetic mechanism were reviewed, the existing problems in marine algae research in China were pointed out, the research direction was forecasted.

Key words Marine algae; Research; Application

海洋面积广阔, 蕴含着丰富的矿产资源、食材、药材以及供人类旅游度假的自然风光, 海洋生态系统愈来愈被人类重视, 而海洋浮游藻是海洋生态系统的初级生产者, 海藻不仅含有丰富的营养成分, 通过生物冶炼能够制取特定的化合物, 而且对全球碳循环起着一定的平衡作用。笔者综述了海藻的研究历史和研究成果的应用, 以期对海藻的进一步研究及应用提供参考。

1 海藻概述

藻类是指无根、茎、叶的分化, 无维管束, 含有光合作用色素的一类自养原植体植物, 是低等植物中的一大类。一般把藻类分为三大类, 分别是浮游藻类、飘浮藻类和底栖藻类。我国淡水藻类分类检索根据藻类细胞内所含不同的色素、不同的贮藏物, 以及植物体的形态构造、繁殖方式、鞭毛的有无、数目、着生位置、细胞壁成分等方面的差异, 一般将藻类分为 11 个门, 分别是蓝藻门、红藻门、隐藻门、甲藻门、金藻门、黄藻门、硅藻门、褐藻门、裸藻门、绿藻门、轮藻门, 除轮藻门外, 其他各门藻类都有海生种类, 目前已知藻类约为 2 100 属 30 000 余种, 其中微藻约占 70%^[1]。在生态学方面: 藻类体型大小各异, 最小的直径只有 1~2 μm, 肉眼不可见, 而最大的长达 200~300 m; 形态多样, 有单细胞、群体和多细胞; 适应环境能力较强, 分布范围极广; 种类繁多, 有多达 11 个门类。在生理方面: 藻细胞含有丰富的氨基酸、脂肪酸、藻多糖、维生素、矿物质及微量元素等成分, 同时还含有多种生物活性物质和抗菌、抗病毒物质, 如甘露醇、核苷类、菇类、大环内酯、生物碱等^[2]。我国的藻类研究起于 20 世纪 30 年代, 主要集中于藻类的分类和生态方面的研究^[3-4]。

1.1 微藻 微藻是一类个体微小, 一般只有几微米到十几微米或几十微米^[5], 一般在显微镜下才能观察到的微小植物体。其生存环境广阔, 适应能力极强, 存在于海洋、陆地在内的所有生态系统中。微藻因生存环境不同而表现的生物形

状千差万别, 在过去的 80 年间世界各国的科学家对微藻的生态类型、种群分类、营养代谢进行了大量研究, 全球约存在 5 000 种微藻^[6]。

1.2 海洋浮游藻 海洋浮游藻广泛分布于淡水、海水中, 数量巨大。它是一类光能自养型单细胞生物, 能有效利用光能将 H₂O、CO₂ 和无机盐转化为有机物, 是海洋生态系统中的最主要初级生产者, 也是海洋生物资源的重要组成部分, 在海洋生态系统的物质循环和能量流动中起着极其重要的作用。它作为浮游动物的基础饵料, 同时也是海洋食物网结构的基础环节, 因而它们的盛衰直接或间接地影响着整个海洋生态系统的生产力。海洋浮游藻具五大特点^[7]: ①具有叶绿体等光合器官, 能有效利用太阳能将 H₂O、CO₂ 和无机盐转化为有机化合物。②以简单的分裂方式进行繁殖, 细胞生长周期短, 并且易于操作, 易于大规模培养。③可以用海水、咸水或半咸水培养, 适应性极强。④细胞内含有丰富的营养成分, 且单细胞蛋白质含量高。⑤因独特的生存环境使其能够合成许多结构和生理功能独特的生物活性物质, 特别是经过一定的诱导手段, 利用微藻可以高浓度合成具有商业化价值的化合物。因其独特的生理生化特性, 目前国内外对海洋浮游藻的研究从生态和生理方面的研究不断扩展至成果的应用以及新课题的拓展。

2 海藻的研究与应用

2.1 历史沿革 我国藻类的研究始于解放前二三十年, 1920~1956 年, 主要集中于以下 3 个方面的研究: ①我国海域沿岸和浅海藻的分类和生态学研究。②采集了 23 000 多号海藻标本。③近海区的硅藻门的生理生态和生活史有一定研究^[3-4,8]。1957~1980 年, 主要集中于以下 7 个方面的研究^[9-31]: ①藻类的使用价值和经济价值及功用的研究。②大量繁殖藻的培养技术的探究; ③藻类化学成分的初探。④藻类地理分布的初探。⑤单因子作用对藻生长的影响。⑥藻类在污水治理和医学上的应用。⑦藻类光合机制机理的初探。1981~1994 年, 主要集中于以下 5 个方面的研究^[32-34]: ①多因子交互作用对藻生长的影响。②重金属及微量元素对藻类生理胁迫和生理适应性的研究。③藻类在

作者简介 董彩娥(1986-), 女, 宁夏中宁人, 硕士研究生, 研究方向: 环境生态学。

收稿日期 2015-03-24

燃料应用中的初探。④遗传学、分子生物技术在藻类的应用研究。⑤进一步研究了藻类光合作用的机理机制。短短的 74 年时间,藻类的研究经历了分类阶段—形态学研究阶段—生理学研究阶段—应用研究阶段,每一阶段资料的采集和整理都为下一阶段的研究提供了必不可少的重要条件,从而推动藻类研究不断发展与更新。从 1994 年开始,藻类的应用与价值得到了公众的普遍认同,与此同时藻的研究范围更广阔,与各个学科的交叉性越来越强。从我国知识资源总库采集的信息分析可以得出从 1994~2015 年,藻类相关的国内外学者和专家在以下 6 个领域分别做了研究^[35-43]:①藻类在农业方面的研究与应用。②藻类在能源方面的研究与应用。③藻类在医学上的研究与应用。④藻类在食品保健方面的研究与应用。⑤藻类在环境保护方面的研究与应用。⑥藻类新种的发现与命名。⑦藻类光合机制基础研究。海藻涉猎到人类生活的各个领域,并且愈来愈深入到人类的生产和生活中,因此探究海藻的应用价值愈显重要。

2.2 海藻的现状与成果

2.2.1 农业方面的研究与应用。藻可以作为一种优质的饲料,不仅可以用在水产养殖中,而且可以用在畜禽养殖中,因为其富含氨基酸、脂肪酸、藻多糖、维生素、矿物质及微量元素等高价值的营养成分,同时还含有多种生物活性物质和抗菌、抗病毒物质,例如甘露醇、核苷类、菇类、大环内酯、生物碱等^[2]。1958 年我国开始关注藻在食品和饲料中的应用,但研究较少,直到 1980 年左右才开始大量研究并发现藻类富含动物生长所需的多种营养素和生物活性物质,这些物质具有独特的生物学功能,在动物饲养及其饲料中应用效果显著。如王兴强等^[44]研究饲料中添加盐生杜氏藻粉 0%、0.50%、1.00%、2.00% 和 4.00% 对脊尾白虾(平均初始湿重 0.715 g)的存活和生长影响的结果表明,白虾存活率以 1.00% 添加组最高,特定生长率和吸收效率以 2.00% 添加组最高,摄食量以 4.00% 添加组最高,而饲料系数以 1.00% 添加组最低,回归分析表明,脊尾白虾特定生长率达到最大值时的盐生杜氏藻粉添加量为 2.76%。在现今优质饲料蛋白源缺乏的形势下,因藻是单细胞蛋白的一个重要来源且蛋白质含量很高,如螺旋藻高达 60.0%~70.0%,小球藻高达 62.5%。微藻作为潜在的优质饲料蛋白源引起了科技工作者和行业从业者越来越多的重视。微藻所含的多种营养物质,如维生素 A、维生素 C、维生素 E、维生素 B、硫氨酸、核黄素、吡多醇生物素、肌醇、叶酸、泛酸钙和烟酸等提升了其作为饲料蛋白源的价值。目前常用作饲料的大型藻类,如褐藻门的海带、裙带菜,红藻门的紫菜,蓝藻门的发菜,绿藻门的石莼和浒苔等。能规模化培养并应用于畜禽、水产动物养殖生产实践的饵料微藻有绿藻门的亚心形扁藻、盐藻、小球藻、雨生红球藻、微绿球藻,硅藻门的三角褐指藻、小新月菱形藻、牟氏角毛藻、中肋骨条藻,金藻门的等鞭藻、绿色巴夫藻,黄藻门的异胶藻,蓝藻门的鱼腥藻、螺旋藻等。其中小球藻和螺旋藻是应用最广和研究最多的 2 种常用微藻。随着我国畜禽、水产养殖业的发展,饲料资源日益紧张,要缓解这种紧张的

局势,开发利用藻类是一条非常有效的途径。根据藻类的营养特点和生物学功能,培养选育有价值的不同藻种,更好地为饲料行业服务,藻类在饲料中综合开发利用前景广阔。

2.2.2 能源方面的研究与应用。国内利用藻提取脂类的研究起步较晚,近些年来由于不可再生资源消耗量大、能源短缺及环境污染等问题日益严重,开发绿色、清洁的生物燃料代替传统石化燃料,成为藻类研究的热点之一^[45-47]。微藻因具有光合作用效率高、生长周期短、含油量高、油脂面积产率高等特点,在众多生物燃料的原料选择中,它被认为最具有替代石油生物质资源的潜力^[48-50]。微藻的营养需求简单,对环境适应力强,经过生物冶炼不仅能合成饲料,开发出平台化合物等产品,而且还能生产出生物柴油、优质航空汽油等多种生物燃料,它们被广泛应用于工农业和交通领域^[51]。微藻可以直接利用阳光、CO₂ 和 N、P 等简单营养物在胞内合成大量油脂,主要是甘油三酯。微藻光合作用效率高,生长周期短,对数生长期时间为 3~5 d,某些藻种甚至一天可以收获两季。梅洪等^[52]对 6 种微藻进行了脂肪酸的分析,结果显示脂肪酸质量分数为 19.90%~29.40%。易翠平等^[53]用重量法测定了 3 种绿藻,绿藻中总脂肪质量分数在 17.69%~21.44%。王铭等^[54]分析了 13 种微藻的总脂含量和脂肪酸组成,结果表明不同门类的微藻脂肪酸组成差异较大。虽然藻作为生物燃料开发潜力巨大,但是目前我国仍然处在实验室阶段,要进行规模化生产,还需解决培养器选择、培养条件的确定、大规模后处理等问题。

2.2.3 医学方面的研究与应用。藻含有多种微量元素、高度不饱和脂肪酸(PUFA)、色素(β-胡萝卜素、虾青素和藻蓝素)和藻多糖。研究表明,它们具有独特的生理功效。高度不饱和脂肪酸主要是二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA),它们有预防和治疗心血管疾病、癌症,调节中枢神经、视觉系统的功能,可以提高人体的免疫机能调节能力,防止记忆力减退^[55]。从微藻中提取的 β-胡萝卜素、虾青素和藻蓝素具有抗氧化、抗突变、预防衰老、增加免疫力等作用。微藻多糖是广泛存在于微藻细胞内的一种天然大分子化合物,具有抗肿瘤、抗病毒、抗突变、抗衰老、抗辐射损伤、抗凝血、降血脂及调节机体免疫能力等广泛的生理功能。虽然 1960 年左右有学者已关注藻在医学上的应用,但并不普遍,直到 1980 年左右,人们才对微藻中脂肪酸组成进行了深入分析,对富含 PUFA 的藻种进行了筛选,对影响微藻 PUFA 积累的理化条件,例如光照、温度、pH、盐度、NaCl 浓度、溶氧量、CO₂、氮源浓度、磷源浓度、微量元素等进行了深入探讨,且拟定了不少微藻高产 PUFA 最佳的培养方式和培养条件。周岩冰等^[37]研究表明,螺旋藻多糖对体外培养的胃癌细胞、结肠及直肠癌细胞均有一定的抑制作用,且呈剂量依赖性。中国科学院海洋研究所研制出富含 EPA 或 DHA 的海洋微藻胶囊。蒋霞敏等^[56]比较分析了 14 种微藻的总脂含量和脂肪酸组成,结果表明除小球藻(*Chlorella vulgaris*)、极微小环藻(*Cyclotella atomus*)、微绿球藻(*Nannochloropsis culata*)、亚心形扁藻(*Platymonas subcordiformis*)外,其他微藻的总脂含

量都超过其干重的 10%。庄惠如等^[57]研究了营养胁迫对雨生红球藻产生虾青素的影响,发现改变营养条件可以诱导雨生红球藻累积虾青素。目前,日本 DHA 保健食品的应用在世界上已居领先地位,我国只有小规模生产,还需进行深入研究开发和扩大化生产。

2.2.4 食品保健方面的研究与应用。微藻种类繁多,是优质的单细胞蛋白源,其代谢产物有色素、多糖、脂肪酸、抗生素、藻胆蛋白等一系列物质。研究表明在螺旋藻中^[58],蛋白质含量高达 60%~70%,胆固醇含量很低,它的细胞壁以半纤维素为主,易被人体吸收,对人体的健康十分有利,可作为人体补充蛋白的最佳选择。如 γ -亚油酸具有降低血浆脂肪水平的作用,具有预防高血脂症; β -胡萝卜素是维生素 A 的前体,也是食品和化妆品的天然着色剂;DHA 是不饱和脂肪酸二十二碳六烯酸^[59],是人的大脑发育、成长的重要物质之一,特别是对婴儿胎儿智力和视力的发育至关重要,能增强记忆与思维,有效提高智力。有研究表明体内 DHA 含量高者的智力发育指数高且心理承受力强。近年来,DHA 的提取技术取得长足进展,许多儿童食品已经将其作为添加成分之一,使得 DHA 的摄取既方便又便宜,如乐百氏智酸乳,每一瓶 175 ml 产品都含有 1 750 μg 以上的 DHA,相当于 5 条 1 kg 深海鱼体内 DHA 的含量。试验证明儿童在坚持喝含 DHA 的母乳一段时间后,记忆商数平均值有明显提高^[60]。由此可见,藻是生物制取 DHA 的又一选择。微藻含有独特的药理活性物质,在新药、保健及功能食品的研制和开发中具有很大潜力。

2.2.5 环境保护方面的研究与应用。污水的处理主要包括两方面:污染物的消除和水体的修复。目前我国常用的污水处理方法有活性污泥法、生物膜法和氧化法^[61],但微藻在我国的污水处理应用中较少见,含 N、P 化合物的废水非常适合培养微藻,利用微藻吸附废水不仅可以处理污染物,还可以缓解水体的富营养化、吸附水体中的重金属。有研究报道许多微藻能够对废水进行除 N 和除 P 处理以及吸附废水中的重金属,效果较好的有小球藻、螺旋藻、颤藻、栅藻、栅列藻等。李志勇等^[62]利用糖蜜废液进行了螺旋藻的培养,结果显示当废水 COD 在 500~3 300 mg/L 时,COD、糖分以及含 N、P 化合物的去除率分别为 75%、80%、70%~85%、60%~75%。Aslan 等^[63]利用颤藻处理废水,结果显示废水中含 P 化合物的去除率为 28%,含 N 化合物的去除率为 78%。莫健伟等^[64]研究表明在 Cu^{2+} 的协同下,绿藻的脱色再生性能很好,可同时去除印染废水中的重金属离子和染料颜色,在 pH 为 6~7 时,绿藻能有效去除重金属离子,且 86% 以上的吸附属于快速吸附。邹宁等^[65]研究发现鱼腥藻生长快、抗侵染、固氮能力强、对重金属离子吸附能力强,是一种可以很好地修复水体重金属污染的微藻。用微藻净化污水,不仅能减少环境污染,还可以将得到的藻类细胞用作饲料和肥料,甚至可用于生产有用的化学物质。与传统的废水处理方法相比,用微藻处理废水具有成本低、易操作、耗能少、效益好的特点,在环保工程中具有巨大的应用潜力。

2.2.6 光合机制机理的研究。藻类不仅应用于工业、农业、交通、医药、食品等领域,还对全球碳循环起着平衡作用。研究表明,人类目前平均每年产生释放的碳量约为 71 亿 t,其中约 20 亿 t 被海洋吸收,33 亿 t 在大气中积累^[66]。海洋作为一个巨大的碳库,具有吸收和贮存大气 CO_2 的能力,而海洋浮游藻是海洋生态系统的主要初级生产者,影响着大气 CO_2 的收支平衡,它对于预测未来大气中 CO_2 含量甚至全球气候变化意义重大。据预测^[67],大气 CO_2 浓度在 21 世纪中叶将达到 700 mg/L。大气 CO_2 浓度的升高可能导致一系列的植物、生理生态学效应。研究表明,在高等植物体内, CO_2 浓度升高在短期内将提高 C_3 植物的光合速率,而在长期适应过程中可能导致光合速率下降^[68-69]。与高等植物的研究相比,大气 CO_2 浓度升高对海洋浮游藻影响的研究^[70]明显落后约 10 年。大气 CO_2 浓度升高会导致海洋生态系统中 pH 下降和无机碳浓度的改变,这与其无机碳的利用机制密切相关。海洋浮游藻和高等植物一样都是以 CO_2 作为光合作用的底物,在 Rubisco 酶的催化下固定 CO_2 ,其固 C 途径和高等 C_3 植物类似^[71],但是许多海洋浮游藻在适应水体无机碳浓度变化的过程中,在细胞内形成了一种 CO_2 的浓缩机制。该机制主要是通过无机碳的转运改变细胞光合作用对无机碳的亲合力,在核酮糖-2-磷酸羧化氧化酶的活性位点提高 CO_2 浓度,有利于该酶起羧化酶作用,抑制氧化酶活性。同时该机制也易受到外界环境条件的影响,例如光、 CO_2 浓度、温度和营养状况等。因此,研究海洋浮游藻利用无机碳的机制及环境的调控,可为研究其对大气 CO_2 浓度升高的响应提供理论依据。

3 存在的问题与展望

藻类含有丰富的胞外产物,它们能应用于饲料、医药、食品、能源、考古等领域,对人类的健康和社会经济的发展起到积极作用,但是目前我国藻类的基础研究和应用研究还有待进一步加强与提高,具体表现在以下几个方面:

(1)藻类光合机制机理的基础研究较少。藻是一类含有光合作用色素的低等植物,是海洋生态系统的初级生产者,能吸收固定大气中约 30% 的 CO_2 ,对于维持全球碳平衡起到重要作用。进一步研究藻吸收固定无机碳(CO_2 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-})的光合作用机制机理,为人类解决全球变暖问题提供了另一条途径。目前国外对该方面的研究程度广而深,对我国有一定的借鉴作用。

(2)目前国内借助 GIS 技术监测海域赤潮藻的研究较少且范围较小,如能够借助遥感技术和计算机技术,将有助于我国海域赤潮的监测、预报和治理。

(3)分子生物学在藻类研究与应用中处于起步阶段,在传统的研究方法基础上,运用分子生态学的技术与手段,必将对藻类的研究与应用起积极推动作用。

参考文献

- [1] 艾春香, XIN G L. 藻类在饲料中的应用[J]. 动物营养研究进展, 2012, 10(1): 270~284.
- [2] 彭文岚, 王广建, 孙宗彬. 微藻在能源、环保及食品保健中的应用[J]. 化工科技市场, 2010, 33(2): 18~21.

- [3] 曾呈奎. 十年来我国的海洋生物学[J]. 海洋与湖沼, 1959, 2(4): 27 - 35.
- [4] 朱树屏, 郭玉清. 十年来我国海洋浮游植物的研究[J]. 海洋与湖沼, 1959, 2(4): 223 - 229.
- [5] 高亚辉. 海洋微藻分类生态及生物活性物质研究[J]. 厦门大学学报, 2001, 2(4): 438 - 479.
- [6] RICHMOND A. Handbook of microalgal culture; biotechnology and applied phyecology[M]. London: Blackwell Science, 2004.
- [7] 伊廷强, 叶静, 何泽超. 海洋微藻培养及光生物反应器的研究进展[J]. 化工设计, 2008, 18(3): 11 - 14.
- [8] 王健华. 淡水藻头自然状态标本制作法[J]. 生物学通报, 1955, 3(5): 16 - 22.
- [9] 中国科学院水生生物研究所. 单细胞绿藻是人类食料的新来源[J]. 科学通报, 1958, 6(2): 22 - 27.
- [10] 蓝绿藻在水稻田中的固氮作用[J]. 陕西农业科学, 1957, 8(7): 26.
- [11] 中国科学院水生生物研究所. 水稻田的新肥料——蓝藻肥料[J]. 科学通报, 1958, 3(2): 664 - 665.
- [12] 黎尚豪, 朱蕙, 夏宜峰, 等. 单细胞绿藻的大量培养试验[J]. 水生生物学报, 1959, 3(4): 462 - 472.
- [13] 叶清泉, 王立美, 刘富瑞, 等. 固氮蓝藻的大量培养方法[J]. 水生生物学报, 1959, 8(4): 445 - 451.
- [14] 张瑞清. 团藻的培养[J]. 生物学通报, 1960, 4(5): 145 - 146.
- [15] 方同光, 郑柏林, 芦澄清, 等. 青岛几种褐藻维生素含量的研究[J]. 山东海洋学院学报, 1960, 6(1): 211 - 218.
- [16] 纪明侯, 张燕霞. 几种中国褐藻的微量元素测定[J]. 科学通报, 1959, 12(2): 497.
- [17] 纪明侯, 张燕霞. 我国经济褐藻的化学成分研究[J]. 海洋与湖沼, 1962, 5(1): 1 - 10.
- [18] 李珏声, 方华, 潘娉华, 等. 扁藻食用价值的研究[J]. 青岛医学院学报, 1962, 3(2): 31 - 35.
- [19] 曾呈奎, 张峻甫. 中国沿海藻区系的初步分析研究[J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(3): 245 - 261.
- [20] 利卓荣, 魏孝孚. 固氮蓝藻的室内培养试验[J]. 生物学通报, 1963, 5(3): 16 - 17.
- [21] 饶钦止. 西藏南部地区的藻类[J]. 海洋与湖沼, 1964, 6(2): 169 - 189.
- [22] 李少菁. 厦门几种海洋浮游桡足类的食性与饵料成分的初步研究[J]. 厦门大学学报, 1964, 11(3): 93 - 109.
- [23] 金德祥, 陈贞奋, 刘师成, 等. 温度和盐度对三种海洋浮游硅藻生长繁殖的影响[J]. 海洋与湖沼, 1965, 7(4): 374 - 384.
- [24] 齐雨藻. 广东固氮蓝藻肥效的研究[J]. 中山大学学报, 1976, 5(4): 12 - 18.
- [25] 南京大学生物系环境保护组. 利用颤藻降低燃料色水和印染废水色度[J]. 环境科学, 1977, 2(1): 91 - 98.
- [26] 广西壮族自治区东兴族自治县珍珠场试验组. 扁藻培养的一些问题及其处理[J]. 水产科技情报, 1977, 5(3): 42 - 43.
- [27] 金德祥. 硅藻分类系统的探讨[J]. 厦门大学学报, 1978, 5(2): 31 - 50.
- [28] 中国科学院海洋研究所海藻化学组. 海洋资源的综合利用[J]. 海洋科学, 1979, 12(4): 21 - 24.
- [29] 金德祥. 海水人工育苗初期大量死亡的探讨[J]. 福建水产科技, 1979, 1(1): 1 - 5.
- [30] 林惠民, 何振荣, 戴玲芳, 等. 几种固氮蓝藻的固氮酶活性及其某些特征[J]. 水生生物学集刊, 1980, 7(1): 57 - 60.
- [31] 王业勤. 蓝藻质粒[J]. 遗传, 1980, 2(4): 36 - 37.
- [32] 范曼芳, 陈琼华. 褐藻淀粉和褐藻淀粉硫酸酯的制取、分析及生物活性比较[J]. 中国药科大学学报, 1988, 19(1): 30 - 34.
- [33] 阮继红, 庞启深, 郭宝江. 螺旋藻抗辐射的研究[J]. 遗传, 1988, 10(2): 27 - 30.
- [34] 郑志宏, 吴瑜端, 刘士忠. 重金属对近海球等鞭金球的毒性化学[J]. 环境科学学报, 1988, 8(2): 201 - 208.
- [35] 徐黎, 路荣昭, 施定基, 等. 14 种微藻总脂含量和脂肪酸组成研究[J]. 水生生物学报, 2003, 27(3): 243 - 247.
- [36] 庄惠如, 施巧琴, 卢海声, 等. 营养胁迫对雨生红球藻虾青素累积的影响[J]. 水生生物学报, 2000, 24(3): 208 - 212.
- [37] 周岩冰, 于红, 赵磊. 螺旋藻多糖对体外培养胃肠道癌细胞的抑制作用[J]. 中华实验外科杂志, 2004, 21(5): 537.
- [38] 蔡心涵, 何立明, 蒋家伦, 等. 螺旋藻藻蓝蛋白对癌激光疗法增敏作用的实验研究[J]. 中国海洋药物, 1995, 14(1): 15 - 18.
- [39] 张俊玲, 田玉亲, 陈舜娥. 生物柴油的发展现状 & 加工技术[J]. 山东化工, 2008, 37(3): 35 - 36.
- [40] 林建云, 陈维芬, 林涛. 福建近海几种海藻的营养成分与饲用安全评价分析[J]. 福建农业学报, 2011, 26(6): 997 - 1002.
- [41] 李静静. 可利用微藻在水产饲料行业中的应用探讨[J]. 湖南饲料, 2011, 2(2): 29 - 31.
- [42] 王冉, 孙展兵, 商庆凯. 小球藻粉作为饲料添加剂的营养价值及安全性研究[J]. 饲料博览, 2005, 1(4): 4 - 7.
- [43] 姚领, 胡萍, 胡蓓娟, 等. 两种溶剂提取法提取三角褐指藻中不饱和脂肪酸的比较[J]. 食品工业科技, 2006, 27(12): 114 - 116.
- [44] 王兴强, 曹梅, 阎斌伦. 盐生杜氏藻粉对脊尾白虾存活和生长的影响[J]. 水产养殖, 2011, 27(3): 16 - 19.
- [45] 陈正中, 邹立壮, 郭瑾. 生物柴油的研究现状[J]. 化学工程师, 2007, 4(2): 10 - 15.
- [46] 张亚男. 生物柴油在节能环保应用中的展望[J]. 节能技术, 2007, 25(2): 164 - 168.
- [47] 齐沛沛. 微藻油脂制备生物柴油研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2008: 25 - 33.
- [48] 王兆凯. 基于海洋硅藻的生物燃油生产[J]. 渔业现代化, 2008, 35(2): 60 - 64.
- [49] 商金杰. 山东探索海洋微藻制取生物柴油[J]. 中国海洋报, 2008, 5(2): 1.
- [50] 余杨. 基于生物柴油制备的海洋高脂微藻筛选[D]. 厦门: 厦门大学, 2009: 45 - 51.
- [51] MATA T, MARTINS A, CAETANO N. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 217 - 232.
- [52] 梅洪, 张成武, 殷大聪, 等. 利用微藻生产可再生能源研究概况[J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(6): 650 - 660.
- [53] 易翠平, 杨明毅. 三种绿藻总脂肪和脂肪酸的测定[J]. 食品与机械, 2001, 3(2): 36 - 38.
- [54] 王铭, 刘然, 徐宁, 等. 13 种微藻的脂肪酸组成分析[J]. 生态科学, 2006, 2(6): 542 - 544.
- [55] 于红, 张学成. 螺旋藻多糖对小鼠 S-180 肉瘤的免疫抑制作用[J]. 海洋科学, 2003, 27(5): 58 - 60.
- [56] 蒋霞敏, 郑亦周. 14 种微藻总脂含量和脂肪酸组成研究[J]. 水生生物学报, 2003, 5(3): 15 - 20.
- [57] 庄惠如, 施巧琴, 卢海声, 等. 营养胁迫对雨生红球藻虾青素累积的影响[J]. 水生生物学报, 2000, 24(3): 208 - 212.
- [58] 常春. 螺旋藻在我国食品工业中的研究和开发现状[J]. 中国食物与营养, 1995, 1(3): 27 - 33.
- [59] 刘中申. 螺旋藻的研究进展与开发利用[J]. 中医药信息, 1997, 6(3): 11 - 17.
- [60] SMIT E N, OELEN E A, SEERAT E, et al. Breast milk docosahexaenoic acid(DHA) correlates with DHA status of malnourished infants[J]. American Journal of Obstetrics and Gynecology, 2003, 188(5): 1348 - 1353.
- [61] 高政权, 孟春晓. 微藻与水环境修复[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(3): 30 - 34.
- [62] 李志勇, 郭祁远, 李琳, 等. 利用有机废水与人畜废物生产藻类单细胞蛋白饲料[J]. 粮食与饲料工业, 1998, 2(3): 24 - 26.
- [63] ASLAN S, KAPDAN IK. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae[J]. Ecological Engineering, 2006, 28(1): 64 - 70.
- [64] 莫健伟, 姚兴东, 张谷兰, 等. 海藻去除水中双偶氮染料机理及重金属离子研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(3): 241 - 246.
- [65] 邹宁, 李艳, 孙东红. 几种有经济价值的微藻及其应用[J]. 烟台师范学院学报: 自然科学版, 2005, 21(1): 59 - 63.
- [66] CHEN Q H, PENG H J. Ecological impact of ocean acidification[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(19): 108 - 111.
- [67] 陈清华, 彭海君. 海洋酸化的生态危害研究进展[J]. 科技导报, 2009, 27(19): 108 - 111.
- [68] KING A W, EMANUEL W R, POST W M. Projecting future concentrations of atmospheric CO₂ with global carbon cycle models[J]. Environmental Science & Technology, 1992, 26(2): 91 - 108.
- [69] DRAKE B G, GONZÁLEZ MEIER M A, LONG S P. More efficient plants: A consequence of rising atmospheric CO₂[J]. Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Physiol, 1997, 48(1): 609 - 639.
- [70] MOORE B D, CHENG S H, SIMS D, et al. The biochemical and molecular basis for photosynthetic acclimation to elevated atmospheric CO₂[J]. Plant Cell Environ, 1999, 22(6): 567 - 582.
- [71] BOWES G. Facing the inevitable: Plants and increasing atmospheric CO₂[J]. Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Physiol, 1993, 44(1): 309 - 332.