

藻类在农业生产中的资源化利用

常锋毅¹ 潘晓洁² 沈银武³ 李伟¹ 刘永定³

1. 中国科学院武汉植物园, 武汉 430072; 2. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 武汉 430079;
3. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072

摘要 藻类是低等的光合自养生物,与农业生产具有十分紧密的联系,并且随着人们对藻类生理生态特性认识的深入,在农业生产实践中其应用越来越广泛。本文从藻类对农业环境的改善、作为食品、食品添加剂或保健品,以及作为饲料或饵料等几个方面对其在农业生产中的资源化利用进行综述。

关键词 藻类; 资源化利用; 肥料; 食品; 饲料; 添加剂

中图分类号 S 917.3 文献标识码 A 文章编号 1000-2421(2014)02-0139-06

藻类是地球上最早出现的光合自养生物,作为最低等的光合生物,它们的存在不但改变了原始大气组成,并且通过光合作用为随后通过进化形成的多种生命形态提供了至关重要的物质 O₂。此外,与农业生产密不可分的关键性物质土壤的形成,也离不开藻类的贡献:藻类、地衣等生物死后的残体形成最初形态的土壤,苔藓类植物在此基础上才进一步形成如今人类赖以生存的土地。因此,从某种意义上讲,没有藻类就没有人类和现代农业的发展。

藻类与农业生产具有如此密切的关系,因此,早在 2 000 多年前就有关于劳动人民利用藻类作为食物、药材、饲料的记载。并且,随着人们对藻类知识的深入了解,藻类在农业生产中的应用越来越广泛,涉及农业生产的方方面面。归纳起来,现有的关于藻类在农业生产中的应用包括:利用藻类改善农业生产环境、直接作为食品、作为食品添加剂或保健品、利用藻类生长物质促进农作物生长以及作为饲料或饵料。本文围绕以上几个方面综述藻类在农业生产中的资源化利用。

1 藻类作为农业肥源的应用

1.1 固氮蓝藻作为水稻肥源

虽然很早以前人们在农业生产的实践过程中就已经发现某些藻类能促进水稻生长,并不自觉地利用了固氮藻类这种生物学特性,但是直到 1889 年

Frank^[1]发现某些藻类具有固氮的生物学特性后,人们才开始自觉地去认识、利用固氮蓝藻为农业生产服务。到 20 世纪 90 年代为止,世界各地已报道发现有 33 属 150 多种藻类具有固氮能力^[2],所报道的固氮蓝藻多数属于念珠藻属和鱼腥藻属,随着研究手段和方法的进步,将有更多种类具有固氮能力的藻类被发现。

藻类所具有的固氮特性和自身的生活特性使其在水生作物的栽培方面具有广阔的应用空间。1939 年 De 发现生长有固氮蓝藻的稻田在不施肥的情况下,可以通过藻类的固氮作用使水稻连年保持较高的产量^[3]。由于水稻是世界各国重要粮食作物之一,因此这一发现引起了各国利用固氮蓝藻提高水稻产量的研究热潮。研究表明,在水稻田中接种固氮蓝藻,可使稻谷增产 15%~30%^[4]。国内关于固氮蓝藻的研究起步较晚,20 世纪 50 年代末中国科学院水生生物研究所的研究人员先后在湖北各地分离纯化到固氮鱼腥藻、多形鱼腥藻及满江红鱼腥藻,并对其固氮特性和培养条件进行了研究^[5]。这些工作为后来利用固氮蓝藻在稻田中作为肥源提供了直接的理论依据。自 1958 年以来,黎尚豪等^[6-7]及其所在研究团队^[8]通过多年实验室和田间研究,解决了限制固氮蓝藻肥田应用的两大瓶颈,即如何获得大量藻种和如何使藻种快速繁殖两大问题,并在随后的大田试验中成功运用固氮蓝藻使 3 000 hm²

收稿日期: 2013-06-04

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC06B00)和武汉市学科带头人计划项目(201051730562)

常锋毅, 博士, 助理研究员, 研究方向: 藻类环境生物, E-mail: chang602118@163.com

通信作者: 刘永定, 博士, 研究员, 研究方向: 藻类生理生态学, E-mail: liuyd@ihb.ac.cn

水稻成功增产 10% ~ 30%。

1.2 利用藻类改土固沙

土壤作为农业生产的基础,其质量是限制农业生产可持续发展的关键性因素之一。目前改善土壤质量的方法很多,但是如何更经济、更有效地改善土壤的质量是摆在农业生产面前的一道难题。由于土壤藻类是几乎在所有类型土壤中普遍存在的一类能够进行光合放氧的微生物,在土壤形成、改善土壤生态系统以及提高土壤肥力等方面具有独特的生理生态学功能^[9]。因此,利用藻类改善土壤质量是一种经济可行的方法。

藻类改善土壤质量的途径有三个方面:增加土壤中氮的含量、改善土壤结构以及通过光合放氧提高土壤氧气含量。土壤中的藻类几乎涵盖藻类所有门类,就生物量而言,土壤藻类以绿藻门种类居多,而具有固氮能力的藻类则是蓝藻门的一些种类。固氮蓝藻不仅可直接同化空气中的游离态氮,还可以通过影响其他固氮土壤微生物活性,增加其固氮能力以间接改善土壤质量^[10]。有研究表明,藻类能够提高土壤中有机质和有效磷的含量,提高土壤肥力^[11]。刘永定等^[12-13]对中国长江及黄河流域土壤藻类进行的调查发现,藻类物种多样性随着土壤有机质或无机 N、P、K 含量的增多而增加,说明土壤藻类与土壤肥力有着必然的内在联系。藻类还可以通过分泌胞外多糖等物质,使土壤微粒粘结,从而改变土壤结构^[14-15],这一特性有助于土壤氮、磷营养的保持以及有机质的增加。不仅如此,不同层次的土壤藻类通过光合放氧为异养微生物创造了良好的生境,从而有利于促进土壤的形成,推动整个生态系统的能量流动和物质循环。

利用藻类改善土壤质量的另一个重要研究方面就是利用其形成的生物结皮防风固沙。在广大的荒漠、半荒漠地区,藻类形成的生物结皮对于水土保持、流沙固定、其他生物类群的生长繁殖以及土壤生态系统的最终形成具有重要的促进作用^[9,16]。因此,研究藻类结皮的分布、结构以及形成机理对利用土壤藻类固沙改土具有重要的指导意义。

1.3 微囊藻作为有机无机复混肥的应用

湖泊富营养化程度加剧,引起蓝藻水华频繁暴发,水华暴发过程产生的巨大生物量是目前水环境治理所面临的一大难题。由于形成水华的蓝藻含有很高的氮、磷营养以及其他多种微量元素,因此,如能利用收获的巨大藻类生物量进行合理的资源化利

用,不但可以快速、有效地消除蓝藻水华,而且还可以对农业生产带来一定的经济效益。

早在 20 世纪 80 年代,国内就有研究者直接利用水华蓝藻作为肥料进行肥田研究,也取得了一定的效果^[17]。但是,由于在利用过程中对蓝藻水华未经过任何处理,一些产毒的水华蓝藻释放的毒素,对农业生产具有潜在的威胁,使其推广应用受到一定限制。沈银武等^[18]采用机械收获方法在滇池获得大量的蓝藻干粉,并尝试采用多种处理方法解决其安全脱毒问题,发现臭氧处理和发酵处理均可在较短时间内达到对蓝藻干粉彻底脱毒的效果^[19-20]。这一研究很好地解决了水华蓝藻资源化利用的脱毒问题,为其生物利用提供了安全性基础。在对农作物进行田间肥效试验时发现,施用蓝藻有机无机复混肥的烟草、西芹、韭菜、康乃馨等作物的产量较使用普通复合肥提高 10% ~ 20%,并且在作物及土壤中均未检出藻毒素^[21-22]。国外也有将水华蓝藻作为有机肥料的报道,研究发现以蓝藻制备的有机肥料肥效优于一般化肥。到 1992 年,日本对收获的水华微囊藻已全部实现肥料化,产量达 120 ~ 180 t/a^[23]。利用水华蓝藻作为农业生产中有机无机复混肥,既解决了水华蓝藻巨大生物量难以处置的问题,又改善了环境,增加了社会和经济效益。这种“变废为宝”的做法,符合以可持续发展原则为基础的“循环经济”理论,在以后农业生产实践中应积极地加以推广。

2 藻类作为食品的应用

2.1 藻类直接作为食品

藻类作为食品被人类食用有悠久的历史,根据资料,3 000 多年前亚太地区的人们就已经有食用海藻的记载。现代研究表明:藻类植物中富含人类所需要的 8 种必需氨基酸、蛋白质、脂肪、碳水化合物以及多种微量元素等营养物质。因此,开发以藻类为原材料的食品替代传统农业生产中的种植产品具有很广阔的应用前景。

目前,全世界记录的 3 万余种藻类植物中,约近百种海藻能被人类食用,多属于红藻、褐藻和绿藻三大类。如红藻门的紫菜(*Porphyra* sp.)、鸡毛菜(*Pterocladia tenuis*)、石花菜(*Gelidium* sp.)、褐藻门的海带(*Laminaria japonica* Aresch.)、裙带菜(*Undaria pinnatifida* (Harv.) Sur.) 以及绿藻门的石莼(*Ulva lactuca* L.)、浒苔(*Enteromorpha prolifera*

Mull j. Ag.) 等都是人们所喜爱的可食用海产藻类植物。此外,海产藻类中还有少数几种蓝藻门和黄藻门的种类也可以食用。

淡水种类中的发菜(*Nostoc flagelliform*)、葛仙米(*Nostoc sphaeroides*)、刚毛藻(*Cladophora* sp.) 等是人们所喜爱的藻类食品之一,具有悠久的食用历史。如发菜,由于其与“发财”谐音,因此常作为吉祥与好运的象征而为人所喜食。关于葛仙米食用价值,早在清代的《本草纲目拾遗》中已有记载。葛仙米不仅含人体必需的8种氨基酸,而且蛋白含量高达56%,是一种营养价值很高的食品资源^[24]。而刚毛藻则是云南景洪地区傣族同胞传统食用和出口缅甸等国的“岛”和“解”的主要成分。除此之外,螺旋藻作为食品被食用也有悠久的历史,非洲中西部以及美洲墨西哥部分地区的居民长久以来有以螺旋藻为食的传统。

除以上传统的食用藻类,小球藻(*Chlorella vulgaris* Beij) 由于其含有丰富的蛋白质、维生素和矿物质,可以满足人体对各种营养的需要,自1890年由 Beijerinck 发现并命名以来,就一直备受人们的关注^[25]。目前,日本、美国、德国、印度和我国等十几个国家和地区都在开展小球藻的培养、食用研究。为此,相信小球藻作为一种新型食品,会在未来的几十年内产生十分巨大的社会和经济效益。

2.2 藻类作为保健品

藻类除被人类用作食品直接食用外,在对其进行研究时,人们还发现很多藻类在生长的某一时期或生长在某种特殊环境时可以产生许多具有生物活性的物质,包括生物多糖、多支链不饱和脂肪酸、各种维生素、各种微量元素、人体必需氨基酸以及抗氧化成分等活性物质。在抗癌、防癌、增强机体免疫能力、促进新陈代谢、均衡营养、延缓衰老等方面具有很好的保健功效^[24 26-27]。因此,越来越多的人开始选择藻类作为保健品,相信在今后的一段时期内,藻类在保健品行业中所占的比重会逐渐加大。

目前市场上常见的藻类保健品有螺旋藻、小球藻、杜氏藻等,对这些藻类的研究已经比较透彻,生产上也已经形成一定规模。螺旋藻是一种研究、开发较早的藻类保健品,自1989年云南程海建成第一座螺旋藻生产基地以来,目前我国的螺旋藻生产规模已跃居世界第一。螺旋藻产业的快速发展是同其良好的保健功能分不开的。实践证明,螺旋藻对高血压、贫血、胃病、糖尿病、癌症等都具有很好的治

疗、保健作用^[24 27]。因小球藻细胞较小难以收获、细胞壁较厚不易吸收利用,并且用其制成的保健品口感较差;杜氏藻最适生长温度较高,低于30℃往往竞争不过其他藻类,限制了其在户外的大规模露天培养。这些客观原因造成了小球藻和杜氏藻的研究开发较螺旋藻落后的局面。但是,目前已经发现小球藻和杜氏藻含有多种不同于螺旋藻的生物活性物质,如利用小球藻对特殊元素的富集作用制成各种用途不同的保健品^[28]。杜氏藻则在受到高盐、低营养、高光胁迫时可以产生具有很强抗氧化活性的β-胡萝卜素^[29]。在这些方面,小球藻和杜氏藻的保健功能明显优于螺旋藻。

除以上介绍的几种常见的具有保健功能的藻类及其生物活性物质外,近年来人们发现藻多糖具有很好的抗癌、抗衰老、抗疲劳、抗辐射的活性。而γ-亚油酸能显著降低血液中胆固醇含量,促进血液流通和细胞的新陈代谢。以往提取藻类多糖是以螺旋藻为原料,γ-亚油酸则是从月见草(*Evening primrose*) 籽中进行提取。因此,在大规模生产时往往受到成本和原材料的限制。国家“863”项目“滇池蓝藻水华污染控制技术研究”课题组,针对滇池蓝藻水华暴发时产生的巨大生物量,研究利用微囊藻水华提取γ-亚油酸和藻类多糖,并取得了很好的效果,其产率分别为0.895%和6.2%^[22 30]。此外,有研究者对从藻类中提取的多糖类活性物质进行了抗癌试验,发现其在较低的浓度下就能够对肿瘤细胞表现出很强的抑制作用^[31]。从以上研究可以看出,藻类植物作为保健品,对人类健康的贡献不容忽视。

2.3 藻类作为食品添加剂

根据《中华人民共和国食品卫生法》规定,食品添加剂是指“为改善食品品质和色、香、味,以及为防腐和加工工艺的需要而加入食品中的化学合成或者天然物质”。可以看出,可以用作食品添加剂的物质既可以人工合成,也可以从天然物质中提取。但是,随着研究的深入,人们逐渐发现长期食用部分合成的食品添加剂会对人体健康造成各种损害,因此,近年来逐渐将目光转向了天然的食品添加剂。由于藻类含有大量人体所必需的微量元素、色素蛋白、抗氧化物质,并且其易于快速、大量培养,所以已经成为人们获得天然食品添加剂的一条经济、可行的重要途径。目前,藻类在作为食品添加剂方面除主要用来提取藻蓝蛋白、叶绿素、β-胡萝卜素、虾青素等食用色素,还可以作为食品中维生素、脂肪、脂

肪酸以及糖类的天然添加剂。

藻类作为一种光合自养型生物,细胞内具有含量很高的捕光色素和光合色素——藻胆蛋白和叶绿素,这两种光合色素是食品添加剂中的常用色素。藻胆蛋白是一类光合辅助色素,包括藻蓝蛋白、别藻蓝蛋白和藻红蛋白等三类。其中,藻蓝蛋白是卟啉类色素蛋白,常作为蓝色食品添加剂而广泛使用。20世纪80年代,提取藻蓝蛋白往往是以螺旋藻为材料,因此,其生产受到成本及原料的限制。刘永定^[22]在“滇池蓝藻水华污染控制技术研究”课题中研究利用水华蓝藻生产藻蓝蛋白,既解决了生产原料的问题,又达到了变废为宝的目的。利用该方法提取藻蓝蛋白,其提取率为87.5%,纯度达 $1.2 \sim 2.0(A_{260}/A_{280})$,并且对其进行毒性检测确定其为实际无毒级^[22]。 β -胡萝卜素是所有藻类细胞内存在的一种具有很强抗氧化活性的细胞色素,可以从盐生杜氏藻、小球藻中提取以用作食品添加剂^[32]。

另外一种天然食品添加剂是虾青素,其属于类胡萝卜素类物质,是甲壳类和三文鱼的主要色素,因此常用作此类产品加工过程中的添加剂^[33-34]。目前,虾青素可以人工合成,并且其质量可以达到食品添加剂的要求,还可以从甲壳动物、酵母菌以及雨生红球藻(*Haematococcus pluvialis*)等多种生物中提取。但是,无论从生产成本还是从虾青素产量来看,通过雨生红球藻生产虾青素是目前最经济、最有效的方法^[35]。此外,也有报道小球藻的某些品系在不良生长环境中也可以产生大量虾青素^[36],具有潜在的开发利用价值。

3 藻类作为农业饲料或饵料的应用

3.1 藻类作为家禽、牲畜饲料

如前文所述,藻类一般含有较高的蛋白质和碳水化合物,是一种可以用作家禽、牲畜的天然优质饲料。20世纪80年代人们就已经利用某些藻类作为家禽、牲畜饲料或饲料添加剂,最常用的是小球藻和螺旋藻。国内以螺旋藻饲喂雏鸡、肉仔鸡或者蛋鸡的研究表明,其可以显著促进鸡只性成熟、增加体质量、提高鸡肉质量和产蛋率^[37-38]。Kato^[39]的研究表明:螺旋藻作为饲料添加剂还可以提高鸡蛋质量。Anderson等^[40]研究了螺旋藻对鹌鹑蛋品质的影响,发现同样可以提高产蛋质量。以小球藻作为家禽饲料进行的研究也获得类似的效果^[41]。小球藻和螺旋藻不仅可以作为家禽的饲料,还是牲畜类的优良

饲料。韦启鹏等^[42]以1%螺旋藻饲喂仔猪,发现能明显提高断奶仔猪生长状况,减少腹泻发生率。螺旋藻还可以显著提高肉牛和绵羊的饲料吸收效率,提高产奶量和乳品质量^[43]。

除以上两种用作饲料的藻类外,沈银武等^[44]利用鱼腥藻作为肉鸡饲料,发现以添加2%鱼腥藻粉的饲料饲喂肉鸡,对其生长没有显著影响,但显著降低了鸡肉中重金属的积累。朱煜兰等^[45]和谢萍等^[46]分别研究了利用微囊藻粉作为饲料添加剂对猪血相、肠道菌落和育肥的影响,发现微囊藻粉对猪血相无显著影响,但是显著增加了肠道中有害菌的数量,并可以引起肝、肾的显著病变。这可能是由于在以微囊藻作为饲料时,未对其进行脱毒处理引起的。在利用脱毒水华蓝藻作为鸡、鸭饲料添加剂的研究中发现,蓝藻粉可明显改善肉鸡和鸭生长状况,提高蛋鸡产蛋率,缩短鸭的上市时间^[22],表明水华蓝藻在进行脱毒处理后是可以用作家禽饲料的,这也为水华蓝藻的资源化利用提供了一条新的途径。

3.2 藻类作为水产养殖业饵料

水生生态系统和陆地生态系统在能量来源上是相同的,都依赖于植物的光合作用提供能量,不同之处是陆地生态系统的能量供应者是植物,而水生生态系统的能量供应者是藻类。因此,可以认为藻类是水生生态系统食物链的基础。在水产养殖中藻类不仅可以直接作为水产种类的饵料,也可以通过强化动物性饵料,间接作为水产养殖种类的饵料。目前,国外应用在鱼类、贝类、甲壳类等水产养殖中的饵料藻类约有40余种,在海产养殖中常用的饵料已有20余种^[47],主要是蓝藻门、绿藻门、硅藻门、金藻门和黄藻门的一些种类。由于藻类含有丰富的蛋白质、碳水化合物、维生素、无机盐及微量元素,可以满足不同水产种类对饵料的要求,因此,在密度养殖的环境中,可以作为人工饵料主要成分。

螺旋藻和小球藻不但可以作为食品和保健品,也是一种常见的人工饵料,是用作鱼、虾幼苗的优良饵料^[48]。研究表明,小球藻可以显著地提高鱼类抗病能力和肉质^[49],螺旋藻可以使鱼、虾、蟹、贝料肉比显著降低,幼体成活率和肉品质地明显提高^[50]。以鱼腥藻作为饵料生物的研究发现,其不仅可以提高鲤的成活率,降低其饵料系数,并可以显著增加对虾体长和体质量^[44]。此外,雨生红球藻具有产生虾青素的特点,用作饵料可以增加三文鱼和甲壳类动物肉品颜色,也是目前应用比较广泛的一种饵

料生物^[32]。

4 藻类在农业生产资源化利用中的问题与展望

虽然藻类在农业生产中的应用范围越来越广泛,但是,其资源化利用存在一些局限和问题。应用固氮蓝藻作为水稻氮素肥源,虽然具有很好的应用价值,也在部分地区进行了推广,但是就国内整个水稻种植而言,推广的力度还远远不够。应用藻类对荒漠地区改土固沙方面也存在类似问题,有待于进一步解决。藻类作为食品、食品添加剂或者保健品方面,由于环境污染使得一些传统上作为食品的藻类面临或已经消失,也使得一些食品添加剂或者保健品质量降低,甚至含有对人体有害的物质。徐海滨等^[51]对我国70多个螺旋藻生产基地进行了调查,发现很多螺旋藻生产基地在生产过程中和市售产品中均有不同程度的微囊藻毒素污染,警示我们食品添加剂和保健品的质量安全问题不容忽视。而利用藻类作为饲料或者饵料方面,现有的研究存在范围过于狭窄、没有充分利用藻类为更多畜禽养殖服务的问题。针对藻类在资源化利用方面存在的问题,应该加强藻类作为氮素肥源、改土固沙以及饲料和饵料方面的推广应用。作为食品的藻类,更应该注重其在生产过程中的质量安全控制问题。

参 考 文 献

- [1] FRANK B. Uber die pilzsymbiose der leguminosen [J]. Deutsche Botanische Gesellschaft, 1889, 7: 332-346.
- [2] 沈银武,黎尚豪. 固氮蓝藻培养和应用的结果与展望 [J]. 水生生物学报, 1993, 17(4): 357-364.
- [3] DE P K. The role of blue-green algae in nitrogen fixation in rice-field [J]. Biological Sciences, 1939, 127: 121-139.
- [4] HE H Z, LI Y J, CHEN T F. Butachlor induces some physiological and biochemical changes in a rice field biofertilizer cyanobacterium [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2013, 105(3): 224-23.
- [5] 黎尚豪,叶清泉,刘富瑞,等. 固氮蓝藻对水稻肥效的初步研究 [J]. 水生生物学集刊, 1959(4): 440-444.
- [6] 黎尚豪,叶清泉,刘富瑞,等. 固氮蓝藻作为水稻肥源的研究 [J]. 水生生物学集刊, 1962(1): 55-61.
- [7] 黎尚豪. 固氮蓝藻作为水稻肥源的研究 [J]. 水生生物学集刊, 1981, 7(3): 417-423.
- [8] 中国科学院水生生物研究所第五研究室藻类实验生态组. 双季晚稻田大面积放养固氮蓝藻试验 [J]. 水生生物学集刊, 1978, 6(3): 299-310.
- [9] 刘永定,黎尚豪. 土壤藻类及其生理生态 [J]. 水生生物学报, 1993, 17(3): 272-277.
- [10] LICHNER J, HALLETT P D, DRONGOVA Z. Algae influence the hydrophysical parameters of a sandy soil [J]. Catena, 2013, 108: 58-68.
- [11] 凌丽俐, 卿人韦, 傅华龙, 等. 藻类对土壤肥力的影响 [J]. 四川大学学报, 2003, 40(1): 135-138.
- [12] 刘永定, 沈银武, 宋立荣, 等. 黄河中游土壤藻类的种类组成与土壤肥力的关系 [J]. 水生生物学报, 1999, 23(5): 434-442.
- [13] 刘永定, 黎尚豪. 长江中游黄棕壤地区几种稻田土壤蓝藻种类及田间季节差异 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 266-269.
- [14] MAGER D M, THOMAS A D. Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts. A review of their role in dryland soil processes [J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(2): 91-97.
- [15] HU C, LIU Y, PAULSEN B S, et al. Extracellular carbohydrate polymers from five desert soil algae with different cohesion in the stabilization of fine sand grain [J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 54: 33-42.
- [16] WU L, ZHANG G K, LAN S B. Microstructures and photosynthetic diurnal changes in the different types of lichen soil crusts [J]. European Journal of Soil Biology, 2013, 59: 48-53.
- [17] 余源盛, 徐志俊. 蓝藻湖靛对水稻肥效的研究 [J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(2): 125-131.
- [18] 沈银武, 刘永定, 吴国樵, 等. 富营养化湖泊滇池水华蓝藻的机械清除 [J]. 水生生物学报, 2004, 28(2): 131-136.
- [19] 敖鸿毅, 沈银武, 丘昌强, 等. 滇池水华蓝藻干粉制剂的生物脱毒实验 [J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(1): 1-4.
- [20] 沈强, 刘永定, 宋立荣, 等. 产毒微囊藻藻粉的脱毒技术研究 [J]. 水生生物学报, 2004, 28(2): 137-140.
- [21] 沈银武, 刘永定, 吴国樵, 等. 蓝藻有机无机复混肥对几种作物的增效试验 [J]. 水生生物学报, 2005, 29(4): 399-405.
- [22] 刘永定. 滇池蓝藻水华污染控制技术研究 [R]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2004.
- [23] 汪之和, 施文正. 蓝藻综合利用 [J]. 渔业现代化, 2002(2): 32-33.
- [24] LI D H, XING W, LI G B. Cytochemical changes in the developmental process of *Nostoc sphaeroides* (cyanobacterium) [J]. Journal of Applied Phycology, 2009, 21(1): 119-125.
- [25] YAMAGUCHI K. Recent advances in microalgal bioscience in Japan, with special reference to utilization of biomass and metabolites: a review [J]. Journal of Applied Phycology, 1997, 8(6): 487-502.
- [26] HERRERO M, CIFUENTES A, IBANEZ E. Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: plants, food-by-products, algae and microalgae: a review [J]. Food Chemistry, 2006, 98(1): 136-148.
- [27] MUTHURULAPPAN S, FRANCIS S P. Anti-Cancer mechanism and possibility of nano-suspension formulation for a marine algae product fucoxanthin [J]. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention, 2013, 14(4): 2213-2216.
- [28] 李志勇, 郭祀远, 李琳, 等. 微藻保健食品的开发与应用 [J]. 食

- 品研究与开发, 1997, 18(2): 38-40.
- [29] MARCHAL L, MOJAAT-GUEMIR M, FOUCAULT A. Centrifugal partition extraction of beta-carotene from *Dunaliella salina* for efficient and biocompatible recovery of metabolites [J]. *Bioresource Technology* 2013, 134: 396-400.
- [30] 韩庆国, 沈银武, 胡章立, 等. 滇池水华蓝藻 γ -亚麻酸的提取与含量分析 [J]. *生物技术* 2004, 14(5): 50-52.
- [31] 张宏, 冯红, 张德禄, 等. 爪哇伪枝藻胞外多糖诱导皮肤癌细胞 (A431) 凋亡的研究 [J]. *水生生物学报* 2008, 32(6): 874-880.
- [32] CHEN B H, HUANG J H. Degradation and isomerization of chlorophyll a and β -carotene as affected by various heating and illumination treatments [J]. *Food Chemistry* 1998, 62(3): 299-307.
- [33] CHEN T, WANG Y. Optimized astaxanthin production in *Chlorella zofingiensis* under dark condition by response surface methodology [J]. *Food Science and Biotechnology* 2013, 22(5): 1343-1350.
- [34] MORI J, YOKOYAMA H, SAWADA T. Anti-oxidative properties of astaxanthin and related compounds [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 2013, 580(1): 52-57.
- [35] LI J, ZHU D L, NIU J F. An economic assessment of astaxanthin production by large scale cultivation of *Haematococcus pluvialis* [J]. *Biotechnology Advances* 2011, 29(6): 568-574.
- [36] IP P F, CHEN F. Production of astaxanthin by the green microalga *Chlorella zofingiensis* in the dark [J]. *Process Biochemistry* 2005, 40(2): 733-738.
- [37] 周爱堂, 李日新. 钝顶螺旋藻饲喂家鸡的初步研究 [J]. *上海畜牧兽医通讯*, 1986(6): 7-8, 24.
- [38] 刘开容, 杨祖伟. 螺旋藻添加剂饲喂肉鸡的研究 [J]. *饲料研究*, 1995(2): 4-6.
- [39] KATO T. *Spirulina* utilization of microalgae [M]. Tokyo: Koseisha-koseikaku, 1992.
- [40] ANDERSON D W, TANG C, ROSS E. The xanthophylls of *Spirulina* and their effect on egg yolk pigmentation [J]. *Poultry Science*, 1991, 70: 115-119.
- [41] BROWN M R. The vitamin content of microalgae used in aquaculture [J]. *Journal of Applied Phycology* 1999, 11(3): 247-255.
- [42] 韦启鹏, 谢金防. 螺旋藻对断奶仔猪生产性能的影响研究 [J]. *江西畜牧兽医杂志* 2000(6): 36-38.
- [43] 黄涛, 陈喜斌, 蔡江. 螺旋藻的生物活性成分分析及其在饲料中的应用 [J]. *饲料工业* 2003, 24(7): 21-23.
- [44] 沈银武, 刘永定, 朱运芝, 等. 利用鱼腥藻作为饲料的研究 [J]. *水生生物学报* 1999, 23(5): 425-433.
- [45] 朱煜兰, 周学文, 谢萍, 等. 饲喂滇池凤眼莲和蓝藻粉对猪的血象及肠道菌群的影响 [J]. *饲料研究* 1999(5): 33-36.
- [46] 谢涛, 周学文, 杨家雄, 等. 滇池蓝藻对肉仔鸡和生长肥育猪饲用效果研究 [J]. *云南畜牧兽医* 2002(2): 12-14.
- [47] SPOLAORE P, JOANNIS-CASSAN C, DURAN E. Commercial applications of microalgae [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 2006, 101(2): 87-96.
- [48] HOSEINI S M, KHOSRAVI-DARANI K, MOZAFARI M R. Nutritional and medical applications of spirulina microalgae [J]. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry* 2013, 13(8): 1231-1237.
- [49] SHARIFAH E N, EGUCHI M. Benefits of live phytoplankton, *Chlorella vulgaris*, as a biocontrol agent against fish pathogen *Vibrio anguillarum* [J]. *Fisheries Science* 2012, 78(2): 367-373.
- [50] 刘惠芳, 宋志刚. 螺旋藻在水产动物生产中的应用 [J]. *中国饲料* 2002(9): 18-20.
- [51] 徐海滨, 陈艳, 李芳, 等. 螺旋藻类保健食品生产原料及产品中心微囊藻毒素污染现状调查 [J]. *卫生研究* 2003, 32(4): 339-343.

Application of algae as a resource in agricultural activities

CHANG Feng-yi¹ PAN Xiao-jie² SHEN Yin-wu³ LI Wei¹ LIU Yong-ding³

1. Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

2. Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, China;

3. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

Abstract Algae are lower photosynthetic autotrophs which have close relationship with agricultural activities. With the deep understanding of physiological and ecological characteristics, algae have been used more and more widely in the practice of agricultural activities. This paper reviews the application of algae as a resource in agricultural activities including improvement of agricultural environment, utilized as food or food additives and health care products, as well as feed or bait.

Key words algae; resource utilization; fertilizer; food; feed; food additives

(责任编辑: 边书京)