

螺旋藻优质高产的新方法研究

刘德盛¹, 庄惠如², 郑凌凌², 林嵩¹, 胡宁三¹

(1. 福建农业科学院果树研究所, 福州 350013; 2. 福建师范大学生物工程学院, 福州 350007)

[摘要] 螺旋藻是一种已有 35 亿年生命史的最古老的原核光合生物, 已被联合国粮农组织 (FAO) 和世界卫生组织 (WHO) 誉为“21 世纪最佳保健食品”。通过多年多点室内外试验研究, 探明了 TA 乳粉促进螺旋藻优质高产的应用技术。在螺旋藻工厂化生产中, 向养殖池添加 TA 0.01~0.02 mg/L 的 TA 乳粉, 能促进螺旋藻的细胞分裂、增殖及藻丝生长, 提高净光合速率和干物质积累, 增强硝酸还原酶活力和呼吸强度, 并显著提高蛋白质、氨基酸、藻蓝蛋白、 β -胡萝卜素、叶绿素及类胡萝卜素等含量。在促进螺旋藻品质明显改善的同时, 还能显著提高其生物产量, 处理比对照的增产幅度可达 1.19~1.76 g/d·m², 增产率 20%~30%。用 TA 乳粉作为螺旋藻养殖的调节剂及其养殖工艺是一项新创举, 并开拓了 TA 乳粉在微藻上应用研究的新领域, 是促进螺旋藻优质高产的一种比较好的方法, 应用前景十分广阔。

[关键词] TA 乳粉; 螺旋藻; 植物生长调节剂

[中图分类号] S555+.6; S482.8+6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)12-0012-07

1 前言

螺旋藻 (*Spirulina*) 是地球上最古老的原核光合生物, 几乎与地球共生, 迄今已有 35 亿年的生命史^[1]。它是地球上营养最丰富、最均衡的天然绿色食品, 有“微型绿色营养库”之称。其蛋白质含量高达 50%~70%, 还富含维生素 (几乎所有的维生素)、矿物质及多种奇特的功能性物质 (如 γ -亚麻酸、小分子多糖、藻兰蛋白及 β -胡萝卜素) 等^[2~5], 并具有以下几个方面功效: a. 增强机体免疫力, 减缓细胞衰老; b. 刺激前列腺素合成, 调节机体生理功能; c. 促进新陈代谢, 加速伤口愈合, 防止皮肤角质化; d. 具有防癌、抑癌、抗辐射的作用; e. 调节血脂, 降低胆固醇、保护心血管; f. 具有抗疲劳和耐氧的作用; g. 对贫血、肝炎、糖尿病、胃及十二指肠溃疡、视力减退等多种疾病有良好疗效; h. 对严重营养不良的病人, 对全面增加儿童的营养及老人的营养保健均

有较好效果^[4]。许多远见卓识的科学家早就指出, 螺旋藻是人类未来的食品^[3]。1993 年在摩纳哥举行的首次螺旋藻世界大会, 认为螺旋藻是根除营养不良, 缓解饥荒的食物^[6]。因此, 螺旋藻作为食品、医药、保健品引起各国政府的高度关注, 全世界已有 80 多个国家和地区开展螺旋藻的研究和开发, 并建立起商业化生产的螺旋藻公司, 估计每年生产螺旋藻干粉超过 2 500 t。

我国“七五”期间, 国家科委和农业部将螺旋藻的研究、开发分别列入国家“七五”攻关计划项目和推广应用项目。1989 年在云南程海湖建成第一座螺旋藻工厂化生产中试基地, 受原国家科委的委托, 科技部中国农村技术开发中心一直负责组织实施螺旋藻产业化项目和高附加值的深度开发。从科研成果的产业化到开拓新的应用领域及技术两方面促进螺旋藻新兴产业的发展。截止 1997 年年底, 据不完全统计, 全国有养殖工厂近百家, 培养池面积超过 100×10^4 m², 若全部开工投产, 估计年生

[收稿日期] 2003-08-14; **修回日期** 2003-09-15

[基金项目] “七五”攻关计划和推广应用资助项目 (97Z168)

[作者简介] 刘德盛 (1937-), 男, 福建莆田县人, 福建农业科学院果树研究所研究员

产能力在 1 500 t 以上, 其中最大的螺旋藻基地位于高海拔的云南省永胜县程海湖, 养殖面积高达 $46 \times 10^4 \text{ m}^2$ ^[7]。然而, 由于科研赶不上生产发展的需要, 致使产量极低^[8], 产量低、品质差、成本高造成部分螺旋藻工厂停产。在这种情况下, 课题组 1997 年承担福建省科技厅下达的“TA 乳粉对螺旋藻优质高产作用的研究”课题。经 6 年试验研究, 已于 2003 年 4 月 15 日通过技术成果鉴定, 认为: “本项目开拓了 TA 乳粉在微藻上应用研究的新领域, 具有较大的理论意义和指导实践的实用价值, 居国际领先地位。TA 乳粉是从蜂蜡中提取的天然有机物, 已在农业部正式登记, 它具有无毒性、无污染、成本低、效益高和使用方法简便等优点, 是促进螺旋藻优质高产的一种比较理想的植物生长调节剂。该项技术进行大面积推广应用, 前景十分广阔。对社会经济发展和科技进步具有重要意义。”这项科技成果受到全国大部分螺旋藻养殖公司的欢迎和支持, 已与云南、广东、广西、山东、甘肃、四川及福建等省多家螺旋藻养殖工厂签订了实施中试 $93.9 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的合作协议书, 将为大面积推广应用打下基础。

2 试验条件与方法

供试藻种: a. 钝顶螺旋藻 (*Spirulina platensis*), 由连城县绿泽螺旋藻有限公司提供; b. 极大螺旋藻 (*Spirulina maxima*), 由福清市新大泽螺旋藻有限公司提供。

供试药剂: 采用厦门大学化工厂从蜂蜡中提取的 TA 晶体, 研制成 1.4% TA 乳粉。

试验地点: 福建省农科院果树所螺旋藻研究基地、福建师大生物工程学院微藻室、连城县绿泽螺旋藻养殖场、福清市新大泽螺旋藻养殖场等。

室外养殖池的试验方法: 设 TA 乳粉处理组和不加 TA 乳粉的对照组。每个处理组重复 1~4 次, 每次为 1 个养殖池, 每个养殖池的藻液重量为 100~150 t ($400 \text{ m}^2 \times 0.25 \text{ m}$ 或 $600 \text{ m}^2 \times 0.25 \text{ m}$)。处理组和对照组使用的培养液的成分 (Zarrouk 培养基)、藻种及管理水平等基本一致。处理组使用的 TA 质量浓度为 0.01~0.02 mg/L。接种后加入 1.4% TA 乳粉 (先将 TA 乳粉用 90℃ 以上的开水冲泡) 至池水中的 TA 质量浓度为 0.01~0.02 mg/L。按常规 5~6 天采收 1 次, 每采收 2~3 次后再添加 TA 乳粉至原定的质量浓度。采用 $57 \mu\text{m}$

尼龙网布进行采收, 得到的藻泥用压力式喷雾干燥器烘干。经处理的各重复小区 (池) 混合一次性采收烘干或分别单独采收烘干。产量以烘干后的藻粉为准, 并进行必要的显著性测验。

室内培养条件及处理方法: 将 Zarrouk 培养基分装于 500 ml 的三角瓶中, 使每瓶中的培养基为 200 ml。加入事先配制的 TA 乳粉母液, 使其 TA 质量浓度为 0.01~0.3 mg/L, 以不加 TA 乳粉为对照组, 每处理组重复 3 次, 取对数生长期藻种按 1:9 比例接种, 培养物置往复式摇床 (90 次/min) 上, 一次性培养 7~14 d, 连续光照, 光强为 3 000~4 000 Lx, 温度控制在 25~26℃。

蛋白质测定: 由福建省中心检验所按 GB/T 5009.5-1985《食品中蛋白质的测定方法》测定。

氨基酸的测定: 由福建省微生物研究所进行氨基酸分析测定。

叶绿素 a 含量的测定: 取培养 7 天的藻液, 过滤后称取 0.1 g 鲜藻泥, 用 80% 丙酮提取叶绿素 a, 提取液定容至 50 ml, 用分光光度计于波长 660 nm 和 730 nm 下测 OD_{660} , OD_{730} , 并计算其含量。

类胡萝卜素含量测定: 类胡萝卜素提取方法同上。提取液 50 ml, 用分光光度计于波长 475 nm 和 730 nm 下测 OD_{475} , OD_{730} , 并计算其含量。

β -胡萝卜素含量的测定: 藻泥用 80% 丙酮提取色素, 提取液用分光光度计于波长 450 nm 下测 OD 值, 并计算其含量。

藻蓝蛋白含量测定: 称取 0.1 g 的鲜藻泥, 于 pH 7.5 的磷酸钠的缓冲溶液中反复冻融, 再用玻璃匀浆器反复研磨, 提取液定容至 50 ml, 用分光光度计于波长 615 nm, 750 nm 下测定 OD_{615} , OD_{750} , 并计算其含量。

光合速率及呼吸强度的测定: 取藻液 20 ml 置于 250 ml 三角瓶中, 并加入培养液至满瓶, 水封, 其中处理组的培养液中含 0.01 mg/L 的 TA, 以不加 TA 为对照, 在温度为 25~26℃, 光强为 2 000 lx 的条件下, 静置培养 20 h 后, 用测氧仪测定培养液的溶解氧, 其中增加的溶解氧量即为光合作用所释放的。同法, 以放置黑暗条件 20 h 后, 培养液中溶解氧的减少表示呼吸所消耗的氧量。每次试验重复 3 次。

硝酸还原酶活性测定: 取对数生长藻液接种至缺氮的培养基, 进行氮饥饿培养, 直至检测不出硝

酸还原酶的活性,然后将氮饥饿过的藻液接种到完全培养基,其中处理组的TA质量浓度为0.01 mg/L,以不加TA为对照,每次试验重复3次。按有关文献提供的方法进行测定。

生长速率测定:每天定时取样,摇匀后用分光光度计在波长为560 nm的条件下测定藻液的光密度(OD)值,根据OD值计算相对生长速率,公式如下: $K = (\lg N_t - \lg N_0) / t$,其中K为相对生长速率, N_0 和 N_t 分别为起始及培养t时的OD值,t为培养时间(d)。

3 TA乳粉促进螺旋藻生长的作用质量浓度试验

在螺旋藻培养中,由于藻细胞数目的增加,藻液颜色由浅变深,因而用光密度(OD)法可判断螺旋藻细胞的增殖和生长状况。试验表明,用TA 0.005~0.1 mg/L的5种不同质量浓度的TA乳粉处理后,各处理组的藻液光密度在7 d的培养期内与对照组比均有不同程度增加。其中以TA 0.01 mg/L处理的效果最佳,增加幅度为18.6%~42.86%。还可看出,各不同质量浓度处理均表现出在处理后的第4天达到最高值(图1)。这表明TA乳粉处理后,可缩短接种后的延滞期,使螺旋藻迅速进入对数生长期。生长周期的缩短对于提高螺旋藻的单产及降低生产成本十分有益。此外,在养殖池中经螺旋藻吸收后的TA质量浓度变化情况非常复杂,很难准确掌握在何时再添加多少TA乳粉,因此TA乳粉的较大有效浓度范围能确保在偏离最适TA质量浓度时也会有促进作用。

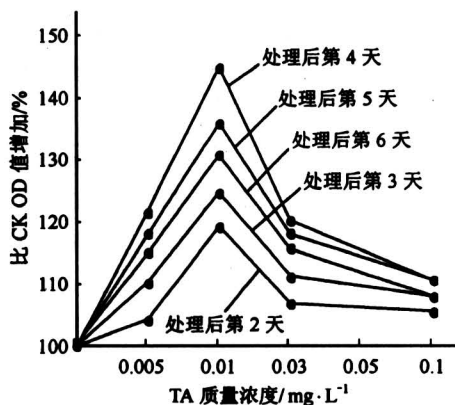


图1 TA乳粉质量浓度对螺旋藻液OD值的影响

Fig.1 Effect of different concentration of TA emulsion powder on OD value of spirulina

4 TA乳粉对螺旋藻产量的影响

4.1 1999年在连城县的试验结果

1999年7月7日至11月12日在连城县绿泽螺旋藻养殖场对钝顶螺旋藻的试验中,TA处理组和对照组的螺旋藻各采收12次,每100 t藻液(400 m²×0.25 m)处理组共收干藻粉363.13 kg,对照组共收干藻粉288.29 kg,处理组比对照组增收干藻粉74.84 kg(1.462 g/d·m²),增产率为25.96%(表1)。

表1 TA乳粉对螺旋藻产量的影响(连城县1999)
Table 1 Effect of TA emulsion powder on the yield of spirulina (Liancheng County 1999)

采收日期	每100 t藻液干重/kg		处理比CK干重增加	
	处理组	CK组	/kg	/%
1999-07-15-16	32.45	26.28	6.17	23.48
1999-07-22-23	34.57	27.45	7.12	25.94
1999-07-30-31	29.79	25.75	4.04	15.69
1999-08-12-13	28.68	26.68	2.00	7.50
1999-08-23-24	26.44	25.44	1.00	3.93
1999-09-01-03	25.80	24.24	1.56	6.44
1999-09-12-13	31.32	26.68	4.64	17.39
1999-09-23-24	29.40	24.24	5.16	21.29
1999-10-04-05	25.20	23.04	2.16	9.38
1999-10-16-17	36.52	20.60	15.92	77.28
1999-10-26-27	33.40	18.20	15.20	83.52
1999-11-10-12	29.56	19.69	9.87	50.13
总和	363.13	288.29	74.84	25.96

4.2 2001年在福清市的试验结果

2001年9月1日至11月25日在福清市新大泽螺旋藻养殖场的试验中,处理组和对照组各采收32次,每100 t藻液(400 m²×0.25 m)处理组共收干藻粉228.78 kg,对照组共收干藻粉187.97 kg,处理组比对照组增收干藻粉40.81 kg(1.19 g/d·m²),增产率为21.71%(表2)。

4.3 2002年在连城县的试验结果(连城县2001)

2002年10月27日至12月15日在连城县绿泽螺旋藻养殖场的试验结果如表3所示。设TA乳粉处理组与CK组处理,每组试验重复4次,每次一个养殖池,藻液重为150 t(600 m²×0.25 m)。处理组4个养殖池的产量(干重)总和为520.5 kg,对照组4个养殖池的产量(干重)总和为

313.5 kg，处理组比对照组增收干藻粉 207 kg (1.76 g/d·m²)，增产率为 66.03 %。经检验，其差异显著 (T=13.39 > T_{0.01}=3.707)。这个试验是在 11—12 月份低温条件下进行的，增产效果更佳，显示出 TA 乳粉能提高螺旋藻的抗逆性的特点。

表 2 TA 乳粉对螺旋藻产量的影响 (福清市 2001)
Table 2 Effect of TA emulsion powder on the yield of spirulina (Fuqing City 2001)

采收日期	100 t 藻液干重/kg		处理比 CK 增加	
	处理组	CK 组	/kg	%
2001-9-1 至 2001-9-7	57.19	52.68	4.51	8.56
2001-9-8 至 2001-9-16	19.26	18.50	0.76	4.11
2001-9-17 至 2001-9-21	43.35	32.01	11.34	35.43
2001-9-22 至 2001-9-27	22.60	20.02	2.58	12.89
2001-9-28 至 2001-10-6	17.02	11.59	5.43	46.85
2001-10-7 至 2001-10-30	28.73	21.04	7.69	36.55
2001-11-1 至 2001-11-5	17.23	10.17	7.06	69.42
2001-11-6 至 2001-11-25	23.4	21.96	1.44	6.56
总和	228.78	187.97	40.81	21.71

表 3 TA 乳粉对螺旋藻产量的影响 (连城县 2002)
Table 3 Effect of TA emulsion powder on the yield of spirulina (Liancheng County 2002)

采收 月-日	处理组 150 t 藻液干重 /kg				CK 组 150 t 藻液干重 /kg			
	总质量 = 520.5				总质量 = 313.5			
	A 池	B 池	C 池	D 池	A' 池	B' 池	C' 池	D' 池
11-4	42	25.5	36	31.5	31.5	21	10.5	4.5
11-14	52.5	37.5	36	42	37.5	30	27	21
11-30	31.5	28.5	19.5	46.5	25.5	19.5	13.5	13.5
12-15	22.5	27	19.5	22.5	15	16.5	12	15
各池和	148.5	118.5	111	142.5	109.5	87	63	54
处理比对照干重增加	/kg (%)				207.0 (66.03)			

注：每个养殖池的藻液重量均为 150 t (600 m² × 0.25 m)，T = 13.39 > T_{0.01} = 3.707 差异显著

总之，经 TA 0.01~0.02 mg/L 处理后，螺旋藻的增产幅度为 22 % ~ 66 %，干藻粉产量增加 1.19~1.76 g/d·m²。TA 乳粉对钝顶螺旋藻和极大螺旋藻均有显著增产效果，在低温逆境条件下，其增产幅度更大。

5 TA 乳粉对螺旋藻品质的影响

试验表明，TA 乳粉能显著提高螺旋藻的蛋白

质、氨基酸、藻蓝蛋白 (藻蓝素)、β-胡萝卜素、类胡萝卜素及叶绿素等含量，从而提高了品质。

5.1 提高蛋白质、氨基酸含量

螺旋藻的蛋白质质量分数高达 50 % ~ 70 %，同时，还含有人体必需的 18 种氨基酸。据试验样品的测试报告，经 TA 乳粉处理的螺旋藻的蛋白质质量分数比对照组提高 18.54 %，氨基酸的总量比对照组提高 12.15 %。在对其 17 种氨基酸的作用中有 16 种氨基酸的含量均比对照组明显提高，特别是它促进了异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、蛋氨酸、苏氨酸、缬氨酸等 7 种人体不能合成但又必需的、而谷物蛋白又缺乏的氨基酸含量显著提高 (表 4)，具有经济价值。

表 4 TA 乳粉对螺旋藻氨基酸含量的影响

Table 4 Effect of TA emulsion powder on the aminoacid content of spirulina

氨基酸名称	处理组/mg·g ⁻¹	CK 组/mg·g ⁻¹	比 CK 提高/%
天门冬氨酸	4.60	4.07	13.02
苏氨酸	2.49	2.24	11.16
丝氨酸	2.76	2.40	15.00
谷氨酸	7.69	7.23	6.36
甘氨酸	2.12	1.91	11.00
丙氨酸	3.65	3.18	14.78
胱氨酸	0.47	0.49	-4.26
缬氨酸	2.31	2.00	15.50
蛋氨酸	0.59	0.55	7.27
异亮氨酸	2.07	1.72	20.35
亮氨酸	4.06	3.48	16.67
酪氨酸	1.72	1.65	4.24
苯丙氨酸	1.73	1.56	10.90
赖氨酸	2.60	2.38	9.24
组氨酸	0.64	0.57	12.28
精氨酸	3.53	3.06	15.36
脯氨酸	1.10	0.86	27.91
总量	44.13	39.35	12.15

5.2 提高藻蓝蛋白含量

螺旋藻中的藻蓝蛋白质量分数高达 8 % ~ 22 %。试验表明，经 TA 乳粉处理的螺旋藻的藻蓝蛋白含量比对照组提高 54.13 %。藻蓝蛋白是水溶性色素，无毒、纯蓝，清亮可爱。不但可作为食品着色、化妆品的添加剂，而且还具有显著提高免疫力和抵抗癌症的功效，通过淋巴细胞系统正常控制细胞功能，阻止恶性肿瘤的增殖，抑制癌症的发展。藻蓝蛋白还可用作新一代荧光探针，它不仅荧光强

度比常用的荧光素强 30 倍, 而且还具有诸多优点。它能发出强烈的荧光, 将其同生物素、亲和素和各种单克隆抗体结合, 制造荧光探针。通过检测其发出的荧光, 可以用于荧光显微检测、荧光免疫测定、双色或多色荧光分析、癌细胞表面抗原检测、蛋白质和核酸等生物大分子的分析, 在临床诊断和生物工程研究中有广泛的用途。所以各国竞相开发, 美国的 Sigma 公司、德国 BM 公司等推出各自的产品, 行销国际市场, 其中试剂级 C-藻蓝蛋白 0.5 g, 价值达 5.5 万美元^[9]。在法国藻蓝蛋白每公斤市场价格相当于人民币 2 万多元。北京大学生命科学学院进行了藻蓝蛋白荧光探针的研制。中科院化工冶金研究所和中科院海洋研究所等单位也进行了藻蓝蛋白的荧光标记物和诊断试剂的研制^[7]。所以, TA 乳粉显著提高螺旋藻的藻蓝蛋白含量具有重大的经济价值。

5.3 提高 β -胡萝卜素含量

螺旋藻中所含的 β -胡萝卜素是胡萝卜的 4 倍。1 kg 螺旋藻含有高达 4 000 mg 的 β -胡萝卜素。试验表明, 经 TA 乳粉处理的螺旋藻的 β -胡萝卜素含量可比对照提高 38.58%。 β -胡萝卜素是维生素 A 的前体, 在体内也能转化成维生素 A。而维生素 A 能促进新细胞的快速增殖, 增强细胞膜的韧性, 如果缺乏它就会影响视力。 β -胡萝卜素对生长的均衡、骨骼的形成、牙齿的生长、维持皮肤的弹性、延缓衰老以及加速伤口的愈合等都有重要作用^[4]。甚至有报道, 它还具有抗癌、抗氧化的作用。所以, TA 乳粉显著提高 β -胡萝卜素含量为提高螺旋藻的品质做出重要的贡献。

5.4 提高叶绿素和类胡萝卜素含量

螺旋藻中的叶绿素含量是普通蔬菜的 10 倍以上。叶绿素不仅能促进消化, 而且还能中和血液中的毒素, 排除体内毒素和增强人体抗病免疫力等功能。经 TA 乳粉处理的螺旋藻的叶绿素含量可比对照提高 18.58%, 从而提高了其品质。试验还表明, 经 TA 乳粉处理的螺旋藻的类胡萝卜素含量可比对照提高 38.31%。类胡萝卜素的提高也有利于提高光合作用和产品品质, 因为在类胡萝卜素中有一半的含量是与提高品质有关的 β -胡萝卜素。

6 生理效应与增产原因分析

6.1 促进细胞增殖, 提高生长速率

螺旋藻的繁殖主要是分裂法, 沿单一断面进行

分裂繁殖。分裂产生的子细胞仍然密切相接, 形成由许多细胞联接的弯曲长丝, 称为藻丝。其繁殖速度相当快。在条件较好环境中, 繁殖一次(代)周期为 11 小时, 每天至少繁殖 2 代, 由 1 个螺旋藻分裂为 4 个。试验表明, 螺旋藻经 TA 乳粉处理后, 其藻液的光密度比对照组明显增加(图 1)。这表明它能促进细胞增殖, 使细胞数目增多和藻体增大。进一步研究表明, TA 乳粉对螺旋藻的生长速率常数 K 和群体细胞倍增时间 ($t_g = 0.301/K$) 均有明显的影响。如以 0.01 mg/L 处理后 2 d, 其生长速率比对照组提高 12.42%, 倍增时间由处理前 1.12 d 减少到 0.99 d。处理 7 d 时, 相对生长速率提高幅度有所下降, 与对照组相比, 最高增幅 6.57%, 而倍增时间减少了 6.41%。由此结果分析可知, 随着培养时间的延长, TA 乳粉的促进效果会逐渐减弱。因此, 在使用 TA 乳粉时, 不仅应考虑其最佳使用浓度, 还要考虑其有效时间。

6.2 增加藻丝长度和螺旋数

经 TA 乳粉处理的藻丝长度为 998 μm , 对照组的为 909.85 μm , 处理组比对照组增长 9.69%。相应螺旋数分别为 6.5 个和 5.5 个, 处理组比对照组增加 18.2%。这表明其藻体发生了有效的增大。较大的藻体易于采收和漏水。

6.3 增加光合色素含量, 促进能量代谢

试验表明, 螺旋藻经 TA 乳粉处理后, 其体内的叶绿素、类胡萝卜素及藻蓝素等光合色素含量分别比对照组提高 18.58%、38.51% 和 54.13%。已知所有藻类与高等植物都需要叶绿素 a 来进行光合作用, 叶绿素 a 是螺旋藻中仅有的一种叶绿素, 它主要吸收红光和兰紫光, 是真正吸收推动光合作用的光能色素。光是以量子为单位而存在的, 叶绿素 a 吸收了光量子的能量, 使其从原来稳定态能级跳跃到一个激发态。反应中心的激发态电子又可通过一系列的电子递体而传递形成还原辅酶 II (NADPH), 把光能转变为化学能。类胡萝卜素和藻蓝素被称为辅助色素, 也都能吸收光能, 但其所吸收的光能都要传递给反应中心的叶绿素 a 才能起光化学反应。所以, TA 乳粉增加光合色素含量的效应, 可促进光合能量代谢, 提高光合作用水平。

6.4 提高光合速率, 促进碳素代谢

试验表明, 经 TA 乳粉处理后, 螺旋藻的光合速率可比对照组提高 13.17%~29.93%。高等植物的光能利用率通常是 5%~6%, 而螺旋藻的光

能利用率高达 18 %，是一般农作物的 3 倍。光合作用的第一步是色素吸收光能并将电子依次传递；第二步是光能转变为化学能的过程，通过希尔反应和光合磷酸化作用，将光能以化学能的形式蓄积在同化力中（ATP（腺三磷）和 NADPH 合称同化力）；第三步则是利用同化力同化 CO₂，使它变成藻类有机物。所以，TA 乳粉对光合能量代谢的促进作用直接影响到同化 CO₂ 的碳代谢，TA 对碳代谢的促进效应，有利于形成骨架——碳水化合物。由于促进了 CO₂ 的固定，就提高了光合速率，而光合速率的提高是增加其生物产量的物质基础。

6.5 提高硝酸还原酶活力，促进氮素吸收利用

硝酸还原酶活力的高低体现出螺旋藻对硝酸盐的利用能力。从图 2 可看出，经 TA (0.01 mg/L) 处理后，螺旋藻硝酸还原酶活力明显比对照组高。在处理后的第 3 天，处理组的硝酸还原酶的活力比对照组提高 42.44 %。随着培养时间的延长，其活力逐渐下降，到了第 4 天、第 5 天、第 6 天、第 7 天，处理组的硝酸还原酶活力分别比对照组提高 20.05 %、17.85 %、13.73 % 及 2.74 %。由于硝酸盐被逐步消耗减少，所以其活力也逐渐降低。硝酸还原酶是氮素同化途径中的限速酶，它的作用是催化硝酸还原为亚硝酸。因而它是植物代谢中的一种极重要的酶类。提高硝酸还原酶活力，便可提高植物利用氮素的效率，故有人认为它的活力可作为作物产量的一个生理指标。TA 乳粉显著提高硝酸还原酶活力，促进了氮素代谢，增强了螺旋藻对硝态氮的吸收利用，加速了有机物向含氮物质转化，使其蛋白质和氨基酸的含量提高，这是 TA 乳粉提高螺旋藻品质的生理基础。

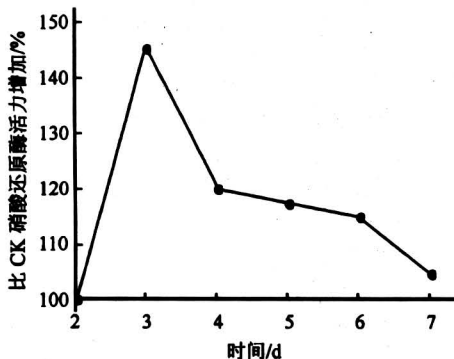


图 2 TA 乳粉对螺旋藻硝酸还原酶活力的影响
Fig.2 Effect of TA emulsion powder on the activity of spirulina nitric reductase

6.6 提高呼吸强度，增强生命活动

试验表明，经 TA 乳粉处理后，螺旋藻的呼吸强度比对照组提高了 11.32 %。呼吸作用为生命的基本过程，无论在维持生命活动方面，还是在物质合成及同化方面，都担负着重要任务。TA 乳粉处理增强呼吸强度的效应，表明它能提高螺旋藻的生命活动力，显然是有利于干物质的积累和加速细胞分裂，从而促进其生长和繁殖。

6.7 促进氨基酸、蛋白质合成，提高氮代谢水平

试验表明，经 TA 乳粉处理后，螺旋藻的氨基酸总量比对照组提高 12.15 %。氨基酸除用以合成蛋白质外，还可合成其他含氮有机物，如叶绿素、激素、维生素、生物碱等。TA 乳粉提高螺旋藻氨基酸的含量如图 3 所示。

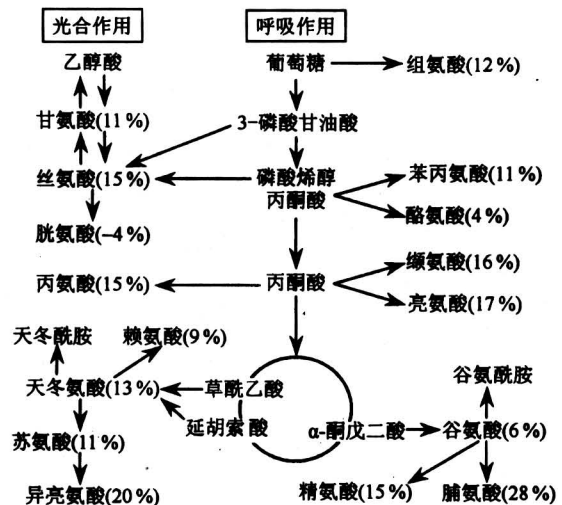


图 3 TA 乳粉提高螺旋藻氨基酸含量示意图
Fig.3 Schematic diagram of TA emulsion powder in the increase of amino acid content in spirulina

由无机态的氨 (NH₃) 转变为有机态的氮主要通过谷氨酸和谷氨酰胺的合成。从图 3 可看出，TA 乳粉可促进呼吸作用的中间产物丙酮酸、α-酮戊二酸及草酰乙酸等有机酸接受 NH₃ 转化为氨基酸。如在 TA 乳粉的促进下由丙酮酸形成的丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸等氨基酸含量分别比 CK 提高 15 %、16 % 及 17 %。由谷氨酸形成的精氨酸、脯氨酸等氨基酸含量分别比 CK 提高了 15 % 和 28 %，而谷氨酸是由 α-酮戊二酸加 NH₃ 形成的。总之，除了胱氨酸外，其他的氨基酸含量都提高了。

氨基酸是合成蛋白质的基本单位。所以，经 TA 乳粉处理后，螺旋藻的蛋白质含量，比对照组

提高 18.54 %。蛋白质是生命最重要的物质基础，是植物细胞中最丰富的有机物，它对细胞的一切结构和功能都是最基本的，因为遗传信息就是通过蛋白质来表达的。蛋白质在生物有机体中担负着极其重要的功能，它们构成细胞及细胞器的重要成分，如细胞膜、叶绿体等，进行物质交换、光合作用、蛋白质合成及原生质运动等功能；还有很大部分蛋白质是各种酶类，催化各种代谢反应的进行。所以，TA 乳粉为提高氮代谢水平促进螺旋藻的高产优质打下了生理基础。

7 结论

螺旋藻优质高产方法的特点：在螺旋藻工厂化生产中，掌握适当时机向养殖池添加 0.01~0.02 mg/L 的 TA 乳粉（最佳浓度为 0.01 mg/L），促进螺旋藻的细胞分裂、增殖及藻丝生长，提高净光合速率和干物质积累，增强硝酸还原酶活力和呼吸强度，并显著提高蛋白质、氨基酸、藻蓝蛋白、 β -胡萝卜素、叶绿素及类胡萝卜素等含量。处理组比对照组干藻粉产量增加 1.19~1.76 g/d·m²，增产率为 20%~30%，在低温逆境的条件下其增产幅度更大。用 TA 乳粉作为螺旋藻养殖的调节剂及其

养殖工艺在国内外都是一项新创举，并开拓了 TA 乳粉在微藻上应用研究的新领域，是促进螺旋藻优质高产的较好方法，应用前景十分广阔。

参考文献

- [1] Ciferri O, Spirulina, the edible microorganism [J]. Microbiological Reviews, 1983, 47(4): 551~578
- [2] Santillan C. Mass production of Spirulina [J]. Experientia, 1982, 40~43
- [3] Becher E W. Production and utilization of the blue-green alga spirulina in India [J]. Biomass, 1984, 4: 105~125
- [4] 袁晓雄, 杨淑培. 螺旋藻的养殖与加工 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1997
- [5] 青岛健康在线保健品有限公司. 螺旋藻 [EB/OL]. 螺旋藻在线, 青岛健康在线, www.qdik.com
- [6] 路透社摩纳哥. 缓解饥荒的食物——螺旋藻 [N]. 参考消息, 1993-05-08(7)
- [7] 李定梅. 我国微藻产业的发展 and 前景 (一) [J]. 粮食与饲料工业, 2001, (5): 26~27
- [8] 谢应先. 我国螺旋藻产业的发展现状及持续发展的建议 [J]. 农业科技要闻, 1998, (26): 1~4
- [9] 马贵武, 邱春吟. 我国螺旋藻开发现状与展望 [J]. 湛江海洋大学学报, 1997, 17(1): 78~80

Study of New Method for the High Yield and Superior Quality of *Spirulina*

Liu Desheng¹, Zhuang Huiru², Zheng Lingling², Lin Song¹, Hu Ningsan¹

(1. Fruit Tree Research Institute, Fujian Academy of Agriculture Science, Fuzhou 350013, China;
2. Bioengineering College, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

[Abstract] *Spirulina* is a kind of the most ancient pronucleus photosynthetic living things. Through many years of multiple points indoor and outdoor experiments and research, it has been proved the application technology of the TA emulsion powder for the promotion of superior quality and high yield of *spirulina*. In the factory mode of production of *spirulina*, 0.01~0.02 mg/L emulsion powder is added into the culture pool. It cannot only promote the cell fission of *spirulina*, the proliferation and growth of *spirulina* thread, the raise of pure rate of photosynthesis and accumulation of dry substance, but also strengthen the activity of nitric reductase and respiratory intensity of *spirulina*, and remarkably increase the content of protein, amino acid, pheophytin β -carotene, chlorophyll and carotenoid. At the same time, it significantly improve the quality and the biological yield of *Spirulina*. The amount of yield increase can be up to 1.19~1.76 g/d·m², the yield increase rate is 20%~30%. To apply TA emulsion powder as the cultivation regulator and the cultivation technology is a new creation and the prospect of the application is cheerful.

[Key words] TA emulsion powder; *spirulina*; plant growth regulator