

22 株螺旋藻(节旋藻)氨基酸成分分析及营养评价

Analysis of amino acid composition and nutritional evaluation of 22 *Spirulina* (*Athrospira*) strains

闫春宇^{1,2} 王素英^{1,2} 董世瑞^{1,2}

YAN Chun-yu^{1,2} WANG Su-ying^{1,2} DONG Shi-rui^{1,2}

(1. 天津市食品生物技术重点实验室,天津 300134;2. 天津商业大学生物技术与食品科学学院,天津 300134)

(1. The Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology, Tianjin 300134, China; 2. Institute of Biotechnology and Food Science of Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

摘要:利用氨基酸自动分析仪检测 22 株螺旋藻(节旋藻)氨基酸的种类和含量,对必需氨基酸含量进行变异性分析,并应用氨基酸评分(AAS)、氨基酸比值系数(RC)、氨基酸比值系数分(SRC)、模糊识别法等手段对各藻株氨基酸营养价值进行评价,在该基础上采用系统聚类法对不同藻株的营养价值进行分类,筛选出氨基酸营养价值最高的藻株。结果表明:检测到的 17 种氨基酸中,胱氨酸的变异系数最大为 28.7%,苏氨酸的变异系数最小为 12.68%;不同藻株虽然第一限制性氨基酸存在差异,但与 FAO/WHO 模式、全鸡蛋蛋白模式的贴切度均在 0.9 以上;系统聚类将 22 株螺旋藻(节旋藻)分为 4 类,其中氨基酸营养价值最高的 6 个藻株分别为:F-314、F-350、F-439、F-792、F-810 和 F-901;显著性分析表明系统聚类结果可靠。

关键词:螺旋藻;氨基酸;营养评价;系统聚类

Abstract: The compositions and contents of amino acids were detected and analyzed in 22 *Spirulina* (*Athrospira*) strains by Amino Acid Analyzer, at the same time, the variability of essential amino acid contents were studied. Amino acid nutritional values of different strains were evaluated by amino acid score, ratio coefficient, score of ratio coefficient and fuzzy distinguish method. For selecting the highest one of the nutritional values, hierarchical clustering method was adopted to classify them. The results showed that among the 17 kinds of amino acids, the maximum value of variation coefficient is Cystine which is 28.7%, and the minimum one is Threonine, which is 12.68%. While the first restrictive amino acids of strains were different, the closeness degree for FAO/WHO standard protein and whole egg standard both reached above 0.9. The results of hierarchi-

cal clustering analysis showed 22 strains of *Spirulina* (*Athrospira*) can be divided into 4 classes. The strains of the highest nutritional value are F-314, F-350, F-439, F-790, F-810, and F-901, which is reliable by using analysis of variance model.

Keywords: *Spirulina* (*Athrospira*); amino acid; nutritional evaluation; hierarchical clustering

螺旋藻 [*Spirulina* (*Arthrospira*) Stizenberger] 主要分布于热带、亚热带地区的淡水或盐碱性湖泊,是一种多细胞蓝藻(*Cyanobacteria*)^[1-2]。作为光能自养型生物,它的光合效率高达 43%^[3],是一般农作物的 1.4~3.0 倍,生产效率极高,而且研究^[4]表明螺旋藻中蛋白含量超过细胞干重的 60%,甚至可达 70%,是迄今为止发现的蛋白质含量最高的物种之一。除此之外,螺旋藻还含有丰富的多糖、维生素、不饱和脂肪酸以及有益于人体健康的微量元素^[5-6],具有易消化吸收,营养全面,结构合理,安全无毒等优点,被誉为人类最理想的保健食品^[7-8]。因此作为食物与营养的补充物,螺旋藻的开发与利用有着广阔的应用前景。

目前全世界虽有 60 多个国家生产螺旋藻食品,但规模化养殖的藻种仅有钝顶螺旋藻(节旋藻)和极大螺旋藻(节旋藻)两种^[8]。生产藻种单一,在生产过程中退化现象严重是阻碍螺旋藻产业健康发展的瓶颈^[9-10]。因此选育性能优良、遗传稳定的藻株势在必行。

本研究拟收集 22 株螺旋藻(节旋藻),检测其氨基酸组成和含量,采用氨基酸评分(AAS)及氨基酸比值系数(RC)、氨基酸比值系数分(SRC)、模糊识别法等指标对不同来源的藻株进行综合分析评价,旨在螺旋藻产业化应用中藻株的筛选提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

螺旋藻(节旋藻):22 株,本实验室收集(见表 1);
混合氨基酸标准液:H 型,日本和光纯药工业株式会社。

基金项目:国家自然科学基金(编号:31270050);天津市创新团队项目(编号:TD12-5049)

作者简介:闫春宇(1992—),女,天津商业大学在读硕士研究生。

E-mail:ychunyu726@163.com

通讯作者:王素英

收稿日期:2015-07-13

表 1 22 株螺旋藻(节旋藻)的基本信息[†]
Table 1 The basic information of the 22 *Spirulina*
(*Arthrospira*) strains

编号	藻株名称	来源	编号	藻株名称	来源
1	F-314	—	12	F-901	江苏镇江
2	F-350	—	13	F-902	厦门
3	F-351	南京大学	14	F-904	广东
4	F-439	—	15	TJBC4-1	天津
5	F-790	江西	16	TJE7	天津
6	F-791	江西	17	TJE1	天津
7	F-792	江西	18	SDH1	山东东营
8	F-793	江西	19	TJG1	天津
9	F-794	江西	20	TJF1	天津
10	F-810	—	21	TJBC7-1	天津
11	F-900	江苏镇江	22	TJJ1	天津

† 以 F 开头的藻株购自中国科学院水生生物所藻种库,其余为本实验分离保藏藻种;“—”表示与美国德州大学交换获得,地理来源不详。

1.2 仪器与设备

氨基酸自动分析仪:L-8900 型,日本 HITACHI 公司;
旋转蒸发仪:RE-52AA 型,上海亚荣生化仪器厂;
凯氏定氮仪:UDK159 型,意大利 VELP 公司。

1.3 粗蛋白测定

按 GB/T 5009.5—2010《食品中蛋白质的测定方法》执行。

1.4 氨基酸检测

按 GB/T 5009.124—2003《食品中氨基酸的测定》执行。

1.5 营养价值评价

食物蛋白质中必需氨基酸的组成决定了其营养价值,组成比例越接近人体所需氨基酸比例,则说明质量越好,更易于人体吸收,营养价值越高。依据氨基酸平衡理论,分别与 WHO/FAO 必需氨基酸模式^[11]和全鸡蛋白质模式^[12]进行比较,WHO/FAO 必需氨基酸模式与全鸡蛋白质模式各种必需氨基酸含量见表 2,按式(1)~(3)计算不同藻株中的必需氨基酸比值(AAS)、氨基酸比值系数(RC)、比值系数分(SRC)。SRC 作为评判物质营养价值的指标,表示物质中蛋白质的相对营养价值,SRC 越接近 100,表明物质营养价值越高^[13-14]。

$$AAS_i = \frac{a_i}{b_i} \text{ [15]}$$

式中的:

AAS_{*i*}——待测物质中第 *i* 种必需氨基酸评分值,1≤*i*≤7;

a_i——待测物质蛋白质中第 *i* 种必需氨基酸含量,mg/g·PRO;

b_i——模式蛋白质中与 *a_i* 中相应必需氨基酸的含量,mg/g·PRO,模式蛋白采用 FAO/WHO 模式及全鸡蛋白质模式。

$$RC_i = \frac{AAS_i}{\overline{AAS}}$$

(2)

表 2 FAO/WHO 模式及全鸡蛋白质模式中必需氨基酸含量
Table 2 The content of essential amino acids proposed by
FAO/WHO and whole egg protein mg/g·PRO

标准模式	Ile	Leu	Lys	Met+Cys	Phe+Tyr	Thr	Val
FAO/WHO 模式	40	70	55	35	60	40	50
全鸡蛋白质模式	54	86	70	57	93	47	66

式中:

RC_{*i*}——待测物质中第 *i* 种必需氨基酸的比值系数,1≤*i*≤7;AAS_{*i*}——待测物质中第 *i* 种必需氨基酸评分值; $\overline{AAS}$ ——待测物质中必需氨基酸评分值的均值。
$$SRC = 100 - RSD \times 100$$

(3)

式中:

SRC——待测物质的氨基酸比值系数分;

RSD——待测物质 RC 的相对标准差。

1.6 模糊识别法

依据兰氏距离法定义^[13]对象 *u* 与标准蛋白模式 *a* 的贴
近度 *U(a,u)*,待评价物质的氨基酸品质与模式蛋白 *a* 的接
近程度可用贴近度来表示,其值越接近 1,反映物质的蛋白质
营养价值越高。贴近度按式(4)计算^[16]:

$$U = (a, u_i) = 1 - 0.09 \times \sum_{k=1}^7 \frac{|a_k - u_{ik}|}{a_k + u_{ik}}$$

(4)

式中:

a_k——标准蛋白模式的第 *k* 种 EAA 含量,1≤*k*≤7;*u_{ik}*——第 *i* 个评价对象的第 *k* 种 EAA 含量,1≤*k*≤7。

1.7 统计学方法

采用 SPSS 16.0 数学软件进行统计分析,系统聚类采用
欧式聚类计算组内联接距离。

2 结果与分析

2.1 22 株螺旋藻(节旋藻)粗蛋白含量

由表 3 可知,藻株粗蛋白含量为 60.25%~68.13%,这
与文献[4]所报道一致。22 个藻株的蛋白质含量均超过细
胞干重的 60%,各藻株之间差异不明显,其中,藻株 F-901 的
蛋白质含量最高,可达到 68.13%。

表 3 22 株螺旋藻(节旋藻)粗蛋白含量
Table 3 The crude protein content of the 22 *Spirulina*
(*Arthrospira*) strains %

编号	藻株名称	粗蛋白含量	编号	藻株名称	粗蛋白含量
1	F-314	66.13	12	F-901	68.13
2	F-350	64.95	13	F-902	64.97
3	F-351	60.88	14	F-904	62.87
4	F-439	63.92	15	TJBC4-1	64.89
5	F-790	61.22	16	TJE7	65.73
6	F-791	63.55	17	TJE1	64.12
7	F-792	65.17	18	SDH1	66.54
8	F-793	60.25	19	TJG1	63.45
9	F-794	62.18	20	TJF1	66.23
10	F-810	67.71	21	TJBC7-1	63.20
11	F-900	62.17	22	TJJ1	63.25

2.2 标准样品的氨基酸图谱

17 种氨基酸分别在 440,570 nm 波长下检测得到。各个氨基酸出峰顺序见图 1。

2.3 氨基酸组成和含量分析

2.3.1 不同藻株氨基酸含量 螺旋藻的氨基酸测定结果见表 4。由表 4 可知,除色氨酸被水解外,其余 17 种氨基酸均

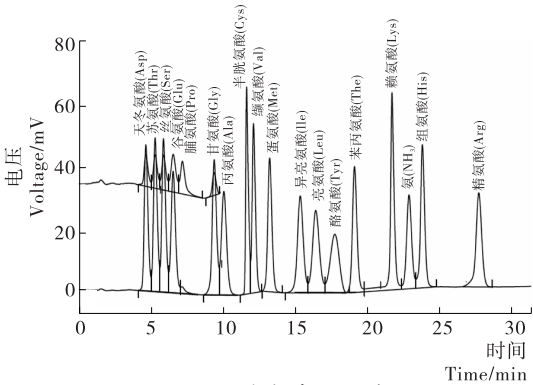


图 1 标准氨基酸图谱

Figure 1 Spectrum of standard sample of amino acids

表 4 22 株螺旋藻(节旋藻)氨基酸组成及含量[†]

Table 4 Content of amino acid of 22 *Spirulina*(*Arthrospira*) strains

藻株	Asp	Thr *	Ser	Glu	Gly	Ala	Cys *	Val *	Met *	Ile *	Leu *	Tyr *	Phe *	Lys *	His	Arg	Pro	T	E	E/T
1	45.97	25.68	25.67	72.86	22.96	37.99	2.83	24.52	15.83	23.66	41.53	22.32	18.20	17.51	7.19	31.44	19.25	455.41	192.08	42.18
2	39.58	22.43	22.64	60.03	19.62	33.46	1.99	21.05	15.55	20.94	35.80	19.33	15.19	13.98	5.99	28.34	17.30	393.22	166.26	42.28
3	44.43	22.01	21.30	62.44	19.59	32.95	3.25	18.69	10.87	12.21	30.22	15.02	18.00	16.59	8.96	32.35	17.51	386.39	146.86	38.01
4	39.69	21.25	20.51	60.51	18.71	31.15	2.40	20.74	14.99	20.28	34.56	17.40	14.27	13.47	5.67	29.12	16.68	381.40	159.36	41.78
5	33.63	19.29	19.35	52.02	16.65	28.62	1.72	17.81	8.63	12.94	28.90	15.41	13.14	12.75	5.19	22.59	16.55	325.19	130.59	40.16
6	38.09	22.21	22.44	57.73	18.84	33.05	1.90	19.32	10.25	14.44	32.34	17.48	14.39	14.12	6.16	26.95	16.02	365.71	146.44	40.04
7	41.34	24.00	24.47	69.75	20.48	36.76	2.81	21.99	15.36	21.90	37.40	20.03	15.52	15.23	6.23	29.60	17.20	420.07	174.25	41.48
8	32.84	18.81	18.10	49.15	16.12	27.87	1.70	15.48	8.68	11.89	26.66	14.25	12.94	11.76	5.45	22.67	15.58	309.94	122.17	39.42
9	21.22	18.11	17.64	48.12	15.89	27.13	1.86	14.92	8.90	12.84	28.30	15.49	19.99	25.32	7.92	21.17	12.63	327.45	145.73	44.50
10	46.13	27.15	25.84	66.91	23.74	38.70	2.19	21.09	16.84	25.13	43.22	24.73	25.90	28.91	7.83	32.67	21.68	478.66	215.18	44.95
11	38.01	22.30	22.02	63.73	19.26	33.44	3.47	17.70	10.51	15.19	34.05	17.39	23.04	20.65	8.97	24.90	17.78	392.41	164.30	41.87
12	44.08	26.56	25.88	71.10	22.37	39.89	2.93	22.72	18.33	24.78	43.56	22.73	25.59	23.38	10.08	31.97	23.01	478.98	210.61	43.97
13	50.91	28.09	29.83	77.05	25.43	44.48	1.89	25.19	15.30	23.76	45.27	25.09	23.70	22.98	8.20	36.23	22.57	505.95	211.26	41.76
14	38.04	20.46	21.23	62.07	18.20	32.04	1.52	19.52	9.97	15.60	33.10	17.00	16.91	16.50	5.05	26.62	18.26	372.09	150.58	40.47
15	43.63	25.18	26.49	68.93	23.37	40.69	1.56	24.60	12.19	23.15	41.68	23.89	21.66	20.77	8.32	32.26	21.29	459.64	194.67	42.35
16	53.50	26.87	27.20	80.76	24.12	43.11	2.59	25.79	12.01	21.02	41.86	22.02	22.16	21.32	7.87	41.06	22.75	496.02	195.64	39.44
17	38.58	21.84	23.83	60.58	21.74	35.24	1.57	21.52	9.76	17.61	35.31	18.12	20.14	16.24	9.59	29.40	21.11	402.18	162.12	40.31
18	48.03	26.68	27.62	74.16	23.51	43.22	1.50	26.64	12.01	23.04	43.37	23.19	22.81	21.03	7.22	36.02	23.01	483.05	200.27	41.46
19	43.87	25.08	24.34	67.25	22.11	39.08	2.38	23.82	11.57	19.34	38.80	19.80	21.26	19.46	7.35	30.54	22.76	438.78	181.49	41.36
20	49.96	27.96	28.10	76.78	25.89	44.42	1.53	28.92	12.57	24.12	45.11	23.05	23.94	22.48	8.72	36.53	24.19	504.26	209.67	41.58
21	42.28	23.19	23.58	61.18	20.76	36.13	1.46	22.47	9.46	18.44	36.80	18.95	21.12	17.35	6.98	31.21	20.99	412.35	169.24	41.04
22	38.85	23.95	23.90	61.05	21.14	35.97	1.81	21.63	7.92	19.38	33.37	19.62	14.37	19.95	6.56	28.61	22.09	400.18	162.00	40.48

[†] E 代表必需氨基酸;T 代表总氨基酸; * 为必需氨基酸;E/T 单位为 %。

表 5 22 株螺旋藻(节旋藻)必需氨基酸变异性分析

Table 5 Analysis of variability on esstial amino acid of the 22 *Spirulina*(*Artnrospira*)

项目	Thr	Cys	Val	Met	Ile	Leu	Tyr	Phe	Lys
最大值	28.09	3.47	28.92	18.33	25.13	45.27	25.09	25.90	28.91
最小值	18.11	1.46	14.92	7.92	11.89	26.66	14.25	12.94	11.76
变幅	9.99	2.00	14.00	10.41	13.24	18.61	10.84	12.96	17.16
均值	23.60	2.13	21.64	12.16	19.17	36.87	19.65	19.28	18.72
标准差	2.99	0.61	3.55	3.03	4.44	5.73	3.31	4.17	4.42
变异系数(CV)/%	12.68	28.70	16.41	24.91	23.14	15.53	16.86	21.60	23.61

表 6 必需氨基酸 AAS、RC 及 SRC_{adult} 值比较 (FAO/WHO 必需氨基酸参考模式)[†]
Table 6 Comparison of AAS, RC and SRC_{adult} of the 22 *Spirulina (Arthrospira)* strains

编号	AAS、RC	Thr	Val	Met+Cys	Ile	Leu	Phe+Tyr	Lys	SRC _{adult}
1	AAS	1.41	1.08	1.17	1.30	1.30	1.48	0.70	78.29
	RC	1.17	0.89	0.97	1.08	1.08	1.23	0.58 *	
2	AAS	1.43	1.07	1.27	1.33	1.30	1.46	0.65	76.86
	RC	1.17	0.88	1.05	1.09	1.07	1.20	0.53 *	
3	AAS	1.42	0.97	1.04	0.79	1.12	1.42	0.78	75.28
	RC	1.32	0.90	0.97	0.73	1.04	1.32	0.72 *	
4	AAS	1.39	1.09	1.30	1.33	1.29	1.38	0.64	77.76
	RC	1.16	0.90	1.08	1.10	1.07	1.15	0.53 *	
5	AAS	1.48	1.10	0.91	0.99	1.27	1.46	0.71	74.59
	RC	1.31	0.97	0.80	0.88	1.12	1.29	0.63 *	
6	AAS	1.52	1.06	0.95	0.99	1.26	1.45	0.70	74.16
	RC	1.34	0.93	0.84	0.87	1.12	1.28	0.62 *	
7	AAS	1.43	1.05	1.24	1.30	1.27	1.41	0.66	77.59
	RC	1.20	0.88	1.04	1.09	1.07	1.18	0.55 *	
8	AAS	1.52	1.00	0.96	0.96	1.23	1.46	0.69	73.15
	RC	1.36	0.90	0.86	0.86	1.10	1.31	0.62 *	
9	AAS	1.38	0.91	0.94	0.98	1.23	1.81	1.41	73.71
	RC	1.12	0.74 *	0.76	0.79	1.00	1.46	1.14	
10	AAS	1.42	0.88	1.14	1.31	1.29	1.76	1.10	78.08
	RC	1.12	0.69 *	0.89	1.03	1.01	1.39	0.86	
11	AAS	1.42	0.90	1.02	0.97	1.24	1.72	0.96	74.26
	RC	1.21	0.77 *	0.87	0.82	1.06	1.46	0.81	
12	AAS	1.39	0.95	1.27	1.29	1.30	1.68	0.89	78.58
	RC	1.11	0.76	1.01	1.03	1.04	1.34	0.71 *	
13	AAS	1.39	1.00	0.97	1.17	1.28	1.61	0.83	77.02
	RC	1.18	0.85	0.82	1.00	1.09	1.37	0.70 *	
14	AAS	1.37	1.05	0.88	1.05	1.27	1.52	0.81	76.98
	RC	1.21	0.92	0.78	0.92	1.12	1.34	0.71 *	
15	AAS	1.37	1.07	0.85	1.26	1.30	1.65	0.82	75.15
	RC	1.15	0.90	0.72	1.06	1.09	1.39	0.69 *	
16	AAS	1.35	1.04	0.84	1.06	1.21	1.48	0.78	76.82
	RC	1.22	0.94	0.76	0.96	1.09	1.34	0.70 *	
17	AAS	1.36	1.07	0.81	1.09	1.25	1.59	0.73	73.39
	RC	1.20	0.95	0.71	0.97	1.11	1.40	0.65 *	
18	AAS	1.38	1.10	0.80	1.19	1.28	1.59	0.79	74.76
	RC	1.19	0.95	0.69	1.03	1.10	1.37	0.68 *	
19	AAS	1.43	1.09	0.91	1.10	1.26	1.56	0.81	76.76
	RC	1.23	0.93	0.78	0.95	1.08	1.34	0.69 *	
20	AAS	1.39	1.15	0.80	1.20	1.28	1.55	0.81	75.94
	RC	1.19	0.98	0.68 *	1.02	1.10	1.33	0.69	
21	AAS	1.41	1.09	0.76	1.12	1.27	1.62	0.77	72.24
	RC	1.23	0.95	0.66 *	0.97	1.11	1.41	0.67	
22	AAS	1.50	1.08	0.69	1.21	1.19	1.42	0.91	75.59
	RC	1.31	0.95	0.61 *	1.06	1.04	1.24	0.79	

† * 代表第一限制氨基酸。

表 7 必需氨基酸 AAS、RC 及 SRC_{egg} 值比较(全鸡蛋蛋白必需氨基酸参考模式)[†]
Table 7 Comparison of AAS, RC and SRC_{egg} of the 22 *Spirulina (Arthrospira)* strains

编号	AAS、RC	Thr	Val	Met+Cys	Ile	Leu	Phe+Tyr	Lys	SRC _{egg}
1	AAS	1.20	0.82	0.72	0.96	1.06	0.96	0.55	75.62
	RC	1.34	0.91	0.80	1.08	1.19	1.07	0.61 *	
2	AAS	1.21	0.81	0.78	0.99	1.06	0.94	0.51	74.64
	RC	1.36	0.90	0.87	1.10	1.18	1.05	0.56 *	
3	AAS	1.21	0.73	0.64	0.59	0.91	0.92	0.61	75.73
	RC	1.35	0.91	0.80	0.73 *	1.13	1.15	0.76	
4	AAS	1.19	0.82	0.80	0.98	1.05	0.89	0.50	75.68
	RC	1.33	0.92	0.90	1.10	1.18	1.00	0.57 *	
5	AAS	1.26	0.83	0.56	0.74	1.03	0.94	0.56	71.47
	RC	1.41	0.98	0.65 *	0.87	1.22	1.12	0.66	
6	AAS	1.29	0.80	0.58	0.73	1.03	0.94	0.55	70.97
	RC	1.44	0.95	0.69	0.86	1.22	1.11	0.65 *	
7	AAS	1.22	0.79	0.76	0.97	1.04	0.91	0.52	75.12
	RC	1.36	0.90	0.86	1.09	1.17	1.03	0.59 *	
8	AAS	1.29	0.76	0.59	0.71	1.00	0.94	0.54	70.92
	RC	1.44	0.91	0.70	0.85	1.20	1.13	0.65 *	
9	AAS	1.18	0.69	0.58	0.73	1.00	1.17	1.10	72.31
	RC	1.31	0.75	0.63 *	0.79	1.09	1.27	1.20	
10	AAS	1.21	0.67	0.70	0.97	1.05	1.14	0.86	76.51
	RC	1.35	0.71 *	0.74	1.03	1.11	1.21	0.92	
11	AAS	1.21	0.68	0.62	0.72	1.01	1.11	0.75	74.08
	RC	1.35	0.78	0.72 *	0.82	1.16	1.27	0.86	
12	AAS	1.18	0.72	0.78	0.96	1.06	1.08	0.70	78.21
	RC	1.32	0.78	0.84	1.04	1.14	1.17	0.75 *	
13	AAS	1.18	0.75	0.60	0.87	1.04	1.04	0.65	75.39
	RC	1.32	0.86	0.68 *	0.99	1.19	1.18	0.74	
14	AAS	1.17	0.79	0.54	0.78	1.03	0.98	0.63	74.84
	RC	1.31	0.94	0.64 *	0.92	1.22	1.16	0.75	
15	AAS	1.17	0.81	0.52	0.93	1.05	1.07	0.65	73.53
	RC	1.30	0.92	0.59 *	1.05	1.19	1.20	0.73	
16	AAS	1.15	0.79	0.52	0.78	0.98	0.96	0.61	75.35
	RC	1.29	0.95	0.62 *	0.95	1.19	1.16	0.74	
17	AAS	1.16	0.81	0.49	0.81	1.02	1.02	0.58	72.38
	RC	1.29	0.96	0.59 *	0.96	1.21	1.22	0.69	
18	AAS	1.18	0.84	0.49	0.88	1.04	1.02	0.62	72.68
	RC	1.31	0.96	0.57 *	1.02	1.20	1.18	0.72	
19	AAS	1.22	0.82	0.56	0.82	1.03	1.01	0.63	74.18
	RC	1.36	0.95	0.64 *	0.94	1.18	1.16	0.73	
20	AAS	1.18	0.87	0.49	0.89	1.04	1.00	0.64	73.26
	RC	1.32	1.00	0.56 *	1.02	1.19	1.15	0.73	
21	AAS	1.20	0.83	0.46	0.83	1.04	1.04	0.60	70.69
	RC	1.34	0.96	0.54 *	0.97	1.21	1.22	0.70	
22	AAS	1.27	0.82	0.43	0.90	0.97	0.91	0.71	71.31
	RC	1.42	0.95	0.50 *	1.04	1.13	1.06	0.83	

† * 代表第一限制氨基酸。

由表 6 可知,依据 WHO/FAO 模式得出各藻株的 RC 值和 SRC 值,对同一藻株 EAA 的 RC 值作比较,得出 22 个藻株的第一限制氨基酸,其中 F-794、F-810、F-900 3 个藻株第一限制氨基酸为缬氨酸,TJF1、TJBC7-1、TJJ1 3 株藻第一限制氨基酸为蛋氨酸+胱氨酸,其余 16 株第一限制氨基酸均为赖氨酸。

由表 7 可知,依据全鸡蛋白模式,比较同一藻株 EAA 的 RC 值,发现 F-351 第一限制氨基酸为异亮氨酸,藻株 F-810第一限制氨基酸为缬氨酸,F-314、F-350、F-439、F-791、F-792、F-793、F-902 藻株的第一限制氨基酸为赖氨酸,其余藻株的第一限制氨基酸为蛋氨酸+胱氨酸。

通过比较可以看出,根据计算两种不同模式所得出的各藻株的第一限制氨基酸有所不同。但是,比较各藻株的 SRC_{adult}、SRC_{egg} 值,两种模式所得的分值一致,SRC_{adult} 值和 SRC_{egg} 最高的为 F-901 藻株,两者分值最低的为 TJJ1 藻株,并且比值系数分均在 70 以上。因此,尽管不同藻株均存在限制氨基酸,但从总体来看,所有藻株的必需氨基酸的评分较优,符合人体营养需求。

2.5 与模式氨基酸的贴进度比较

根据模糊识别法得出 22 个藻株的 EAA 与 FAO/WHO 模式及全鸡蛋白模式的贴进度,见表 8。

表 8 22 株螺旋藻(节旋藻)与模式氨基酸的贴进度
Table 8 The closeness of 22 *Spirulina*(*Artnrospira*) for standard amino acid

编号	FAO/WHO 贴进度	全鸡蛋白 白贴进度	编号	FAO/WHO 贴进度	全鸡蛋白 白贴进度
1	0.92	0.94	12	0.92	0.94
2	0.91	0.94	13	0.94	0.93
3	0.94	0.90	14	0.94	0.92
4	0.91	0.94	15	0.92	0.93
5	0.93	0.91	16	0.94	0.92
6	0.93	0.91	17	0.93	0.92
7	0.92	0.93	18	0.92	0.92
8	0.93	0.91	19	0.93	0.93
9	0.93	0.93	20	0.92	0.93
10	0.92	0.94	21	0.92	0.92
11	0.94	0.92	22	0.93	0.92

由表 8 可知,所有藻株必需氨基酸的 FAO/WHO 模式贴进度在 0.91~0.94、全鸡蛋白模式贴进度在 0.90~0.94,达到 0.9 以上,均高于大豆蛋白(FAO/WHO 模式贴进度 0.896)^[17],且彼此之间没有显著性差异,说明螺旋藻(节旋藻)可以作为优质蛋白来源。

2.6 螺旋藻藻株聚类分析

2.6.1 22 株螺旋藻(节旋藻)系统聚类分析 以 FAO/WHO 模式贴进度、全鸡蛋白模式贴进度、SRC_{adult} 及 SRC_{egg} 值 4 个指标对 22 株藻进行系统聚类,将 22 株藻株分为 4 类,聚类结果见图 2。

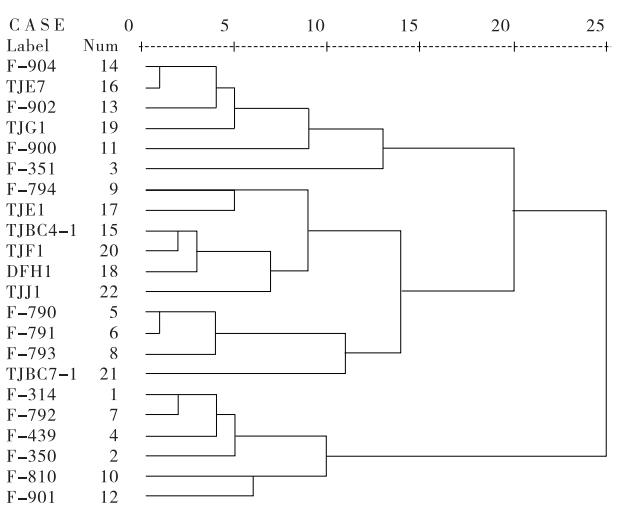


图 2 22 株螺旋藻(节旋藻)系统聚类分析
Figure 2 Cluster analysis of the 22 *Spirulina* (*Arthrospira*) strains

依据图 2 的聚类结果,将 22 株螺旋藻(节旋藻)分为 4 类,第 I 类藻株分别为 F-314、F-350、F-439、F-792、F-810 和 F-901;第 II 类:F-351、F-900、F-902、F-904、TJE7 以及 TJG1;第 III 类:F-790、F-791、F-793 和 TJBC7-1;第 IV 类包含的藻株为 F-794、TJBC4-1、TJE1、SDH1、TJF1、TJJ1。

筛选出的 6 个藻株,必需氨基酸与总氨基酸比值依此为 F-810(44.95%)>F-901(43.97%)>F-350(42.28%)>F-314(42.18%)>F-439(41.78%)>F-792(41.48%),与孙鹏^[18]的研究结果(FACHB351(41.54%)、S6-2(41.59%)、S8(38.57%))进行比较,除藻株 F-792 略低于 FACHB351、S6-2 外,本研究中的其他 5 个藻株的 E/T 值均比这 3 个藻株高。依据 FAO/WHO 提出的理想蛋白质条件:构成蛋白质的必需氨基酸含量占总氨基酸含量的 40%左右^[14],6 株藻均符合标准。

2.6.2 聚类结果的显著性分析 利用 SPSS 16.0 软件对 4 个组别的 FAO/WHO 模式贴进度、全鸡蛋白模式贴进度、SRC_{adult} 及 SRC_{egg} 4 个指标进行单因素方差分析,通过检验不同组之间的差异及显著性,评价分类结果的合理性。首先检验 4 个指标的方差齐次性,显著性水平设为 $\alpha=0.05$,方差检验结果分别为 0.187,0.504,0.303,0.216,均高于设定的显著性水平,结果不显著,证明这 4 个指标的方差齐性,可以进一步进行单因素方差分析。

FAO/WHO 模式贴进度、全鸡蛋白模式贴进度、SRC_{adult} 及 SRC_{egg} 4 个指标的单因素方差分析结果如表 9 所示,各指标的 P 值均小于显著水平 $\alpha=0.001$,说明依据这 4 个指标进行的分类结果可靠,各组之间存在显著性差异。

3 结论

本试验分析了 22 株螺旋藻(节旋藻)的氨基酸组成和含量,利用模糊识别方法与氨基酸比值系数法评价藻株的氨基酸营养价值,筛选出营养价值最高的藻株 F-314、F-350、F-439、F-792、F-810 和 F-901。与肖涵等^[19]的检测结果相比,

表 9 22 株螺旋藻(节旋藻)单因素方差分析 [†]						
Table 9 One way analysis of variance of the 22 <i>Spirulina</i> (<i>Arthrospira</i>) strains						
指标	误差来源	离差平方和	自由度	均方	F	P 值
FAO/WHO 贴进度	组间离差	0.001	3	0.000	24.786	0.000
	组内离差	0.000	18	0.000		
	总离差	0.002	21			
全鸡蛋蛋 白贴近度	组间离差	0.002	3	0.001	18.661	0.000
	组内离差	0.001	18	0.000		
	总离差	0.002	21			
SRC _{adult}	组间离差	53.514	3	17.838	18.916	0.000
	组内离差	16.974	18	0.943		
	总离差	70.488	21			
SRC _{egg}	组间离差	75.715	3	25.238	32.991	0.000
	组内离差	13.770	18	0.765		
	总离差	89.485	21			

† 显著水平 α=0.001。

6 株藻的氨基酸比值系数均高于滇产的螺旋藻片,因此,从氨基酸营养价值角度,可以考虑将此 6 株藻作为优质种源,扩大培养进行大规模养殖。目前,鄂尔多斯高原是中国最主要的螺旋藻生产和供应基地^[20],本试验所收集的 22 株藻株中没有来自于该地的藻株,因此后续可采集此地方的养殖藻株进行对比分析,丰富试验结果。试验采用酸水解蛋白获取氨基酸,在此过程中由于色氨酸被破坏,使得试验结果中缺少对色氨酸含量变化的分析,在今后研究中可根据碱水解方法测定色氨酸含量完善分析结果。

参考文献

1 福迪 B. 藻类学[M]. 罗迪安,译. 上海:上海科学技术出版社, 1980: 24.

2 Riccardi G, Sanangelantoni A M, Carbonera D, et al. Characterization of mutants of *Spirulina* platensis resistant to amino acid analogues [J]. Fems Microbiology Letters, 1981, 12 (4): 333~336.

3 李全顺,徐成海. 螺旋藻作为生物能源的研究进展[J]. 节能, 2005(8): 15~18.

4 Ciferri O. *Spirulina*, the edible microorganism. [J]. Microbiological Reviews, 1983, 47(4): 551~578.

5 周希明. 螺旋藻的开发利用和培养[J]. 中国水产, 1988(9): 31~31.

6 田其英. 螺旋藻的生理功能及其在食品中的应用[J]. 农业科技与装备, 2011(5): 13~16.

7 王文博,高俊莲,孙建光,等. 螺旋藻的营养保健价值及其在预防医学中的应用[J]. 中国食物与营养, 2009(1): 48~51.

8 周淑荣,李沐森. 螺旋藻的营养保健功能及其开发利用[J]. 特产研究, 2001, 23(2): 63~65.

9 Mussagy A, Annadotter H G. An experimental study of toxin production in *Arthrospira fusiformis* (*Cyanophyceae*) isolated from African waters[J]. Toxicon Official Journal of the International Society on Toxinology, 2006, 48(8): 1 027~1 034.

10 Mühling M, Harris N, Belay A, et al. Reversal of helix orientation in the cyanobacterium *Arthrospira*[J]. Journal of Phycology, 2003, 39: 360~367.

11 Eggum B. Comments on report of a joint FAO/WHO expert consultation on protein quality evaluation, Rome 1990 [J]. Zeitschrift Für Ernährungswissenschaft, 1991, 30(2): 81~88.

12 Martínez-Villaluenga C, Gulewicz P, Frias J, et al. Assessment of protein fractions of three cultivars of *Pisum sativum* L.: effect of germination[J]. European Food Research & Technology, 2008, 226(6): 1 465~1 478.

13 朱圣陶,吴坤. 蛋白质营养价值评价—氨基酸比值系数法[J]. 营养学报, 1988, 10(2): 187~190.

14 严冬,杨鑫岬. 西藏不同产地冬虫夏草中氨基酸成分分析及其营养价值评价[J]. 中国农学通报, 2014(3): 281~284.

15 陈巧玲,李忠海,陈素琼. 5 种地产食用菌氨基酸组成比较及营养评价[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 43~81.

16 赵凤敏,李树君,张小燕,等. 不同品种马铃薯的氨基酸营养价值评价[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(9): 13~18.

17 赵法伋,郭俊生,陈洪章,等. 大豆平衡氨基酸营养价值研究[J]. 营养学报, 1986, 8(2): 153~159.

18 孙鹏. 螺旋藻和节旋藻营养成分的比较研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004: 1~58.

19 肖涵,申亮,缪德仁,等. 滇产螺旋藻片营养组成评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2014, 5(5): 664~667.

20 巩东辉. 鄂尔多斯高原碱湖钝顶螺旋藻对低温、强光的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013: 1~105.