

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.14493

龙须菜新品系 GL 家系 F₁ 配子体的性状分析

李彬彬, 胡依依, 隋正红, 郭伟华

中国海洋大学 海洋生物遗传学与育种教育部重点实验室, 山东 青岛 266003

摘要: 本研究旨在为深入构建龙须菜(*Gracilaria/Gracilariopsis lemaneiformis*)育种体系提供基础数据。采用 DTOPSIS 综合评价法对实验室构建的龙须菜 GL 家系的 F₁ 配子体的性状进行分析与评价, 以期把 F₁ 配子体的综合性状这一模糊量化指标转化为该株系对理想解的相对接近度 C_i 值的量化指标, 进而对各藻株的综合性状优劣进行综合分析, 为未来良种的杂交以及选育提供依据。所测的 100 株藻体中, 线性生长速率变化范围为 2.0~7.3%/d, 变异系数为 26.79%, 标准差达到 1.28, 各藻株之间存在明显的差异。藻株的分枝数分布很不集中, 变异极为显著, 其平均数为 1.93 个, 标准差为 0.8, 变异系数为 41.17%, 差异明显, 变异幅度相对很大。主枝基部直径变化范围 1.4~2.2 mm, 标准差达到 0.18, 变异系数在 3 个性状中最小, 为 9.87%。线性生长速率、分枝数、基部直径等性状分布均呈现明显的正态分布特征, 标准差分析显示, 各性状相对本身参数变化幅度较大, 说明 F₁ 配子体存在一定的性状变异, 可以挑选性状差异大的藻种进行杂交以期获得优良藻种。DTOPSIS 综合评价分析显示 20、47、93、6、31 株系综合性状的评价价值比较高, 为后期人工选育优良藻种提供依据。

关键词: 龙须菜; F₁ 配子体; 性状分析; DTOPSIS

中图分类号: S968

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2015)05-0933-08

龙须菜(*Gracilaria/Gracilariopsis lemaneiformis*)是我国继海带与紫菜后的第三大栽培海藻^[1], 龙须菜栽培业促进了琼胶制造业的发展, 还产生了良好的生态效益, 对促进我国海水养殖事业的可持续发展具有重要的意义^[2]。

通过选择育种和诱变育种培育获得了品质优良、生长速度快、抗逆性强、琼胶含量高且质量好、耐高温的龙须菜新品系/品种^[1]。但是龙须菜良种选育还没有形成完整的体系, 对龙须菜的杂交育种及生产性状尤其是数量性状遗传规律的研究几乎为空白, 更没有对品系的综合评价方法。

生产性状的综合评价及其应用已在农作物与海洋动物遗传育种中发挥了重要作用^[3]。近年来,

灰色关联度分析以及 DTOPSIS 等综合评价方法已在小麦、大豆等作物上得到广泛应用^[4-7], 是引入农业的一种新型有效的评价方法, 但在藻类品种的评价并不多见。在分析品种综合性状时, 与灰色关联度法相比, 应用 DTOPSIS 法除了可弥补单用产量做统计分析的不足之外^[8], 更具有结果准确的优点, 特别在参试品种较多时, DTOPSIS 法比灰色关联度法更加适用^[9]。与此同时, DTOPSIS 法与灰色关联度相比, 无须构建参考品种, 简单易懂, 计算方便, 被更多的育种工作者选择应用^[1-11]。

本研究拟采用 DTOPSIS 综合评价法对实验室构建的龙须菜 GL 家系 F₁ 配子体的性状进行分析与评价, 以期把 F₁ 配子体综合性状这一模糊

收稿日期: 2014-11-27; 修订日期: 2015-05-05。

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划项目(2012AA10A411); 国家自然科学基金项目(31372529); 山东省自主创新计划项目(2013CXC80202)。

作者简介: 李彬彬(1989-), 女, 硕士, 主要从事藻类遗传育种研究。E-mail: 782932598@qq.com

胡依依, 并列第一作者。

通信作者: 隋正红, 教授。E-mail: suizhengh@ouc.edu.cn

量化指标转化为该品种对理想解的相对接近度 C_i 的量化指标, 进而对各藻株的性状优劣进行综合分析, 为未来良种的杂交以及选育提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为龙须菜 GL 家系培育获得的 F_1 配子体幼苗。通过培养, GL 的四分孢子体放散获得雌雄配子体, 从中培养挑出性状差异较大的一株雌配子体与一株雄配子体(雌配子体藻体鲜红细长, 分枝少, 生长快速; 雄配子体藻体深红, 主支较短, 分枝多, 生长缓慢)进行杂交从而获得 F_1 四分孢子体, 该四分孢子体长大放散获得实验中所用的 F_1 配子体幼苗(图 1)。实验中起始所取的小幼苗均无分枝, 且长度在 3~5 mm。

1.2 培养条件及数据获取

随机选取 100 株幼苗, 每株藻体放入 1 个六孔板的孔里培养, 培养条件为: 温度为 $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、光照强度为 $15 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 盐度为 33(实验所用海水为过滤灭菌的海水), 光照周期为 12L:12D, 培养基为 PRO 培养基。为弥补海水蒸发影响, 每 3 天添加蒸馏水到原培养液位。在培养过程中分别用直尺测量藻体的长度(分枝及主支总长), 观测其分枝数以及用倒置显微镜 10 倍镜下测量其基部直径(主支靠近固着基处的直径宽度)等参数, 进行以 7 d 为 1 个周期的连续 5 个周期的测量记录, 通过公式 $V_L(\text{cm}/\text{d}) = [L - L_0]/t$ (L 为最后一次测量的藻体长度, 单位: cm; L_0 为最初的藻体长度, 单位: cm; t 为培养时间, 单位: d)计算其线性生长速度。从而获得实验所需的 5 周中的线性生长速度、分枝数以及基部直径的数据。

1.3 分析方法

应用统计学方法, 对实验所获取的数据进行统计分析, 用 SPSS 分析数据的分布特征, 同时计算其变异系数等, 对龙须菜 GL 家系 F_1 配子体的性状分离情况进行分析, 进而获得其遗传性状规律。

采用 DTOPSIS 综合评价法^[4-6], 对生长速度、分枝数量、基部直径等参数根据其重要程度

进行权重分配, 并通过计算获取接近度 C_i 这一量化指标, 从而对龙须菜 GL 家系 F_1 配子体的性状进行综合分析。

根据表 1 数据, 建立 3×100 的矩阵 Y (横向依次为线性生长速度、分枝数、基部径粗, 纵向分别为编号为 1、2、3...100 号的藻株), Z^+ 与 Z^- 。其中, $Z_{ij}^+ = Y_{ij}/Y_{j\max}$, $Y_{j\max} = \max_i(Y_{ij})$; $Z_{ij}^- = Y_{j\min}/Y_{ij}$, $Y_{j\min} = \min_i(Y_{ij})$ ($i = 1, 2, \dots, 100; j = 1, 2, 3$)。

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{m1} & Y_{m2} & Y_{m3} \end{bmatrix}$$

$$Z^+ = \begin{bmatrix} Z_{11}^+ & Z_{12}^+ & Z_{13}^+ \\ Z_{21}^+ & Z_{22}^+ & Z_{23}^+ \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{m1}^+ & Z_{m2}^+ & Z_{m3}^+ \end{bmatrix}$$

$$Z^- = \begin{bmatrix} Z_{11}^- & Z_{12}^- & Z_{13}^- \\ Z_{21}^- & Z_{22}^- & Z_{23}^- \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{m1}^- & Z_{m2}^- & Z_{m3}^- \end{bmatrix}$$

按性状的重要性分别赋予每个性状不同的权重(分配权重生长速度、分枝数、藻直径分别为 0.6、0.3、0.1), 建立加权的规范化决策矩阵 R^+ 和 R^- , 矩阵 R 的元素 $R_{ij} = W_j \times Z_{ij}$, W_j 是第 j 个性状的权值($i = 1, 2, \dots, 100; j = 1, 2, 3$)。

$$R^+ = \begin{bmatrix} R_{11}^+ & R_{12}^+ & R_{13}^+ \\ R_{21}^+ & R_{22}^+ & R_{23}^+ \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{m1}^+ & R_{m2}^+ & R_{m3}^+ \end{bmatrix}$$

$$R^- = \begin{bmatrix} R_{11}^- & R_{12}^- & R_{13}^- \\ R_{21}^- & R_{22}^- & R_{23}^- \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{m1}^- & R_{m2}^- & R_{m3}^- \end{bmatrix}$$

$X^+ = (X_1^+, X_2^+, X_3^+)$, 其中 $X_i^+ = \max(R_{ij})$; $X^- = (X_1^-, X_2^-, X_3^-)$, 其中 $X_i^- = \min(R_{ij})$ 。通过计算, 获得关于品种性状的理想解和负理想解分别为 $X_i^+ = (0.6, 0.3, 0.1)$ 和 $X_i^- = (0.16, 0.06, 0.06)$, 采用欧几里德范数作为距离的测定, 其公式为:

理想解距离 $S^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{ij} - X_j^+)^2}$, $i=1, 2, \dots, 100$

负理想解距离 $S^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{ij} - X_j^-)^2}$, $i=1, 2, \dots, 100$

经计算得到诸品种与理想解的距离 S^+ 及与负理想解的距离 S^- , 通过公式 $C_i = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-)$ 计算获得各品种理想解的相对接近度 $C_i^{[7]}$, 并按照其大小排序。

2 结果分析

2.1 变异系数分析结果

通过实验统计获得 100 株 F₁ 配子体的实验数据(表 1), 经计算获得其差异分析结果(表 2)。由图 2 可以看出, 所测的 100 株藻体中, 线性生长

速率变化范围为 2.0%~7.3%/d, 变异系数为 26.79%,标准差达到 1.28, 各藻株之间存在明显的差异, 变异幅度较大。藻株的分枝数分布很不集中, 变异极为显著, 其平均数为 1.93 个, 标准差为 0.8, 变异系数为 41.17%, 差异明显, 变异幅度相对很大。主枝基部直径变化范围 1.4~2.2 mm, 标准差达到 0.18, 变异系数在 3 个性状中最小, 为 9.87%。

2.2 统计分布分析结果

由图 2 中线性生长速率统计分布结果可以看出, 100 株配子体幼苗的线性生长速率分布呈现明显的正态分布特征, 多数藻体的线性生长速率



图 1 龙须菜 GL 家系的部分实验材料
a. 雌配子体; b. 雄配子体; c. F₁ 四分孢子体; d. F₁ 配子体。
Fig. 1 Partial cultivated materials of GL family of *Gracilariopsis lemaneiformis*
a. Female gametophyte; b. Male gametophyte; c. F₁ tetrasporophytes; d. F₁ gametophyte.

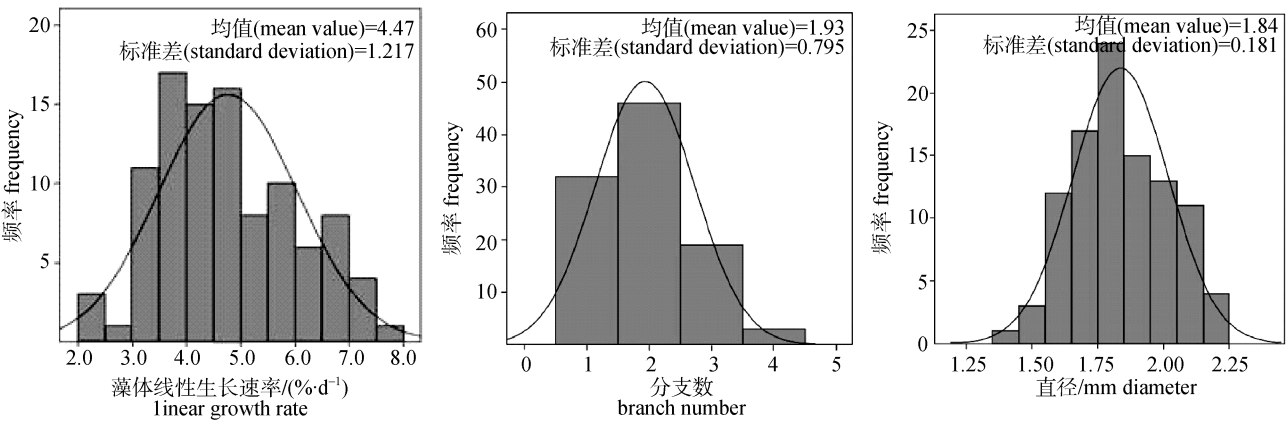


图 2 龙须菜 F₁ 配子体幼苗线性生长速率、分枝数、基部直径统计分布直方图
Fig. 2 The linear growth rate, branch number and diameter statistical distribution histogram of F₁ gametophyte

表 1 100 株龙须菜 F_1 配子体小苗的性状统计结果Tab. 1 The characteristics statistics of 100 F_1 gametophyte rootstocks of *Gracilariopsis lemaneiformis*

编号 no.	生长速度 /(%·d ⁻¹) the lin- ear growth rate	5 周后分枝数/ind the branch number after 5 weeks	5 周后藻基部直径 /mm the diameter after 5 weeks	编号 no.	生长速度/(%·d ⁻¹) the linear growth rate	5 周后分枝数/ind the branch number after 5 weeks	5 周后藻基部直径 /mm the diameter after 5 weeks
1	4.30	5	1.6	51	3.92	3	1.9
2	6.40	1	1.9	52	3.61	2	1.9
3	6.09	3	1.8	53	4.72	1	2.0
4	3.50	3	1.5	54	4.30	2	1.7
5	3.92	1	1.4	55	4.15	1	2.0
6	7.12	1	1.9	56	5.50	2	2.1
7	6.40	2	1.8	57	4.37	2	1.7
8	5.56	2	2.0	58	2.48	2	1.9
9	7.31	2	1.8	59	4.64	1	1.9
10	6.95	3	1.8	60	3.03	1	1.7
11	5.56	3	2.0	61	5.13	1	1.8
12	3.68	2	2.1	62	3.13	3	1.8
13	7.64	2	1.9	63	3.03	1	1.8
14	3.41	4	2.0	64	5.89	1	2.0
15	3.92	1	2.1	65	4.95	3	2.1
16	5.92	1	1.9	66	3.92	2	2.1
17	6.20	2	2.1	67	6.69	1	2.1
18	4.95	2	2.2	68	5.37	3	1.7
19	5.50	2	1.7	69	4.57	2	2.2
20	7.43	1	1.6	70	4.47	2	1.7
21	5.75	4	1.8	71	3.41	1	1.9
22	3.13	2	1.6	72	4.30	2	1.6
23	6.28	2	1.8	73	4.15	3	1.9
24	3.92	3	1.6	74	3.41	2	2.0
25	3.92	1	2.1	75	3.50	3	1.8
26	2.82	2	2.0	76	4.95	1	1.8
27	6.59	1	1.8	77	5.45	2	2.2
28	4.30	2	1.8	78	5.13	3	1.8
29	6.54	1	1.8	79	3.61	3	1.8
30	3.03	3	1.8	80	3.50	1	1.7
31	6.95	1	1.6	81	4.95	2	1.8
32	6.63	3	2.1	82	5.24	2	1.6
33	5.37	3	2.0	83	4.77	2	1.8
34	4.57	2	1.8	84	3.92	2	1.6
35	4.57	2	1.7	85	4.30	2	1.7
36	4.95	2	1.9	86	4.47	2	1.7
37	5.75	3	1.7	87	4.47	2	1.9
38	4.77	3	1.7	88	6.78	1	1.6
39	3.03	2	1.7	89	4.47	2	1.6
40	3.27	1	1.9	90	5.37	2	1.7
41	4.64	1	1.6	91	3.61	2	1.8
42	3.03	2	1.5	92	4.30	1	2.0
43	4.64	1	1.5	93	7.12	1	2.1
44	4.95	1	1.9	94	5.75	2	2.0
45	6.95	2	2.1	95	2.48	3	1.7
46	3.50	4	1.6	96	5.75	1	1.8
47	2.00	1	2.2	97	4.57	2	1.8
48	3.68	1	2.0	98	5.17	2	1.9
49	4.15	2	2.0	99	3.92	2	1.7
50	6.09	2	1.7	100	4.21	2	1.8

表 2 龙须菜 F₁ 配子体的差异分析表
Tab. 2 Difference analysis for F₁ gametophyte of *Gracilariopsis lemaneiformis*

性状 character	最大值 maximum	最小值 minimum	平均值 average	标准差 strandard deviation	变异系数/% variable coefficient	极差 range
线性生长速度/%·d ⁻¹ linear growth rate	7.64	2.00	4.76	1.28	26.79	5.31
分枝数/ind branch number	5	1	1.93	0.80	41.17	4.00
藻基部直径/mm the diameter	2.2	1.4	1.84	0.18	9.87	0.80

分布在 3.0%~6.0%/d 之间, 部分藻体的线性生长速率较低, 而也有少部分高达 7.0%/d 以上。线性生长速率在 3.0%~7.0%/d 之间的藻体频率均高于 5%但低于 20%, 在线性生长速率性状上, F₁ 配子体幼苗之间显示存在较大的遗传分离变异。

100 株配子体幼苗在分枝数上呈现明显的正态分布。多数藻体的分枝数在 28 d 的培养后为 2 个, 其频率达到 40%以上, 仅有部分藻体会达到 4 个, 其变异幅度较大。在分枝数上, F₁ 配子体幼苗存在一定的分离差异。

幼苗的主枝基部直径呈现明显的正态分布, 多数藻体的基部直径为 1.8 mm 左右。但是同时可以看出其变异的幅度比较大, 部分藻体的直径值比较低, 部分藻体的值则偏高, 在藻体基部直径这一性状上, F₁ 配子体的幼苗之间存在一定的遗传分离。

2.3 DTOPSIS 法综合分析结果

对 100 株龙须菜 GL 家系 F₁ 配子体的性状进行综合分析结果见表 3(仅列出前后各 10 位)。

DTOSIS 法是应用灰色理论, 通过对数据的无量纲化处理, 设置各性状的权重, 然后通过不同的计算方法, 将各性状与理想解的差距累加起来, 得出 C_i 值, 并利用该值大小对品种进行排序^[8-11]。由此样品的理想解接近度 C_i 越高, 证明对其性状的综合评价越好。由表 3 可以看出, 综合线性生长速率、分枝数以及基部直径 3 种性状进行评价, 评价价值最高的 3 株分别为编号 20、47、93 的株, 分别为 0.499432、0.498858 和 0.49659; 最低的为编号 32 的株, 为 0.240868, 最高与最低值的差距为 0.258564。

3 讨论

3.1 GL 家系 F₁ 配子体性状变异与可能的影响因素

变异系数分析结果显示 GL 家系杂交后代变异较大。F₁ 配子体的线性生长速率的变异系数值为 26.79%, 要比种质库的数值 19.41%高^[12]。而在一些其他农作物中, 例如在苧麻中, 杂交 F₁ 各种性状的变异系数在 10.22%~41.67%^[13]。对藻种

表 3 100 株配子体小苗的 DTOPSIS 部分分析结果
Tab. 3 The DTOPSIS analysis results of 100 strains of gametophyte rootstocks

排序 sequence	样品编号 number of samples	理想解距离 distance to ideal result, S ⁺	负理想解距离 distance to negative ideal result, S ⁻	相对接近度 relative approach degree, C _i	排序 sequence	样品编号 number of samples	理想解距离 distance to ideal result, S ⁺	负理想解距离 distance to negative ideal result, S ⁻	相对接近度 relative approach degree, C _i
1	20	0.242	0.242	0.499	91	65	0.243	0.092	0.274
2	47	0.504	0.502	0.499	92	78	0.232	0.086	0.271
3	93	0.244	0.240	0.497	93	68	0.216	0.078	0.266
4	6	0.244	0.241	0.497	94	33	0.215	0.076	0.260
5	31	0.248	0.242	0.494	95	37	0.192	0.067	0.258
6	88	0.251	0.242	0.491	96	10	0.133	0.046	0.255
7	67	0.251	0.241	0.489	97	11	0.203	0.069	0.255
8	27	0.254	0.242	0.487	98	21	0.161	0.054	0.251
9	29	0.256	0.242	0.486	99	3	0.172	0.057	0.250
10	2	0.259	0.242	0.483	100	32	0.144	0.046	0.241

质的实生后代种质变异分析结果中,各藻种实生后代的变异系数也都在 25% 左右^[14]。相比这些数据,可以看出龙须菜 GL 品系 F_1 配子体的变异系数较高,遗传分离较大。由此可见, F_1 配子体可以提供一些品质优良的藻种,或者找出性状差异大的藻种进行之后的杂交与选育以期获得优良的藻种。

100 株配子体幼苗在线性生长速率、分枝数、基部直径等性状方面均呈现明显的正态分布特征,标准差分别为 1.28、0.8、0.18,相对各性状参数本身变化幅度较大,说明 F_1 配子体幼苗存在一定的分离差异,与变异系数的分析结果相一致。

实验室中用 SSR 标记对采自青岛湛山湾、青岛台湾路和威海石岛不同地理群体和不同生化特性的龙须菜遗传多样性进行研究,分析结果显示,群内以及种群间的遗传多样性都很低^[15]。对采自青岛湛山湾以及台湾路的野生龙须菜群体进行 AFLP 进行分析,分析结果显示龙须菜的多态性很低,较为保守,分化程度很低^[16],证明龙须菜基因的多样性则相对很小。而本实验结果显示,GL 的 F_1 配子体之间的生物学性状的差异较大,但其基因的多样性则相对很小。排除环境因素的影响之外,可能是由于基因在表达过程中的差异而产生的影响,基因在表达过程中,通过 DNA 的甲基化、组蛋白修饰、染色质重塑和非编码 RNA 调控等方式控制基因表达从而达到表观性状的差异。因此在育种工作中可以多考虑其表观遗传因素。

3.2 DTOPSIS 综合性状评价的优势与辅助育种潜力

应用 DTOPSIS 评价法,将 F_1 配子体综合性状这一模糊量化指标转化为该品种对理想解的相对接近度 C_i 数据指标,弥补了对单一性状进行统计分析不够全面的不足,使量化标准与过程更加明确简单。运用 DTOPSIS 评价法所筛选的前 5 位种株除 47 号幼苗外,代号 20、93、6、31 的幼苗在生长速率、分枝数以及基部直径等各指标方面相对优势较为均衡,说明 DTOPSIS 评价法在龙须菜 GL 家系 F_1 配子体的综合评价中具有一定的效果。

对于 100 株 GL 家系 F_1 配子体的分析结果显

示,排序相邻藻株之间作为量化综合性状优劣的理想接近度 C_i 相差不大,但分布于评估结果排序前后部分藻株的理想接近度 C_i 差异明显,与统计结果所显示出的正态分布程度拟合较好、变异幅度较大的现象相吻合,说明理想接近度 C_i 指标在对龙须菜 GL 家系 F_1 配子体的评价中表现出较好的区分效果。

由于此次评价仅考虑了线性生长速率、分枝数以及基部直径 3 种性状,而对影响其栽培价值的其他方面考虑较少,导致各评价性状的权重分配方面有所欠缺,进而对评价结果造成一定影响。如,47 号幼苗只因基部直径单一指标性状突出而被作为优良株体选出,正是由于评价性能指标较少、分配权重欠合理所导致,在今后工作中应加以改进完善。

由此可见,龙须菜 GL 品系 F_1 配子体存在一定的分离变异,能够为进一步的育种工作开展提供一些品质优良的藻种;DTOPSIS 评价法的引入,使量化标准更为明确简单,但也需进一步加以完善。

参考文献:

- [1] Zhang X C, Fei X G. Introduction of *Gracilaria/Gracilariopsis lemaneiformis* 981 and its cultivation technique[J]. Scientific Fish Farming, 2008, (6): 21–22.[张学成, 费修纭. 981 龙须菜及其栽培技术介绍[J]. 科学养鱼, 2008(6): 21–22.]
- [2] Zhang X C, Fei X G, Wang G C. Genetic studies and large scale cultivation of *Gracilaria lemaneiformis*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(5): 947–954.[张学成, 费修纭, 王广策, 等. 江蓠属海藻龙须菜的基础研究与大规模栽培[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2009, 39(5): 947–954.]
- [3] Zhang X C, Shi Y X, Meng Z. Chlorella ultraviolet mutagenesis and prolific algae strains screening[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(5): 749–753.[张学成, 时艳侠, 孟振. 小球藻紫外线诱变及高产藻株筛选[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(5): 749–753.]
- [4] Long T F, Guo K T, Xu Y L. Application of DTOPSIS in appraising new rice varieties[J]. Hybrid Rice, 2004, 19(2): 66–69.[龙腾芳, 郭克婷, 徐永亮. DTOPSIS 法在综合评价水稻新品种中的初步应用[J]. 杂交水稻, 2004, 19(2): 66–69.]
- [5] LIU H. Appraise of new cotton varieties by means of

- DTOPSIS[J]. Cotton, 2001(8): 13–15.[刘辉. 应用 DTOPSIS 法对棉花新品种综合评估初探[J]. 中国棉花, 2001(8): 13–15.]
- [6] Wei Y F, Jiang Y R, Pan B G. Application of DTOPSIS in appraising new barley varieties[J]. Barley Science, 2002(4): 20–23.[魏亚凤, 江银荣, 潘宝国. 应用 DTOPSIS 法综合评价大麦新品种的初步研究[J]. 大麦科学, 2002(4): 20–23.]
- [7] Guo K T, Long T F, Yang F X. Appraise synthetically new cotton varieties tested in yellow river district by means of DTOPSIS[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004, 20(2): 226–228.[郭克婷, 龙腾芳, 杨付新. 利用 DTOPSIS 法综合评价黄河流域棉花区试新品种[J]. 中国农学通报, 2004, 20(2): 226–228.]
- [8] Long T F, Guo K T. Programming for DTOPSIS method and its application in appraising new crop varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004, 20(3): 252–254.[龙腾芳, 郭克婷. DTOPSIS 法的程序设计及其在作物品种评价中的应用[J]. 中国农学通报, 2004, 20(3): 252–254.]
- [9] Wei Y Q, Zhao B X, Lei X B. Comprehensive evaluation of new maize varieties by means of DTOPSIS and grey related degree[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2009, 21(6): 11–14.[卫勇强, 赵保献, 雷晓兵, 等. 灰色关联度分析和 DTOPSIS 法综合评价玉米新品种[J]. 江西农业学报, 2009, 21(6): 11–14.]
- [10] Du G, Liu Q N, Wu X Y. Results comparison of comprehensive evaluation flax new varieties with DTOPSIS and grey related degree[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2009, 22(6): 1526–1531.[杜刚, 刘其宁, 吴学英. DTOPSIS 法和灰色关联度法在亚麻新品种综合评价中的应用比较[J]. 西南农业学报, 2009, 22(6): 1526–1531.]
- [11] Jiang Y P, Liu S D, Xue C X, et al. Results comparison of comprehensive evaluation tomato varieties with DTOPSIS and grey related degree[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(22): 259–263.[姜永平, 刘水东, 薛晨霞, 等. DTOPSIS 法和灰色关联度法在番茄品种综合评价中的应用比较[J]. 中国农学通报, 2010, 26(22): 259–263.]
- [12] LI B B. Analysis on the germplasm characteristics of *Gracilaria/Gracilariopsis lemaneiformis* and construction of the germplasm database[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.[李彬彬. 龙须菜种质库性状分析与种质数据库的构建[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.]
- [13] LIU F H. Segregation and variation in morphological and economic characters of F₁ hybrids of ramie varieties[J]. China's Fiber Crops, 1995(4): 7–10.[刘飞虎. 苧麻杂交一代性状分离变异研究[J]. 中国麻作, 1995(4): 7–10.]
- [14] Lu J Y, Mao Y M, Shen L Y. Study on the trait segregation of Chinese jujube naturally pollinated seedlings[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2003, 26(4): 53–58.[鹿金颖, 毛永民, 申连英, 等. 枣实生后代性状分离研究[J]. 河北农业大学学报, 2003, 26(4): 53–58.]
- [15] Hu Y Y. Development of genomic-SSR markers and genetic diversity analysis of *Gracilariopsis lemaneiformis* (Rhodophyta) [D]. QingDao: Ocean University of China, 2014.[胡依依. 龙须菜全基因组 SSR 标记的开发及遗传多样性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.]
- [16] Ding H Y, Sui Z H, Zhong J, et al. Analysis and comparison on genetic diversity of haploid and diploid *Gracilaria lemaneiformis* populations from different places of Qingdao by AFLP[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(1–2): 99–105.[丁弘叶, 隋正红, 仲杰, 等. 青岛不同野生群体的单倍体和二倍体龙须菜 AFLP 遗传多样性分析与比较[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2012, 42(1–2): 99–105.]

F₁ gametophyte trait analysis of a new strain GL family of *Gracilaria/Gracilariopsis lemaneiformis* (Rhodophyta)

LI Binbin, HU Yiyi, SUI Zhenghong, GUO Weihua

Key Laboratory of Marine Genetics and Breeding of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract: *Gracilaria/Gracilariopsis lemaneiformis* is the second largest cultivated alga in China, with economic value related to agar production and bioremediation potential by eliminating eutrophication. It is important to establish a genetic breeding system for *Gracilaria/Gracilariopsis lemaneiformis* (GL) to promote sustainable development of the mariculture industry. In the present study, 3 productive characters of the F₁ generation of GL gametophytes, including linear growth rate, branch number, and central base diameter, were analyzed and evaluated using the DTOPSIS comprehensive evaluation method to convert qualitative comprehensive traits of F₁ gametophytes to quantitative indicators of C_i value, which is necessary to determine an ideal solution to improve breeding. Thus, characters of all strains were comprehensively analyzed and provided evidence for future cultivar hybridization and selection.

Among the 100 individuals tested, the linear growth rate ranged from 2.0%/d to 7.3%/d, with an average of 4.76%/d (standard deviation, 1.28). Its variable coefficient was 26.79%, and that the difference among individuals was significant. Branch number was unevenly distributed with extremely substantial variation. The mean value was 1.93 with a range from 1 to 5, standard deviation of 0.8, and variable coefficient of 41.17%; this was the most substantial variation and a relatively large variation range. The average central base diameter was 1.8 mm, with a range from 1.4 mm to 2.2 mm, and standard deviation of 0.18. Its variable coefficient, 9.87%, had the lowest variation range and least variance difference among the three productive characters. All of the above three characters had normal distributions: Most of the linear growth rates of F₁ gametophytes distributed between 3.0%/d and 6.0%/d; 40% of individuals had 2 branches after 28 days of culturing; and central base diameter mostly distributed between 1.6 mm and 2.1 mm. Standard deviation analysis revealed large variation in the range of characters of the F₁ generation of these gametophyte plants. Based on DTOPSIS comprehensive analysis, three productive characters of F₁ generation gametophytes were comprehensively evaluated, and 100 strains were ranked based on their C_i value. The results showed that strains 20, 47, 93, 6, and 31 were superior to the others because they had higher C_i values, which indicates that they have a balance of advantageous growth rate, branch number, and central base diameter. These strains could be exploited for genetics-based breeding before they reach maturity. In addition, adjacent strains ranked by DTOPSIS analysis had similar C_i values, whereas strains at either extreme showed substantial difference, which was consistent with the normal distribution.

The large variation among F₁ GL gametophytes of the three productive characters indicates that strains with substantial character differences can be chosen as parents for hybridization to obtain improved varieties. DTOPSIS analysis intuitively measured comprehensive traits of F₁ gametophytes, which provides a theoretical basis for subsequent research on strain selection and further construction of a *Gracilaria/Gracilariopsis lemaneiformis* genetic breeding system.

Key words: *Gracilaria/Gracilariopsis lemaneiformis*; F₁ gametophyte; traits analysis; DTOPSIS

Corresponding author: SUI Zhenghong. E-mail: suizhengh@ouc.edu.cn