

文章编号: 1674-5566(2024)02-0371-09

DOI: 10.12024/jsou.20230304134

坛紫菜叶状体颜色与长度、宽度和厚度的相关性分析

裘叶帆^{1,2}, 丁洪昌^{1,2}, 唐隆晨^{1,2}, 严兴洪^{1,2}

(1. 上海海洋大学 水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 上海水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 实验以坛紫菜野生型品系(W, ♀)和红色突变体(R, ♂)杂交产生的杂合丝状体为材料, 构建由240个株系组成的双单倍体(Doubled haploid, DH)群体, 随后对DH群体的叶状体颜色与长度、宽度、叶片厚度、原生质体大小和细胞壁厚度5个数量性状的相关性进行分析。结果显示, 在不同颜色组中(野生色组和红色组), 5个性状的表型值均呈正态分布。各性状的变异系数为10.02%~43.73%, 其中长度的变异系数最大。不同颜色组间, 每个性状表型值呈极显著差异($P < 0.01$), 相比野生色组, 红色组的长度更长、宽度更窄、叶片更薄、原生质更小、细胞壁更薄。其中颜色与各性状的相关性程度: 叶片厚度 > 细胞壁厚度 > 原生质体大小 > 长度 > 宽度。另外, 各性状的遗传力均表现为长度 > 原生质体大小 > 叶片厚度 > 细胞壁厚度 > 宽度, 且野生色组高于红色组。不同颜色组控制同一经济性状的基因对数不同, 且控制长度性状的基因对数差异最大。本研究为开展坛紫菜复合经济性状新品种培育提供参考。

关键词: 坛紫菜; DH群体; 数量性状; 遗传分析

中图分类号: S 917.3 **文献标志码:** A

紫菜(*Pyropia*)隶属于红藻门(Rhodophyta)原红藻纲(Protofloridae)红毛菜目(Bangiales)红毛菜科(Bangiaceae), 在中、日、韩三国被广泛栽培, 具有较大的经济价值^[1]。其中, 坛紫菜(*Pyropia haitanensis*)是我国特有种, 被广泛栽培在福建、浙江和广东沿海, 其年产量约占我国紫菜年总产量的75%^[2]。

紫菜的生活史为异型世代交替, 供食用的部分为其单倍配子体(叶状体)。在开展新品种培育工作时, 也主要是考察紫菜的叶状体经济性状, 后者主要包括颜色、体型、长度、宽度、鲜重、厚度、长宽比、抗高温性等^[3]。了解紫菜叶状体经济性状的遗传趋势, 可在筛选具有目标性状的新品种(品系)时缩短育种周期。目前关于紫菜主要经济性状遗传分析已有一些报道。研究^[4-5]表明, 坛紫菜和条斑紫菜的主要经济性状, 如长度、宽度和厚度均属数量性状, 遗传力均超过50%,

鲜重与长度和宽度均存在极显著正相关性, 可通过选择长度或宽度具优势的品系, 来培育鲜重具优势的品系。

紫菜藻体颜色主要由叶绿素 a 、藻红蛋白和藻蓝蛋白的含量及其相互间的比值决定^[6]。早期研究者利用紫菜颜色突变体, 开展了大量的遗传学、生理学和品种改良等工作。在品种改良方面, 侯同玉等^[7]发现天然红色突变体的生长速度明显快于其亲本野生型。李琳等^[8]分离出来的坛紫菜绿色突变体, 其生长速度显著慢于野生型。陈昌生等^[9]和丁洪昌等^[10]选育出的坛紫菜薄叶片品系, 其藻体一般为红色型。上述结果暗示叶状体颜色与叶长、叶厚等主要经济性状具有较强的相关性, 但并没有系统地研究。此外, 在开展坛紫菜新品系选育时, 叶状体颜色也是在大量候选品系中最先被观察到的性状。因此, 探究坛紫菜叶状体颜色与主要经济性状的相关性, 可

收稿日期: 2023-03-31 修回日期: 2023-05-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(32102773); 上海市青年科技英才扬帆计(21YF1417100); 宁波市公益性科技计划项目(2022S160)

作者简介: 裘叶帆(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海藻遗传育种。E-mail: 736322374@qq.com

通信作者: 严兴洪, E-mail: xhyan@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

为缩短育种周期,培育具复合型性状良种提供参考。

双单倍体(Doubled haploid, DH)是由单倍体经染色体加倍后形成的纯合二倍体。利用DH群体可开展良种选育、数量性状遗传分析、性状基因定位等方面的研究^[11-13]。本研究以坛紫菜野生型品系和红色突变品系的杂合丝状体为材料,分离子代颜色四嵌合叶状体中每个色块,分别获得它们的DH株系,利用野生型和红色型两个DH群体,系统探究坛紫菜叶状体颜色与叶状体长度、宽度和厚度的相关性。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究所用的坛紫菜杂合丝状体Z7,是由野生型品系(*PT-WT*, W, ♂)与红色突变品系(*SPY-1*, R, ♀)杂交所得,以自由丝状体的形式被保存于实验室内^[14]。*PT-WT*品系的分离过程:利用酶解技术^[15],分离获得坛紫菜野生叶状体的单离体细胞,从再生叶状体中挑选出雄性个体,利用叶状体的单性生殖^[16]获得其纯合自由丝状体(品系),该品系的F₁叶状体均为雄性,其基部颜色呈褐绿色,中部和梢部颜色呈红褐色(野生型)。*SPY-1*品系的分离过程:利用⁶⁰Co-γ射线照射坛紫菜野生叶状体,经酶解处理后,其单离体细胞再生为叶状体,随后在再生叶状体中筛选出一个雌性红色突变体,并通过单性生殖获得其纯合自由丝状体(品系),该品系的F₁叶状体均为雌性,整个藻体颜色呈红色(红色型)。

1.2 坛紫菜DH群体的构建

杂合丝状体Z7经单面刀片切碎后,被均匀地铺洒于清洗干净的文蛤(*Meretrix meretrix*)壳上,培养条件:暗光培养3 d后,光照密度调整为20 μmol photons/(m²·s),光周期10 L:14 D,温度(23.0±0.5)°C。培养2周后,清洗贝壳表面多余的自由丝状体,并将光照强度增至50 μmol photons/(m²·s),每5 d更换新的MES培养液。待丝状体长满贝壳表面后,将培养条件调整为温度(29.0±0.5)°C、光照密度10 μmol photons/(m²·s)、光周期8 L:16 D。待贝壳内壳孢子囊枝的占比超过90%时,取1个贝壳放入含50 mL培养液

的塑料杯(250 mL)内,进行充气培养,并放入4~6根尼龙单丝供壳孢子附着,培养条件:温度(23.0±0.5)°C、光照密度50 μmol photons/(m²·s),光周期10 L:14 D。待尼龙丝上附着一定数量的壳孢子后,将它们转移至充气瓶(250 mL)内进行充气培养,培养条件同壳孢子放散。壳孢子苗被培养至长约5 cm时,从中挑选出颜色四嵌合叶状体,将它们的各个色块分离,利用酶解技术^[9],分别获得它们的单离体细胞,后者被培养至大的再生叶状体后,利用叶状体的单性生殖获得它们的纯合丝状体(DH株系)。根据DH株系的叶状体颜色类型,将它们分为野生型和红色型两个群体。

1.3 DH群体叶状体长度、宽度和厚度的测定

收集各DH株系贝壳丝状体放散的壳孢子,进行充气培养,培养条件:温度(23±0.5)°C、光照密度50 μmol photons/(m²·s)、光周期10 L:14 D。15 d后,分别随机挑选50株叶状体,置于500 mL充气瓶中培养,每5 d更换1/2的培养液。日龄35 d时,分别测量各DH株系叶状体的长度和宽度进行。随后将叶状体置于1 000 mL充气瓶中进行培养。日龄45 d时,测量各DH株系叶状体中部厚度,叶片厚度由细胞壁厚度(上下两层细胞壁的厚度之和)和原生质体大小组成,对后两者数据也进行了测定。

1.4 统计分析

实验数据用Excel 2010进行常规计算后,采用Origin 2022软件进行统计分析,统计值用平均值±标准差(Mean±SD)表示。对野生色型和红色型群体的DH株系叶状体各性状表型值的频率分布采用Kolmogorov-Smirnov检验,当 $P_{ks} > 0.05$ 时,说明数据符合正态分布^[17]。各性状表型值的变异系数(Coefficient of variation, CV)的计算公式^[18]:

$$CV = \frac{SD}{mean} \times 100\% \quad (1)$$

各性状间的相关性分析采用Spearman相关系数,并对检验结果与相关性强度间的转化进行定义:强相关(0.7<|r|≤1.0)、中度相关(0.5<|r|≤0.7)、弱相关(0.3<|r|≤0.5)和无相关(0≤|r|≤0.3)^[19]。

计算野生色型和红色型群体的组内(DH株系内50棵叶状体之间, V_1)和组间(DH株系之间,

V_2)的方差,再计算得到遗传方差(V_g)和环境方差(V_e),获得各性状的遗传力^[20]。根据公式(2)估算控制长度、宽度、叶片厚度、原生质体大小和细胞壁厚度5个性状的基因对数(k):

$$k = \frac{(L - m)^2}{V_g} \quad (2)$$

式中: L 和 m 分别为DH群体中不同株系间某数量性状表型值的极端值和均值。极端值 L 的判定方法:将表型值的最大值和最小值分别减去均值,差值的绝对值大的被定义为极端值^[21]。

2 结果

2.1 DH群体的构建

坛紫菜野生型品系(W, δ)与红色突变品系(R, η)杂交,其子代 F_1 叶状体上出现4种不同的色块:2种亲本色块(W, R)和2种重组色块(W', R'),其中W'色块比W色块颜色稍红,R'色块比R色块颜色稍浅。 F_1 叶状体绝大多数为由2~4个色块构成的颜色嵌合体。本研究将W和W'色块统称为野生色组(W_g),将R和R'色块统称为红色组(R_g)。为保证遗传结构完整性,从中挑选了60株四嵌合叶状体用于DH群体构建,共获得240个DH株系,其中野生色组和红色组分别有119和121个株系。

在叶状体培养过程中,出现少量DH株系叶状体发育异常或过早成熟的问题。因此,用于统计叶状体长度和宽度的自由度为228个(W_g:R_g=117:111),统计叶片厚度、原生质体大小和细胞壁厚度的自由度为213个(W_g:R_g=117:96)。

2.2 叶状体经济性状的变异系数

如表1所示,叶状体长度、宽度、叶片厚度、原生质体大小和细胞壁厚度的表型值变异系数,在野生色组和红色组之间相差不大,但长度的变异

系数均大于其他性状,分别为43.73%和37.15%。5个性状表型值的频率分布如图1所示,在野生色组和红色组中的 P_{KS} 值均大于0.05,各性状值在不同颜色组中均呈正态分布,可利用统计学进行遗传分析。

2.3 叶状体颜色与经济性状的相关性

Spearman相关系数检验结果如表2所示,叶状体颜色与叶片厚度、原生质体大小、细胞壁厚度间均存在强负相关,与长度间存在中度正相关,与宽度间存在弱负相关。长度与宽度间不存在相关性,与叶片厚度、原生质体大小、细胞壁厚度间均存在中度负相关。叶片厚度与宽度间存在中度正相关,与原生质体大小和细胞壁厚度间均存在强正相关。

根据Kruskal-Wallis的检验结果,绘制长度、宽度、叶片厚度、原生质体大小和细胞壁厚度在野生色组和红色组间的差异箱线图(图2),发现5个性状表型值均在野生色组和红色组间存在极显著差异($P < 0.01$)。一般情况下,红色组的叶状体长度更长、宽度更窄、叶片更薄、原生质体更小、细胞壁更薄,与野生色组相反,这也符合Spearman相关系数检验结果。

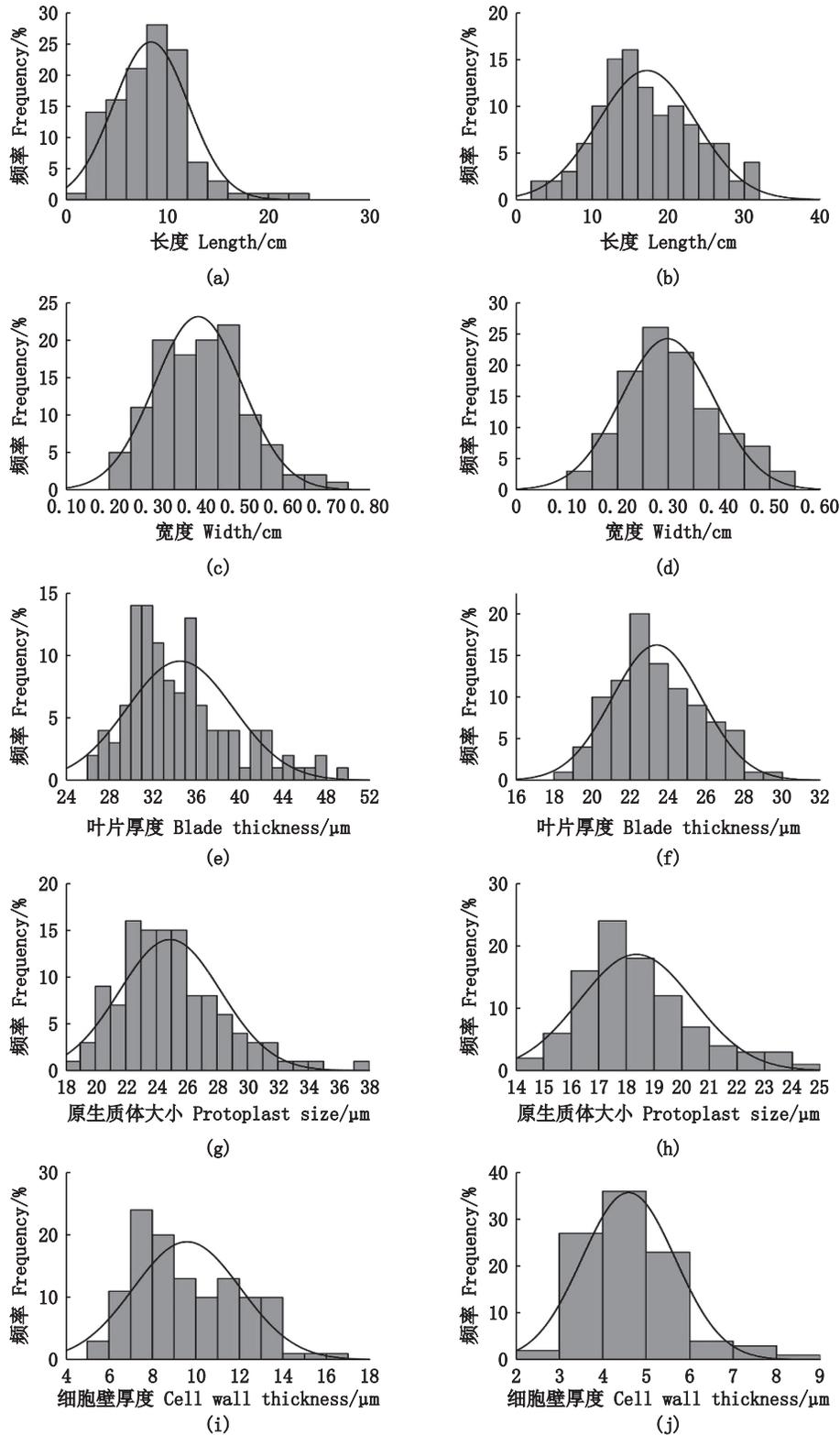
2.4 DH群体各数量性状遗传力及基因对数的估算

在野生色组中,长度、宽度、叶片厚度、原生质体大小和细胞壁厚度的遗传力分别为93.06%、50.92%、84.56%、84.28%和80.55%,均高于红色组。估算出野生色组中控制长度、宽度、叶片厚度、原生质体大小和细胞壁厚度的基因对数分别为15.36、11.67、13.81、27.78和23.21,红色组中分别为6.68、14.72、9.26、21.34和17.61。见表3。

表1 坛紫菜DH群体叶状体不同性状的表型变异

Tab. 1 Phenotypic variation of five traits of gametophytic blades of DH population in *P. haitanensis*

性状 Trait	平均值 Mean		变异系数 CV/%		P_{KS}	
	野生色组 W _g	红色组 R _g	野生色组 W _g	红色组 R _g	野生色组 W _g	红色组 R _g
长度 Length/cm	8.42 ± 3.68	17.21 ± 6.39	43.73	37.15	0.40	0.73
宽度 Width/cm	0.41 ± 0.10	0.30 ± 0.09	24.81	30.49	0.64	0.22
叶片厚度 Blade thickness/ μ m	34.54 ± 4.87	23.40 ± 2.34	14.09	10.02	0.10	0.57
原生质体大小 Protoplast size/ μ m	24.91 ± 3.32	18.36 ± 2.05	13.32	11.14	0.22	0.28
细胞壁厚度 Cell wall thickness/ μ m	9.59 ± 2.46	4.60 ± 1.07	25.62	23.21	0.06	0.52



图(a), (c), (e), (g), (i)分别为野生色组的长度、宽度、叶片厚度、原生质体大小和细胞壁厚度的分布频率,图(b), (d), (f), (h), (j)分别为红色组的长度、宽度、叶片厚度、原生质体大小和细胞壁厚度的分布频率。

Pictures (a), (c), (e), (g), (i) are the distribution frequency diagrams of the length, width, blade thickness, protoplast size and cell wall thickness of the wild-type group, and pictures (b), (d), (f), (h), (j) are the distribution frequency diagrams of the length, width, blade thickness, protoplast size and cell wall thickness of the red-type group.

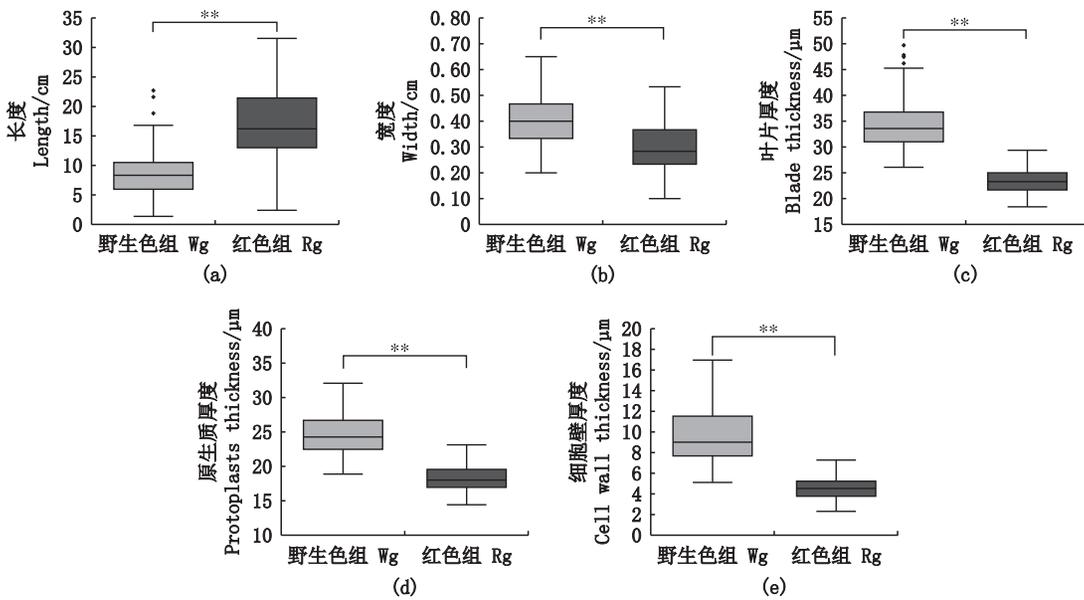
图1 坛紫菜野生色组和红色组的叶状体5个性状表型值的分布频率

Fig. 1 Distribution frequency of phenotypic values of five blade traits in wild-type and red-type groups of *P. haitanensis*

表2 坛紫菜DH群体叶状体6个性状表型值的相关系数
Tab.2 Correlation coefficients of phenotypic values of six blade traits in DH population of *P. haitanensis*

性状 Trait	颜色 Color	长度 Length	宽度 Width	叶片厚度 Blade thickness	原生质体大小 Protoplast size	细胞壁厚度 Cell wall thickness
颜色 Color	1					
长度 Length	0.68**	1				
宽度 Width	-0.49*	-0.15#	1			
叶片厚度 Blade thickness	-0.86***	-0.59**	0.47*	1		
原生质体大小 Protoplast size	-0.80***	-0.53**	0.41*	0.94***	1	
细胞壁厚度 Cell wall thickness	-0.84***	-0.58**	0.49*	0.90***	0.73***	1

注:#表示无相关性($|r| \leq 0.3$);*表示弱相关性($0.3 < |r| \leq 0.5$);**表示中相关性($0.5 < |r| \leq 0.7$);***表示强相关性($0.7 < |r| \leq 1$)。
Notes: # means no correlation($|r| \leq 0.3$); * means weak correlation ($0.3 < |r| \leq 0.5$); ** means medium correlation ($0.5 < |r| \leq 0.7$); *** means strong correlation ($0.7 < |r| \leq 1$).



**表示极显著差异($P < 0.01$)。
** means significantly different ($P < 0.01$).

图2 坛紫菜叶状体5个性状表型值在野生组和红色组间的显著性差异
Fig.2 Significant difference plot of phenotypic values of five blade traits between wild-type and red-type group in *P. haitanensis*

表3 坛紫菜叶状体五个表型性状在野生色组和红色组中的遗传力及基因对数
Tab.3 Heritability and number of genes controlling the five phenotypic traits in wild-type and red-type groups of *P. haitanensis* blades

性状 Trait	颜色群体 Color Group	方差 Variance		遗传力 Heritability/%	极值 Extreme value	基因对数 No. of genes
		V_g	V_e			
长度 Length	野生色组 Wg	13.66	0.33	93.06	22.90 cm	15.36
	红色组 Rg	41.24	2.94	81.29	33.80 cm	6.68
宽度 Width	野生色组 Wg	0.010 2	0.002 5	50.92	0.75 cm	11.67
	红色组 Rg	0.008 4	0.002 3	46.98	0.65 cm	14.72
叶片厚度 Blade thickness	野生色组 Wg	23.89	1.37	84.56	52.71 μm	13.81
	红色组 Rg	5.55	0.71	69.38	30.57 μm	9.26
原生质体大小 Protoplast size	野生色组 Wg	11.10	0.65	84.28	42.47 μm	27.78
	红色组 Rg	4.23	0.36	78.34	27.86 μm	21.34
细胞壁厚度 Cell wall thickness	野生色组 Wg	6.09	0.45	80.55	21.48 μm	23.21
	红色组 Rg	1.15	0.20	61.99	9.10 μm	17.61

3 讨论

在作物遗传学研究方面,目前常用的作图群体包括回交群体(Back crossing, BC)、重组近交系(Recombined inbred lines, RIL)、DH群体等。其中DH群体由染色体加倍的纯合品系组成,是遗传学研究的理想材料。在农艺性状评估、遗传图谱构建等实验中,通常涉及到一个或多个种群中的所有样本或个体,只有当样本量足够大时,才能在后续分析中获得准确的结果^[22-24]。本研究利用遗传结构完整的坛紫菜颜色四嵌合叶状体,构建了240个DH株系,保证了后续性状遗传分析的准确性。

农艺性状是指农作物生长发育中的农艺特征,如株型、抽穗期、开花期、成熟期等,通常是农作物栽培和种植的重要依据,也是决定作物产量的关键因素^[25-26]。坛紫菜叶状体形态简单且内部无分化,可考察的农艺性状数目也有限,主要包括叶状体长度、宽度、厚度等,其中,原生质体大小和细胞壁厚度共同决定了叶状体的厚度。对坛紫菜DH群体的叶状体经济性状分析发现,5个性状的表型值在野生色组和红色组中均呈正态分布,符合数量性状的典型特征^[20]。

变异系数是反映一个群体各数量性状变化程度的重要指标,变异系数越大,数量性状的分布范围也越广,也就越容易筛选到性状优良的品系^[27]。赵龙等^[28]对菜豆10个农艺性状进行测定,发现产量的变异系数最大,全生育期的变异系数最小,认为在选育高产普通菜豆品种时,应主要考虑单株荚数、百粒重和主茎分支等性状。陈家辉等^[29]对甘蓝型油菜种质群体6个农艺性状分析,发现主花序角果数和角果长度的变异受遗传因素影响较大,认为这两个性状可作为后续选育的主要选育性状。本研究中,5个表型性状在野生色组和红色组中的变异系数在10.02%~43.73%,其中长度的变异系数在两组中均最大,表明在良种培育时,可较容易筛选到生长快的坛紫菜新品系。

同一群体内对不同性状的显著性差异分析,可为筛选具复合经济性状的新品系提供参考^[30-31]。本研究中,5个表型性状在红色组与野生色组间差异显著,红色品系的叶状体普遍具有生长快和细胞壁薄的特性,而野生品系的叶状体

则具有更宽的藻体。与显著性差异分析结果类似,相关性分析结果显示,红色品系的叶状体,一般情况下其长度较长、宽度较窄、叶片厚度较薄、原生质体较小、细胞壁较薄,与野生品系相反。在生产上,叶状体长度影响栽培产量,叶状体厚度影响加工产品的品质^[32-33],此外,红色品系的藻体其主要色素蛋白含量也更高,生长也更快,品质也更优^[7,9,34]。因此,在开展坛紫菜良种培育时,通过筛选偏红色的藻体可更容易培育出优质、生长快的新品种(系)。

对于数量性状而言,遗传力表示多个控制某一性状基因值的总和。DH株系的各基因位点均为纯合,其遗传方差等于加性方差,因此DH群体的广义遗传力等于狭义遗传力^[35]。本研究中,除宽度性状外,其他4个性状的遗传力均超过60%,表明坛紫菜叶状体长度、叶片厚度、原生质体大小和细胞壁厚度受遗传因素的影响较大。其中,长度与厚度的遗传力分析结果与XU等^[5]结果基本一致,而宽度的遗传力相差较大,可能是不同坛紫菜DH群体各性状遗传能力有所不同。基因对数的估算可间接地为选育性状的难易程度提供参考,一般而言,控制某一性状的基因对数越少,则该性状的育种年限也越短,在育种过程中也就越容易选育出符合预期目标的品系^[36]。本研究中,除宽度性状外,红色品系中其他性状的基因对数均低于野生品系,说明通过筛选叶状体呈红色的个体,可较容易筛选出具有生长快、厚度薄的品系。

综上所述,坛紫菜叶状体颜色与长度、宽度、厚度、原生质体大小和细胞壁厚度具有较强的相关性,红色品系的叶状体一般生长快、叶型窄、藻体薄。研究结果为开展坛紫菜复合经济性状新品种培育提供参考。

参考文献:

- [1] 朱建一,严兴洪,丁兰平,等.中国紫菜原色图集[M].北京:中国农业出版社,2016:126.
ZHU J Y, YAN X H, DING L P, et al. Color atlas of Chinese laver [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016: 126.
- [2] 何培民,张泽宇,张学成,等.海藻栽培学[M].北京:科学出版社,2018:242-244.
HE P M, ZHANG Z Y, ZHANG X C, et al. Seaweed cultivation [M]. Beijing: Science Press, 2018: 242-244.

- [3] 童冠文. 条斑紫菜经济性状研究进展[J]. 现代农业科技, 2010(11): 343-345.
TONG G W. Research advances on economic character of *Porphyra yezoensis* [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2010(11): 343-345.
- [4] 黄林彬, 严兴洪. 条斑紫菜双单倍体群体主要经济性状的遗传分析[J]. 水产学报, 2017, 41(12): 1847-1857.
HUANG L B, YAN X H. Genetic analysis of major economic traits in *Pyropia yezoensis* using double haploid population [J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(12): 1847-1857.
- [5] XU Y, XIE C T, CHEN C S, et al. Genetic analyses of six quantitative traits of a doubled haploid population of *Porphyra haitanensis* Chang et Zheng (Bangiales, Rhodophyta) [J]. Journal of Applied Phycology, 2012, 24(1): 89-96.
- [6] 黄惠珍. 坛紫菜色素突变体超微结构及色素基因表达的比较研究[D]. 厦门: 集美大学, 2012.
HUANG H Z. Comparative research on ultrastructure and expressed level of pigment gene in pigment mutants of *Porphyra haitanensis* [D]. Xiamen: Jimei University, 2012.
- [7] 侯同玉, 严兴洪. 坛紫菜天然红色变异体的分离与特性分析[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(4): 504-509.
HOU T Y, YAN X H. Isolation and characterization of a red type variant in *Porphyra haitanensis* Chang et Zheng (Bangiales, Rhodophyta) [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(4): 504-509.
- [8] 李琳, 严兴洪. 坛紫菜绿色突变体的分离与特性分析[J]. 上海水产大学学报, 2006, 15(1): 30-35.
LI L, YAN X H. Isolation and characterization of a green type mutant in *Porphyra haitanensis* Chang et Zheng (Bangiales, Rhodophyta) [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2006, 15(1): 30-35.
- [9] 陈昌生, 梁艳, 徐燕, 等. 坛紫菜薄叶新品系选育及经济性状的比较[J]. 渔业科学进展, 2009, 30(2): 100-105.
CHEN C S, LIANG Y, XU Y, et al. Selective breeding and comparison of economic traits of the new thin-thallus strain *Porphyra haitanensis* [J]. Progress in Fishery Sciences, 2009, 30(2): 100-105.
- [10] DING H C, LV F, WU H X, et al. Selection and characterization of an improved strain produced by interspecies hybridization between *Pyropia* sp. from India and *Pyropia haitanensis* from China [J]. Aquaculture, 2018, 491: 177-183.
- [11] LEPHUTHING M C, KHUMALO T P, TOLMAY V L, et al. Genetic mapping of quantitative trait loci associated with plant height and yield component traits in a wheat (*Triticum aestivum* L.) doubled haploid population derived from Tugela-DN × Elands [J]. Agronomy, 2022, 12(10): 2283.
- [12] PUNDIR S, SINGH V K, KUMAR S, et al. Validation of resistance to cereal cyst nematode (*Heterodera avenae*) and yield performance study in doubled haploid lines of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2023, 70(1): 107-113.
- [13] ZHANG X L, WANG M, ZHANG C Z, et al. Genetic dissection of QTLs for starch content in four maize DH populations [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 950664.
- [14] 张源, 严兴洪. 自然条件下的坛紫菜四分体发育与性别表型观察[J]. 水产学报, 2013, 37(6): 871-883.
ZHANG Y, YAN X H. Observation on tetrad development and formation of sex phenotype of *Pyropia haitanensis* blades in natural conditions [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(6): 871-883.
- [15] WANG S J, WANG G Y, SUN Y L, et al. Isolation and cultivation of the vegetative cells of *Porphyra haitanensis* [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1987, 5(4): 333-339.
- [16] 严兴洪, 李琳, 陈俊华, 等. 坛紫菜的单性生殖与遗传纯系分离[J]. 高技术通讯, 2007, 17(2): 205-210.
YAN X H, LI L, CHEN J H, et al. Parthenogenesis and isolation of genetic pure strains in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta) [J]. High Technology Letters, 2007, 17(2): 205-210.
- [17] MASSEY JR F J. The kolmogorov-smirnov test for goodness of fit [J]. Journal of the American Statistical Association, 1951, 46(253): 68-78.
- [18] KESTEVEN G L. The coefficient of variation [J]. Nature, 1946, 158(4015): 520-521.
- [19] KUMAR N, KUMAR P, BADAGABETTU S N, et al. Determination of spearman correlation coefficient (r) to evaluate the linear association of dermal collagen and elastic fibers in the perspectives of skin injury [J]. Dermatology Research and Practice, 2018, 2018: 4512840.
- [20] 姚志刚, 赵凤娟. 遗传学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
YAO Z G, ZHAO F J. Genetics [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [21] CHOO T M, REINBERGS E. Estimation of the number of genes in doubled haploid populations of barley (*Hordeum vulgare*) [J]. Canadian Journal of Genetics and Cytology, 1982, 24(3): 337-341.
- [22] ZOU C, WANG P X, XU Y B. Bulk sample analysis in genetics, genomics and crop improvement [J]. Plant Biotechnology Journal, 2016, 14(10): 1941-1955.
- [23] FARKHARI M, KRIVANEK A, XU Y B, et al. Root-lodging resistance in maize as an example for high-throughput genetic mapping via single nucleotide

- polymorphism-based selective genotyping [J]. *Plant Breeding*, 2013, 132(1): 90-98.
- [24] GU L C, LI C, AACH J, et al. Multiplex single-molecule interaction profiling of DNA-barcoded proteins [J]. *Nature*, 2014, 515(7528): 554-557.
- [25] 陈越, 丁明亮, 张敦宇, 等. 云南水稻种质资源农艺性状表型多样性分析及综合评价[J]. *南方农业学报*, 2019, 50(9): 1922-1930.
- CHEN Y, DING M L, ZHANG D Y, et al. Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of agronomic characters of rice germplasm resources in Yunnan Province [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(9): 1922-1930.
- [26] 陈湘瑜, 徐日荣, 陈昊, 等. 花生品系主要农艺性状的分析与综合评价[J]. *种子*, 2020, 39(9): 84-88.
- CHEN X Y, XU R R, CHEN H, et al. Analysis and comprehensive evaluation of main agronomic traits of peanut lines[J]. *Seed*, 2020, 39(9): 84-88.
- [27] 刘献, 郝再彬, 苍晶, 等. 大豆突变品系农艺性状鉴定与分析[J]. *大豆科学*, 2007, 26(4): 630-633.
- LIU X, HAO Z B, CANG J, et al. Analysis of agronomic characters in soybean mutants [J]. *Soybean Science*, 2007, 26(4): 630-633.
- [28] 赵龙, 葛平珍, 李腊梅, 等. 普通菜豆单株产量与农艺性状的相关性及通径分析[J]. *贵州农业科学*, 2022, 50(12): 18-24.
- ZHAO L, GE P Z, LI L M, et al. Path and correlation analysis between agronomic traits and yield per plant in common bean [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2022, 50(12): 18-24.
- [29] 陈家辉, 蔡磊, 余坤江. 甘蓝型油菜种质群体6个农艺性状变异及相关性分析[J]. *山地农业生物学报*, 2022, 41(5): 84-87.
- CHEN J H, CAI L, YU K J. Variation and correlation analysis of six agronomic traits in *Brassica napus* germplasm population [J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2022, 41(5): 84-87.
- [30] 陈传永, 赵久然, 吴珊珊, 等. 黄淮海夏玉米区南北部产量及相关性状差异分析[J]. *耕作与栽培*, 2022, 42(5): 42-46.
- CHEN C Y, ZHAO J R, WU S S, et al. Analysis on yield difference between south and north of Huanghuaihai summer maize region [J]. *Tillage and Cultivation*, 2022, 42(5): 42-46.
- [31] 陈珊宇, 张慧, 黄玉韬, 等. 油葵和食葵在浙江主要农艺性状差异和遗传分析[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(11): 3771-3785.
- CHEN S Y, ZHANG H, HUANG Y T, et al. Difference and genetic analysis of main agronomic characters between oil sunflower and edible sunflower in Zhejiang [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(11): 3771-3785.
- [32] 卢玉典, 丁洪昌, 严兴洪. 坛紫菜优良品系的品质分析[J]. *水产学报*, 2022, 46(8): 1466-1472.
- LU Y D, DING H C, YAN X H. Quality analysis of an improved strain of *Pyropia haitanensis* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(8): 1466-1472.
- [33] 宣仕芬, 朱煜康, 孙楠, 等. 不同采收期坛紫菜感官品质及蛋白组成分析[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(14): 291-296.
- XUAN S F, ZHU Y K, SUN N, et al. Sensory quality and protein composition analysis of *Porphyra haitanensis* in different harvest periods [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(14): 291-296.
- [34] 张婷婷, 骆其君, 陈娟娟, 等. 坛紫菜干品色差测定条件的优化研究[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(23): 213-220.
- ZHANG T T, LUO Q J, CHEN J J, et al. Study on optimization of the determination conditions of chromatic aberration of dried laver (*Pyropia haitanensis*) [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(23): 213-220.
- [35] 海燕, 何宁, 康明辉, 等. 小麦主要农艺性状的遗传分析[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(6): 168-171.
- HAI Y, HE N, KANG M H, et al. Genetic analysis of agronomic traits in wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(6): 168-171.
- [36] FUJIMAKI H, RALPH E. A study of genetic linkage relative to success in backcross breeding programs [J]. *Japanese Journal of Breeding*, 1977, 27(2): 105-115.

Correlation analysis of blade color with length, width and thickness in *Pyropia haitanensis*

QIU Yefan^{1,2}, DING Hongchang^{1,2}, TANG Longchen^{1,2}, YAN Xinghong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Aquaculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A doubled haploid (DH) population consisting of 240 strains of *Pyropia haitanensis* was constructed using the heterozygous filament derived from the cross between the wild-type strain (W, ♀) and the red mutant (R, ♂) in the experiment. The correlation of blade color with the five quantitative traits of length, width, blade thickness, protoplast size and cell wall thickness of gametophytic blades was subsequently analyzed. The results showed that the phenotypic values of the five traits were normally distributed in different color groups (the wild-type group and the red-type group). The variation coefficient of each trait ranged from 10.02% to 43.73%, and the variation coefficient of length was the largest. The phenotypic values of each trait showed significant differences among different color groups ($P < 0.01$). Compared with the wild-type group, the blades of red-type group had longer length, narrower width, thinner blade, smaller protoplast and thinner cell wall. The correlation degrees between color and each trait were ranked in the order of blade thickness > cell wall thickness > protoplast size > length > width. In addition, the heritability order of each trait was presented as length > protoplast size > blade thickness > cell wall thickness > width, and the heritability in the wild-type group was higher than that in the red-type group. The genes controlling the same economic trait were different in different color groups, and the genes controlling the length trait were the most different. This study provides reference for developing new varieties with compound economic traits in *P. haitanensis*.

Key words: *Pyropia haitanensis*; doubled haploid population; quantitative trait; genetic analysis