

余波,杨军,胡庆峰,等. 江苏省粳稻淀粉合成相关基因等位变异检测及其对稻米理化指标的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(18):87-91.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.18.014

# 江苏省粳稻淀粉合成相关基因等位变异检测 及其对稻米理化指标的影响

余波,杨军,胡庆峰,林添资,景德道,钱华飞,李闯,曾生元,孙立亭,杜灿灿,龚红兵  
(江苏丘陵地区镇江农业科学研究所,江苏句容 212400)

**摘要:**大量研究表明,稻米食味品质除受主效基因  $Wx$  控制外,还受其他稻米食味品质相关基因的影响。为了探明江苏省粳稻不同淀粉合成相关基因的遗传变异组合对稻米理化指标的影响,本研究利用分子标记对 203 份江苏省粳稻预试材料(2015 年)的 9 个淀粉合成相关基因的基因型进行检测,发现 9 个基因位点中仅  $Wx^{CT}$ 、 $SSIIIa$  这 2 个位点广泛存在 2 种类型的等位基因变异,其他 7 个位点只有 0~3 份粳稻含有不同类型的等位基因,在此基础上分别研究  $Wx^{CT}$ 、 $SSIIIa$  基因的遗传效应。研究发现来源于  $(CT)_{18}$  的等位基因可能有减少直链淀粉含量(AC)的效应,来源于  $SSIIIa^1$  的等位基因可能有减少直链淀粉含量、增加胶稠度(GC)的效应。进一步研究发现  $Wx^{CT}$ 、 $SSIIIa$  基因之间存在互作效应,且基因间互作效应的方向随基因来源不同而异。

**关键词:**食味品质;直链淀粉含量;胶稠度;糊化温度;基因;碱消值

**中图分类号:**S511.2<sup>+</sup>20.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)18-0087-05

随着人们生活水平的提高,人们对稻米食味品质的要求也越来越高,已不仅仅是饱腹,更重要的是营养健康,优质食味稻米的市场需求越来越大,优质食味水稻新品种的选育已成为我国水稻育种最重要的研究方向之一<sup>[1]</sup>。因此,从分子水平探究稻米食味品质形成的遗传学基础,明确水稻食味品

质基因的遗传效应,对优质食味水稻品种的选育具有重要的指导意义。

影响水稻蒸煮食味品质的 3 项重要指标分别是直链淀粉含量(AC)、胶稠度(GC)和糊化温度(GT)。一般认为具有低直链淀粉含量、高胶稠度、低糊化温度的稻米具有较好的蒸煮食味品质<sup>[2-4]</sup>。大量研究表明,稻米蒸煮食味品质除受主效基因  $Wx$  控制外,还受其他稻米食味品质相关基因的影响<sup>[5-6]</sup>。为了探明江苏省粳稻不同淀粉合成相关基因的基因型以及不同基因型组合对稻米品质形成的影响,本研究利用分子标记检测技术,在江苏省粳稻( $Wx^b$ )的遗传背景条件下,对 203 份江苏省粳

收稿日期:2021-11-19

基金项目:镇江市重点研发计划——现代农业(编号:NY2020012)。

作者简介:余波(1981—),男,江苏仪征人,硕士,副研究员,主要从事水稻新品种选育研究。E-mail:151685361@qq.com。

通信作者:龚红兵,研究员,主要从事水稻新品种选育研究。

E-mail:1179809265@qq.com。

berry (*Vitis vinifera* L.) and the proposed role of auxin conjugation during ripening [J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61 (13):3615-3625.

[25] Xie R, Pang S, Ma Y, et al. The *ARF*, *AUX/IAA* and *GH3* gene families in citrus: genome-wide identification and expression analysis during fruitlet drop from abscission zone A [J]. Molecular Genetics and Genomics, 2015, 290(6):2089-2105.

[26] Liu K D, Wang J X, Li H L, et al. Identification, expression and IAA-amide synthetase activity analysis of Gretchen Hagen 3 in papaya fruit (*Carica papaya* L.) during postharvest process [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7:1555.

[27] Gan Z Y, Fei L Y, Shan N, et al. Identification and expression analysis of Gretchen Hagen 3 (*GH3*) in Kiwifruit (*Actinidia*

*chinensis*) during postharvest process [J]. Plants, 2019, 8 (11):473.

[28] Jeong J, Park S, Im J H, et al. Genome-wide identification of *GH3* genes in *Brassica oleracea* and identification of a promoter region for anther-specific expression of a *GH3* gene [J]. BMC Genomics, 2021, 22(1):22.

[29] 谢小芳,黄勤怡,吴为人. 植物 *GH3* 基因家族的生物信息学分析 [J]. 基因组学与应用生物学, 2010, 29(5):829-837.

[30] Kumar R, Agarwal P, Tyagi A K, et al. Genome-wide investigation and expression analysis suggest diverse roles of auxin-responsive *GH3* genes during development and response to different stimuli in tomato (*Solanum lycopersicum*) [J]. Molecular Genetics and Genomics, 2012, 287(3):221-235.

稻预试材料(2015 年)的 9 个重要蒸煮食味品质相关位点进行了检测,包括 8 个基因编码区和 1 个  $Wx$  基因第 1 内含子上游 -1216 处(5' UTR)的 CT 重复数,并分析其中 2 个基因位点( $Wx^{CT}$ 、 $SSIIIa$ )的基因型及其组合对稻米蒸煮食味品质形成的影响,期望为稻米蒸煮食味品质改良提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2015 年参加江苏省粳稻预备试验的 203 个品系(直链淀粉含量大于 14%),其中中熟中粳稻 75 份,迟熟中粳稻 86 份,早熟晚粳稻 42 份。

表 1 蒸煮食味品质相关基因分子标记

基因	引物序列(5'→3')	标记来源	基因效应
$Wx^{CT}$	F:CTTTGTCTATCTCAAGACAC R:TTGCAGATGTTCTTCTCTGATG	Bligh 等 <sup>[7]</sup>	在 $Wx$ 核苷酸序列中发现了一段(CT) <sub>n</sub> 微卫星序列,CT 序列的重复数与稻米直链淀粉含量呈负相关 <sup>[7]</sup>
$SSIIa$	F:CCAATACCGTAAACTAGCGACTATG R:TACAGGTAGAATGGCACTGGTG	田志喜等 <sup>[8]</sup>	影响糊化温度的主效基因,对直链淀粉含量、胶稠度具有微效作用 <sup>[5]</sup>
$SSIIIa$	F:GAACTTGTGCCTTAAGCTGACTG R:GGAATAGTAAGCCGAAGGACTT	田志喜等 <sup>[8]</sup>	对稻米直链淀粉的合成具有微效作用 <sup>[5]</sup>
$AGPIso$	F:CAATCGCTGCCATCGGTTG R:TTCCACATCGTTAGGTACAG	田志喜等 <sup>[8]</sup>	影响胶稠度的微效基因 <sup>[5]</sup>
$AGPlar$	F:CGTTCAGGTTTCAAGCAATCA R:GGAAGGTTGGTGTATGTGGAG	田志喜等 <sup>[8]</sup>	对稻米直链淀粉合成具有微效作用 <sup>[5]</sup>
$SSI$	F:CTTCTATCCATTCTTAATCCCA R:ATGCTATTTGATGTTAAGAGGGC	田志喜等 <sup>[8]</sup>	对稻米直链淀粉合成具有微效作用 <sup>[5]</sup>
$SSIV-2$	F:TTCCCTTGGTGGTGCCTG R:TAAAGCGTTCCGACAGTA	田志喜等 <sup>[8]</sup>	影响糊化温度的微效基因 <sup>[5]</sup>
$ISA$	F:ATAGATGCTAATGTGATGTGGC R:TGGTATAGGCACAACCGTAGA	田志喜等 <sup>[8]</sup>	影响胶稠度和糊化温度的微效基因 <sup>[5]</sup>
$PUL$	F:AGAGAAGGAGAAAGAAGTGGAGAC R:GTCCAAACTGAATCACTCAATCG	田志喜等 <sup>[8]</sup>	对稻米直链淀粉合成具有微效作用 <sup>[5]</sup>

1.2.3 DNA 的提取与 PCR 的扩增 所有水稻材料取分蘖盛期幼嫩叶片,利用十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)法进行基因组 DNA 的提取<sup>[9]</sup>。PCR 扩增体系包括 1 μL 10 × 缓冲液,0.2 μL 25 mmol/L dNTPs,2 μL 2 pmol/μL 引物,1 μL 5 U/μL *Taq* 酶,1 μL 模板 DNA,去离子水 4.8 μL。PCR 反应程序:94 ℃ 5 min;94 ℃ 30 s,55 ℃ 30 s,72 ℃ 40 s,34 个循环;72 ℃ 10 min;10 ℃ 保存<sup>[3-4]</sup>。PCR 产物由 6% 聚丙烯酰胺凝胶电泳检测鉴定。

1.2.4 数据分析 研究所得数据采用常用统计软件 SPSS 进行方差分析。

1.2 方法

1.2.1 食味品质数理化数据检测 按农业农村部(原农业部)标准 NY 147—1988《米质测定方法》测定稻米直链淀粉含量、胶稠度和碱消值(ASV)。检测结果来源于 2015 年江苏省区试汇总总结。

1.2.2 分子标记的选择 参考前人报道<sup>[7-8]</sup>,选取与水稻食味品质相关的 9 个基因( $Wx^{CT}$ 、 $SSIIa$ 、 $SSIIIa$ 、 $AGPIso$ 、 $SSIV-2$ 、 $ISA$ 、 $AGPlar$ 、 $SSI$ 、 $PUL$ )及其相应的分子标记用于试验材料基因型的多态性分析(表 1)。相关引物由南京金斯瑞生物科技股份有限公司合成。

2 结果与分析

2.1 江苏省粳稻蒸煮食味品质相关位点的基因型分析

如表 2 所示,203 份试验材料中, $SSIV-2$ 、 $SSI$  仅存在 1 种类型的等位基因, $SSIIa$ 、 $AGPIso$ 、 $AGPlar$ 、 $ISA$ 、 $PUL$  只有 1~3 份材料含有不同基因型的等位基因。导致这一现象的原因可能有 2 个,第 1 个原因可能是在品质选育方面,江苏育成的粳稻基因相对保守,序列变异性较低,相似度较高;第 2 个原因可能是用于检测  $SSIV-2$ 、 $SSI$ 、 $SSIIa$ 、 $AGPIso$ 、

*AGPlar*、*ISA*、*PUL* 的分子标记还不足以区分相关基因等位变异。

表 2 江苏粳稻食味品质相关位点的基因型分析					
位点	基因型	扩增片段 (bp)	品系数(份)		
			中熟中梗	迟熟中梗	早熟晚梗
<i>W<sub>x</sub></i>	(CT) <sub>17</sub>		39	72	32
	(CT) <sub>18</sub>		35	14	10
	(CT) <sub>17</sub> /(CT) <sub>18</sub>		1	0	0
<i>SSIIa</i>	I	90	75	86	41
	II	81	0	0	1
<i>SSIIIa</i>	I	177	58	53	33
	II	197	17	31	9
	III	177/197	0	2	0
<i>AGPiso</i>	I	98	74	86	40
	II	93	1	0	2
<i>SSIV-2</i>	I	222	75	86	42
<i>SSI</i>	I	76	75	86	42
<i>AGPlar</i>	I	119	75	86	41
	II	116	0	0	1
<i>ISA</i>	I	136	74	86	42
	II	126	1	0	0
<i>PUL</i>	I	128	74	86	42
	II	115	1	0	0

2.2 江苏省粳稻直链淀粉含量、胶稠度、碱消值的变异

由表 3 可见,75 份中熟中梗粳稻材料 AC 分布在 14.6%~19.0% 之间,平均值为 16.60%,变异系数为 5.54%;GC 分布在 50.00~89.00 mm 之间,平均值为 66.44 mm,变异系数为 13.04%;ASV 分布在 3.00~7.00 级之间,平均值为 6.07 级,变异系数为 12.83%。86 份迟熟中梗常规粳稻品系的 AC 分布在 14.60%~19.90% 之间,平均值为 16.77%,变异系数为 7.11%;GC 分布在 52.00~83.00 mm 之间,平均值为 69.99 mm,变异系数为 9.89%;ASV 分布在 3.00~7.00 级之间,均值为 6.39 级,变异系数为 8.39%。42 份早熟晚梗常规粳稻品系的 AC 分布在 15.60%~20.00% 之间,平均值为 17.89%,变异系数为 5.19%;GC 分布在 50.00~80.00 mm 之间,平均值为 64.07 mm,变异系数为 11.02%;ASV 分布在 3.20~7.00 级之间,平均值为 6.39 级,变异系数为 9.69%。

2.3 不同等位基因在蒸煮食味品质形成中的效应分析

2.3.1 *W<sub>x</sub><sup>CT</sup>* 位点不同等位基因对直链淀粉含量的

表 3 203 份参试材料食味品质的统计参数				
类型	项目	直链淀粉含量(%)	胶稠度(mm)	碱消值(级)
中熟中梗	最小值	14.60	50.00	3.00
	最大值	19.00	89.00	7.00
	平均值	16.60	66.44	6.07
	标准差	0.92	8.67	0.78
	变异系数(%)	5.54	13.04	12.83
迟熟中梗	最小值	14.60	52.00	3.00
	最大值	19.90	83.00	7.00
	平均值	16.77	69.99	6.39
	标准差	1.19	6.92	0.54
早熟晚梗	变异系数(%)	7.11	9.89	8.39
	最小值	15.60	50.00	3.20
	最大值	20.00	80.00	7.00
	平均值	17.89	64.07	6.39
	标准差	0.93	7.06	0.62
	变异系数(%)	5.19	11.02	9.69

注:糊化温度一般用碱消值表示,ASV 与 GT 呈负相关。

影响 来源于 (CT)<sub>18</sub> 的等位基因有减少 AC 的效应(表 4)。*W<sub>x</sub><sup>CT</sup>* 位点对不同生态型参试材料的 AC 效应一致,而 GC、ASV 的效应有所不同,可能该位点与 GC、ASV 指标不相关。来源于 (CT)<sub>18</sub> 的等位基因使中熟中梗、迟熟中梗和早熟晚梗的直链淀粉含量分别降低了 0.43 百分点,差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )、0.23 百分点(差异不显著)、0.02 百分点(差异不显著)。(CT)<sub>18</sub> 对不同生态型参试材料的 AC 基因效应大小不同,但方向一致。

表 4 <i>W<sub>x</sub><sup>CT</sup></i> 位点不同等位基因对蒸煮食味品质的影响					
类型	基因型	品系数(份)	直链淀粉含量(%)	胶稠度(mm)	碱消值(级)
中熟中梗	(CT) <sub>17</sub>	39	16.81a	67.21a	6.22a
	(CT) <sub>18</sub>	35	16.38b	65.77a	5.90a
迟熟中梗	(CT) <sub>17</sub>	72	16.81a	70.13a	6.35a
	(CT) <sub>18</sub>	14	16.58a	69.29a	6.61a
早熟晚梗	(CT) <sub>17</sub>	32	17.90a	63.25a	6.37a
	(CT) <sub>18</sub>	10	17.88a	66.70a	6.45a

注:相同类型同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下表同。

2.3.2 *SSIIIa* 位点不同等位基因对直链淀粉含量的影响 *SSIIIa* 对稻米直链淀粉的合成具有微效作用,来源于 *SSIIIa*<sup>1</sup> 的等位基因有减少 AC 的作用(表 5)。*SSIIIa*<sup>1</sup> 等位基因对 3 种生态型参试材料的基因效应方向一致,使中熟中梗、迟熟中梗和早熟

晚粳的直链淀粉含量分别降低了 0.08、0.17、0.14 百分点,但差异均未达显著水平。

2.3.3 *SSIIIa* 位点不同等位基因对胶稠度的影响  
来源于 *SSIIIa*<sup>1</sup> 的等位基因有增加 GC 的作用(表 5)。*SSIIIa*<sup>1</sup> 等位基因对 3 种生态型粳稻材料的基因效应方向一致,使参试材料中的迟熟中粳和早熟晚粳胶稠度分别增加 3.15、8.15 mm,差异达显著水平( $P < 0.05$ )。*SSIIIa*<sup>1</sup> 胶稠度高于 *SSIIIa*<sup>2</sup>,且早熟晚粳基因效应最强,差异达到极显著水平( $P < 0.01$ )。

表 5 *SSIIIa* 位点不同等位基因对蒸煮食味品质的影响

类型	基因型	品系数 (份)	直链淀粉 含量(%)	胶稠度 (mm)	碱消值 (级)
中熟中粳	<i>SSIIIa</i> <sup>1</sup>	58	16.58a	67.43a	6.03a
	<i>SSIIIa</i> <sup>2</sup>	17	16.66a	63.06a	6.18a
迟熟中粳	<i>SSIIIa</i> <sup>1</sup>	53	16.72a	71.15a	6.39a
	<i>SSIIIa</i> <sup>2</sup>	31	16.89a	68.00b	6.40a
早熟晚粳	<i>SSIIIa</i> <sup>1</sup>	33	17.86a	65.82a	6.37a
	<i>SSIIIa</i> <sup>2</sup>	9	18.00a	57.67b	6.46a

2.3.4  $Wx^{CT}$ 、*SSIIIa* 间的互作效应对直链淀粉含量的影响  
对比 (CT)<sub>17</sub> *SSIIIa*<sup>1</sup>、(CT)<sub>17</sub> *SSIIIa*<sup>2</sup>、(CT)<sub>18</sub> *SSIIIa*<sup>1</sup>、(CT)<sub>18</sub> *SSIIIa*<sup>2</sup> 等 4 种基因型组合粳稻直链淀粉含量的差异,分析  $Wx^{CT}$ 、*SSIIIa* 间的互作效应对直链淀粉含量的影响(表 6)。在具有 (CT)<sub>18</sub> 基因型情况下,*SSIIIa*<sup>1</sup> 基因型的遗传效应与 *SSIIIa*<sup>2</sup> 相比,直链淀粉含量中熟中粳、迟熟中粳和早熟晚

粳分别降低了 0.47、0.56、0.17 百分点;在具有 *SSIIIa*<sup>1</sup> 基因型情况下,(CT)<sub>18</sub> 基因型遗传效应与 (CT)<sub>17</sub> 相比,直链淀粉含量中熟中粳、迟熟中粳和早熟晚粳分别降低了 0.57、0.45、0.04 百分点。相反,在具有 (CT)<sub>17</sub> 基因情况下,*SSIIIa*<sup>1</sup> 基因的遗传效应与 *SSIIIa*<sup>2</sup> 相比,直链淀粉含量中熟中粳增加了 0.21 百分点,迟熟中粳、早熟晚粳分别减少了 0.05、0.13 百分点;在具有 *SSIIIa*<sup>2</sup> 基因型情况下,(CT)<sub>18</sub> 基因型的遗传效应与 (CT)<sub>17</sub> 相比,中熟中粳、迟熟中粳直链淀粉含量分别增加了 0.11、0.06 百分点。互作效应的方向及效果随基因来源不同而不同,在早熟晚粳中的互作效应要明显小于在中熟中粳和迟熟中粳中的互作效应。

2.3.5  $Wx^{CT}$ 、*SSIIIa* 间的互作效应对胶稠度的影响  
对比 (CT)<sub>17</sub> *SSIIIa*<sup>1</sup>、(CT)<sub>17</sub> *SSIIIa*<sup>2</sup>、(CT)<sub>18</sub> *SSIIIa*<sup>1</sup>、(CT)<sub>18</sub> *SSIIIa*<sup>2</sup> 等 4 种基因型组合粳稻胶稠度的差异,分析  $Wx^{CT}$ 、*SSIIIa* 间的互作效应对胶稠度的影响(表 6)。在具有 (CT)<sub>17</sub> 基因型情况下,*SSIIIa*<sup>1</sup> 基因的遗传效应与 *SSIIIa*<sup>2</sup> 相比,中熟中粳、迟熟中粳和早熟晚粳胶稠度分别增加 3.23、2.75、7.69 mm,其中早熟晚粳差异达显著水平;在具有 (CT)<sub>18</sub> 基因型情况下,*SSIIIa*<sup>1</sup> 基因型的遗传效应与 *SSIIIa*<sup>2</sup> 相比,中熟中粳、迟熟中粳和早熟晚粳胶稠度分别增加 6.16、4.30、11.00 mm,其中早熟晚粳差异达显著水平。在具有 (CT)<sub>18</sub> 基因型情况下,*SSIIIa*<sup>1</sup> 基因型的遗传效应得以加强,在具有 (CT)<sub>17</sub> 基因型情况下,*SSIIIa*<sup>1</sup> 基因的遗传效应较弱。

表 6  $Wx^{CT}$ 、*SSIIIa* 间的互作效应对稻米蒸煮食味品质的影响

类型	基因型	基因型	品系数 (份)	直链淀粉含量 (%)	胶稠度 (mm)	碱消值 (级)
中熟中粳	(CT) <sub>17</sub>	<i>SSIIIa</i> <sup>1</sup>	29	16.87a	68.03a	6.26a
	(CT) <sub>17</sub>	<i>SSIIIa</i> <sup>2</sup>	10	16.66a	64.80ab	6.10a
	(CT) <sub>18</sub>	<i>SSIIIa</i> <sup>1</sup>	29	16.30a	66.83ab	5.81a
	(CT) <sub>18</sub>	<i>SSIIIa</i> <sup>2</sup>	6	16.77a	60.67b	6.35a
迟熟中粳	(CT) <sub>17</sub>	<i>SSIIIa</i> <sup>1</sup>	45	16.79a	71.16a	6.37a
	(CT) <sub>17</sub>	<i>SSIIIa</i> <sup>2</sup>	25	16.84a	68.41a	6.33a
	(CT) <sub>18</sub>	<i>SSIIIa</i> <sup>1</sup>	8	16.34a	71.13a	6.55a
	(CT) <sub>18</sub>	<i>SSIIIa</i> <sup>2</sup>	6	16.90a	66.83a	6.68a
早熟晚粳	(CT) <sub>17</sub>	<i>SSIIIa</i> <sup>1</sup>	26	17.87a	64.69ab	6.33a
	(CT) <sub>17</sub>	<i>SSIIIa</i> <sup>2</sup>	6	18.00a	57.00c	6.55a
	(CT) <sub>18</sub>	<i>SSIIIa</i> <sup>1</sup>	7	17.83a	70.00a	6.53a
	(CT) <sub>18</sub>	<i>SSIIIa</i> <sup>2</sup>	3	18.00a	59.00bc	6.27a

### 3 结论与讨论

选育具有较低直链淀粉含量、较高胶稠度及较低糊化温度的优质食味水稻,对提高我国优质食味水稻新品种在国际市场上的地位具有十分重要的意义<sup>[4,10]</sup>。目前,水稻食味品质育种研究已经取得了一定进展,确定了某些基因与稻米食味品质的关系,使得优质食味基因聚合到同一植株成为可能。然而这些基因都是在特定亲本中发现的,并不能直接应用到江苏省主栽品种中,加上品质性状遗传调控机理十分复杂,如一因多效<sup>[5]</sup>、多因一效<sup>[5]</sup>、基因互作<sup>[11-14]</sup>、调控基因以及修饰基因等作用,往往使得个体的基因型与表现型之间存在较大差异。除了遗传因素,环境条件也会对稻米食味品质产生巨大影响<sup>[15-18]</sup>,大大影响分子标记在品质育种中的成效。

就淀粉合成相关基因而言,江苏省粳稻资源的遗传多样性可能偏低,本研究对 203 份江苏省粳稻预试材料(2015 年)的 9 个重要蒸煮食味品质相关位点进行了检测,仅  $Wx^{CT}$ 、 $SSIIIa$  这 2 个位点广泛存在 2 种类型的等位基因变异,其他 7 个位点只有 0~3 份粳稻含有不同类型的等位基因。因此江苏省的水稻品质育种要想拓宽遗传基础,应该注重野生品种、地方品种、国外品种资源的引进与利用,加强水稻优质等位基因的挖掘与利用,提高优质食味水稻选择效率,进一步提高江苏省粳稻的品质育种。

在江苏省粳稻品种中, $Wx^{CT}$ 、 $SSIIIa$  基因位点上广泛存在 2 种类型的等位基因。在  $Wx^{CT}$ 、 $SSIIIa$  这 2 个位点的等位基因以  $(CT)_{17}$ 、 $SSIIIa^I$  基因型为主,但从 AC/GC 的角度而言,最优的基因组合可能是  $(CT)_{18}$ 、 $SSIIIa^I$ 。通过对比 3 种生育期类型的粳稻,发现  $Wx^{CT}$  位点在早熟品种中具有较强的基因效应(降低 AC); $SSIIIa$  位点在晚熟品种中具有较强的基因效应(增加 GC),可能是由于不同熟期的粳稻在不同生态环境条件下,基因效应的强弱不同所致。

#### 参考文献:

- [1] Zeng D L, Tian Z X, Rao Y C, et al. Rational design of high-yield and superior-quality rice[J]. Nature Plants, 2017, 3: 17031.
- [2] Little R, Hilder G B, Dawson E. Differential effect of dilute alkali on 25 varieties of milled white rice[J]. Cereal Chemistry, 1958, 35:

111-126.

- [3] 谢米雪,郭亮,窦兰兰,等. 利用分子标记分析 22 种上海市重要水稻 10 个食味品质相关基因的基因型[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2013, 42(4): 384-391.
- [4] 黄菊,许言福,谢米雪,等. 分子标记分析二十三种香型水稻十个食味品质相关基因的基因型[J]. 植物分类与资源学报, 2014, 36(3): 381-387.
- [5] Tian Z X, Qian Q, Liu Q Q, et al. Allelic diversities in rice starch biosynthesis lead to a diverse array of rice eating and cooking qualities[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(51): 21760-21765.
- [6] Nakamura Y. Towards a better understanding of the metabolic system for amylopectin biosynthesis in plants: rice endosperm as a model tissue[J]. Plant and Cell Physiology, 2002, 43(7): 718-725.
- [7] Bligh H F J, Till R I, Jones C A. A microsatellite sequence closely linked to the *Waxy* gene of *Oryza sativa*[J]. Euphytica, 1995, 86(2): 83-85.
- [8] 田志喜,严长杰,钱前,等. 水稻淀粉合成相关基因分子标记的建立[J]. 科学通报, 2010, 55(26): 2591-2601.
- [9] Murray M G, Thompson W F. Rapid isolation of high molecular weight plant DNA[J]. Nucleic Acids Research, 1980, 8(19): 4321-4325.
- [10] 路凯,赵庆勇,周丽慧,等. 稻米蛋白质含量与食味品质的关系及其影响因素研究进展[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1305-1311.
- [11] He Y, Han Y P, Jiang L, et al. Functional analysis of starch-synthesis genes in determining rice eating and cooking qualities[J]. Molecular Breeding, 2006, 18(4): 277-290.
- [12] 杨博文,向珣朝,许顺菊,等. 回交重组自交系中  $SSI$ 、 $SSIII$  和  $PUL$  不同等位基因互作对稻米蒸煮食味品质的影响[J]. 农业生物技术学报, 2017, 25(10): 1566-1574.
- [13] 姚妹,张亚东,刘燕清,等.  $Wx^{mp}$  基因背景下可溶性淀粉合成酶基因  $SSIIa$  和去分支酶基因  $PUL$  对水稻蒸煮食味品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(3): 217-227.
- [14] 姚妹,张亚东,刘燕清,等. 水稻  $Wx^{mp}$  背景下  $SSIIa$  和  $SSIIIa$  等位变异及其互作对蒸煮食味品质的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(11): 1690-1702.
- [15] 曹栋栋,吴华平,秦叶波,等. 优质稻生产、加工及贮藏技术研究概述[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(10): 1716-1718.
- [16] 王忠,顾蕴洁,陈刚,等. 稻米的品质和影响因素[J]. 分子植物育种, 2003, 1(2): 231-241.
- [17] Xu Y J, Ying Y N, Ou-Yang S H, et al. Factors affecting sensory quality of cooked Japonica rice[J]. Rice Science, 2018, 25(6): 330-339.
- [18] Champagne E T, Bett-Garber K L, Fitzgerald M A, et al. Important sensory properties differentiating premium rice varieties[J]. Rice, 2010, 3(4): 270-281.