

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.92043

江苏和东北粳稻稻米理化特性及 *Wx* 和 *OsSSIIa* 基因序列分析

赵春芳 岳红亮 田 铮 顾明超 赵 凌 赵庆勇 朱 镇
陈 涛 周丽慧 姚 姝 梁文化 路 凯 张亚东 王才林*

江苏省农业科学院粮食作物研究所 / 江苏省优质水稻工程技术研究中心 / 国家水稻改良中心南京分中心, 江苏南京 210014

摘要: 依据地理来源和直链淀粉含量将 87 份供试粳稻品种(系)划分为江苏普通粳稻、东北粳稻和江苏半糯粳稻 3 种类型, 系统比较了稻米理化性状及淀粉合成主效基因 *Wx* 和 *OsSSIIa* 序列的差异, 以探究其食味品质特征及其形成的分子基础。与东北粳稻相比, 江苏普通粳稻的直链淀粉含量偏低, 蛋白质含量和糊化温度偏高, 而胶稠度和 RVA 谱特征值相当。与江苏普通粳稻和东北粳稻相比, 江苏半糯粳稻具有较低的直链淀粉含量、较大的胶稠度及独特的 RVA 谱特征。大多数性状变异系数在 3 种类型粳稻中均较小, 仅消减值变异系数较大, 说明品种(系)间的稻米回生性存在较大差异而其他性状较为一致。各性状间的相关性在 3 种类型粳稻中表现不尽相同, 说明地理来源和品种特性影响食味品质性状间的相关程度。聚类分析将 87 份粳稻分为 4 个类群, 江苏普通粳稻与东北粳稻主要分布于类群 I 和 II, 且品种间相互交错; 类群 III 由 2 个江苏普通粳稻品系和 1 个江苏半糯粳稻(徐稻 9 号)组成, 多数性状值位于普通粳稻与半糯粳稻之间; 类群 IV 中均为江苏半糯粳稻。序列分析表明江苏普通粳稻和东北粳稻中 *Wx^b* 基因无序列差异, 而江苏半糯粳稻在 *Wx^b* 第 4 外显子上发生 G/A 替换, 属 *Wx^{mp}* 等位基因型; 江苏省部分粳稻品种(系)携带 *OsSSIIa(G-GC)* 等位基因, 从而导致高糊化温度。

关键词: 粳稻; 食味品质; 低直链淀粉含量; *Wx*; *OsSSIIa*

Physicochemical properties and sequence analysis of *Wx* and *OsSSIIa* genes in *japonica* rice cultivars from Jiangsu province and northeast of China

ZHAO Chun-Fang, YUE Hong-Liang, TIAN Zheng, GU Ming-Chao, ZHAO Ling, ZHAO Qing-Yong, ZHU Zhen, CHEN Tao, ZHOU Li-Hui, YAO Shu, LIANG Wen-Hua, LU Kai, ZHANG Ya-Dong, and WANG Cai-Lin*

Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences / Jiangsu High Quality Rice Research and Development Center / Nanjing Branch of China National Center for Rice Improvement, Nanjing 210014, Jiangsu, China

Abstract: According to geographic origin and amylose content, 87 investigated *japonica* rice cultivars were divided into three types: Jiangsu common *japonica* rice, Northeast *japonica* rice and Jiangsu semi-waxy *japonica* rice. In order to explore the eating quality characteristics of the three types of *japonica* rice and their molecular basis, the physicochemical properties and the sequence of major genes *Wx* and *OsSSIIa* for starch synthesis were analyzed. Compared with Northeast *japonica* rice, Jiangsu common *japonica* rice had lower amylose content, higher protein content and gelatinization temperature, and similar gel consistency and RVA profiles. Compared with Northeast *japonica* rice and Jiangsu common *japonica* rice, Jiangsu semi-waxy *japonica* rice contained the lowest amylose content, the highest gel consistency and unique RVA profile. Variation coefficients of all char-

本研究由江苏省自然科学基金项目(BK20180302), 江苏省农业科技自主创新资金(CX[18]1001), 江苏省重点研发计划项目(BE2018357), 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01-62)和江苏省重点生物实验室项目(4911707Z201705)资助。

This study was supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20180302), the Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund (CX[18]1001), the Key Research and Development Programs of Jiangsu Province (BE2018357), the China Agriculture Research System (CARS-01-62), and the Provincial Key Laboratory of Agrobiology Jiangsu Academy of Agricultural Sciences (4911707Z201705).

* 通信作者(Corresponding author): 王才林, E-mail: clwang@jaas.ac.cn

第一作者联系方式: E-mail: czhao@jaas.ac.cn

Received (收稿日期): 2019-08-13; Accepted (接受日期): 2020-01-15; Published online (网络出版日期): 2020-01-23.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200123.1453.008.html>

acters except for setback value were small in three types of rice varieties, indicating that there was a great range of retrogradation within all the cultivars. The correlation coefficients among traits were different among three types of *japonica* rice, which indicated that the correlations were affected by the ecological conditions of different regions and properties of varieties. By cluster analysis, 87 *japonica* rice varieties (lines) were divided into four groups. Jiangsu common and Northeast *japonica* rice varieties (lines) were intersected in group I and group II. Group III was composed of two lines of Jiangsu common *japonica* rice and one semi-waxy variety (Xudao 9), and the most of their character values were ranged between those common *japonica* rice and semi-waxy *japonica* rice. The Jiangsu semi-waxy rice varieties (lines) with unique physicochemical characteristics were clustered into group IV. By sequence analysis, there was no difference in *Wx^b* gene between Jiangsu common *japonica* rice and Northeast *japonica* rice, but in Jiangsu semi-waxy *japonica* rice G/A substitution occurred in Exon 4 of *Wx^b*, which is the *Wx^{mp}* allele. The higher gelatinization temperature in some of Jiangsu *japonica* rice varieties (lines) was controlled by the allele of *OsSIIa* (*G-GC*).

Keywords: *japonica* rice; eating quality; low amylose content; *Wx*; *OsSIIa*

随着经济发展和生活水平提高,人们对主食稻米的需求正由温饱型向食味型和品质型转变,食味品质成为决定稻米品质的核心因素^[1]。目前我国稻米食味品质主要依据人工品尝直接评价,或者通过直链淀粉含量(amylose content, AC)、胶稠度(gel consistence, GC)、糊化温度(gelatinization temperature, GT)等理化指标间接判定。前者需要组织经过培训的很多人员进行感官试验,操作复杂并存在主观性,不适用于对批量样品的分析。长期以来一直将后者作为衡量稻米食味品质的重要指标和育种材料品质筛选的主要手段^[2]。除了AC、GC、GT等理化指标,RVA谱特征值反映淀粉在水中因加热和冷却而发生的黏度变化,模拟了米饭的蒸煮过程^[3],测定的峰值黏度、崩解值及消减值与感官品尝值有极高的相关性^[4-5],能够区分不同水稻品种蒸煮食味品质的优劣^[6]。

淀粉占精米胚乳干重的90%以上,其组成与结构是决定稻米食味品质的最重要因素。由蜡质基因(*Waxy*, *Wx*)编码的颗粒结合型淀粉合酶I(granule-bound starch synthase, GBSSI),主要负责直链淀粉的合成,该基因的不同等位变异型决定了稻米的直链淀粉含量^[7-8]。水稻支链淀粉的合成由可溶性淀粉合酶SSS催化合成,主要有8种同工型^[9],其中同工型 SIIa 在水稻胚乳中特异表达,对稻米蒸煮食味品质影响最大。可溶性淀粉合酶II基因 *OsSIIa*,亦被称为糊化温度控制基因 *ALK*^[10],主要负责将支链淀粉的短支链(A+B1)合成至中等长度的分支链(B2+B3)。该基因也存在多种等位变异型,依据酶活性,可分为高酶活型和低酶活型,高酶活型主要存在于籼稻中,能合成较多的中等长度分支链,表现为高糊化温度;低酶活或酶活丧失型主要存在于粳稻中,表现为低糊化温度^[9]。*Wx* 和 *OsSIIa* 被认为是影响稻米蒸煮食味品质最重要的2个基因^[11]。

黑龙江、江苏、吉林、辽宁、云南、浙江、安徽是我国七大粳稻主产省,东北地区粳稻生产享有灌浆期温度较低、昼夜温差大等良好的自然条件,产出的稻米具有产量高、商品性好、食味品质优等优势^[12],而江苏省粳稻主要受高温影响,稻米外观品质及食味品质均较低^[13-14]。近年来江苏省水稻育种家们利用 *Wx* 突变型基因资源培育了一批直链淀粉含量介于粳稻和糯稻之间的粳稻品种(被称为半糯型粳稻)^[15-18],研究证实它们具有良好的食味品质特性^[19-20],但半糯粳稻与江苏普通粳稻及东北粳稻之间的食味品质性状差异尚不清楚,同时比较3种类型粳稻的研究不多。本研究比较分析了3种类型粳稻间的稻米食味品质理化指标与RVA谱特征值的差异,研究了各性状值间的相关性及相似程度,并探讨了AC和GT差异的分子基础,旨在为江苏省粳稻的食味品质改良提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选用常规粳稻品种(系)87份,按地理来源分为江苏省粳稻和东北粳稻(黑龙江、吉林、辽宁三省培育),其中依据直链淀粉含量将江苏省粳稻分为江苏普通粳稻和江苏半糯粳稻。因此,87份供试粳稻材料分为3种类型,34份江苏普通粳稻品种(系),32份东北粳稻品种,21份江苏半糯粳稻品种(系),材料名称见表1。

1.2 试验设计

江苏省粳稻品种(系)(普通粳稻和半糯粳稻)2017年正季于江苏省农业科学院粮食作物研究所育种基地种植,每份材料5行,每行12株,株行距为16 cm×16 cm。试验田平整、土壤肥力中等均匀,采用水育秧、人工移栽,肥水管理同常规大田。同年由黑龙江、吉林、辽宁各培育单位当地种植东北粳

表 1 供试材料信息

Table 1 The information of materials used in this study

| 类型 Type | 份数 Number | 材料名称 Variety name |
|---|--------------|---|
| 江苏普通粳稻 Jiangsu common <i>japonica</i> rice | 34 | 武运 5020、武运 5051、淮稻 5 号、扬粳 3012、武运粳 32、武育粳 3 号、泗稻 16、泗稻 212、泗稻 301、连粳 16、江苏省农业科学院粮食作物研究所培育的普通粳稻品系 24 份 Wuyun 5020, Wuyun 5051, Huaidao 5, Yangjing 3012, Wuyunjing 32, Wuyujing 3, Sida 16, Sida 212, Sida 301, Lianjing 16, 24 breeding lines of common <i>japonica</i> rice bred by the Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences |
| 东北粳稻 Northeast <i>japonica</i> rice | 32 | 稻花香 2 号、龙洋 16、松粳 22、松粳 34、松香 2 号、五优稻 1 号、龙稻 16、龙稻 18、龙稻 25、龙稻 28、吉粳 113、吉粳 302、吉粳 303、吉粳 306、吉粳 511、吉粳 512、吉粳 526、吉粳 528、吉粳 803、吉粳 809、吉粳 81、吉粳 83、吉粳 88、吉农引 6 号、沈农 9903、长白 19、长白 20、昌粳 1 号、昌尹 1 号、辽粳 337、辽粳 399、铁粳 11 Daohuaxiang 2, Longyang 16, Songjing 22, Songjing 34, Songxiang 2, Wuyoudao 1, Longdao 16, Longdao 18, Longdao 25, Longdao 28, Jijing 113, Jijing 302, Jijing 303, Jijing 306, Jijing 511, Jijing 512, Jijing 526, Jijing 528, Jijing 803, Jijing 809, Jijing 81, Jijing 83, Jijing 88, Jinongyin 6, Shennong 9903, Changbai 19, Changbai 20, Changjing 1, Changyin 1, Liaojing 337, Liaojing 399, Tiejing 11 |
| 江苏半糯粳稻 Jiangsu semi-waxy <i>japonica</i> rice | 21 | 徐稻 9 号、宁粳 8 号、苏香粳 100、南粳 46、南粳 5055、南粳 9108、南粳 2728、南粳 505、南粳 3908、南粳 5718、南粳 58、南粳晶谷、江苏省农业科学院粮食作物研究所培育的半糯粳稻品系 9 份 Xudao 9, Ningjing 8, Suxiangjing 100, Nanjing 46, Nanjing 5055, Nanjing 9108, Nanjing 2728, Nanjing 505, Nanjing 3908, Nanjing 5718, Nanjing 58, Nanjing jinggu, 9 breeding lines of semi-waxy <i>japonica</i> rice bred by the Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences |

稻材料, 收获后提供稻谷。将试验材料于室温贮藏 3 个月, 待水分含量稳定至 14%~15%时研磨至精米。

1.3 试验方法

1.3.1 样品前处理 稻谷经砻谷机(SY88-TH, 韩国双龙)去壳出糙, 糙米经小型精米机(BLH-3120, 台州伯利恒)出精。用旋风式磨粉仪(CT193, FOSS, 瑞典)研磨成米粉, 过 100 目筛去除杂质, 获得的精米米粉用于理化品质相关性状的测定。

1.3.2 稻米理化指标 分别按照国家标准 GB/T 15683-2008《大米直链淀粉含量的测定》和 GB/T 22294-2008《粮油检验大米胶稠度的测定》测定直链淀粉含量(amylose content, AC)和胶稠度(gel consistency, GC)。米粉经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 用全自动流动分析仪上测定含氮量, 再乘以换算系数 5.95 得到蛋白质含量(protein content, PC)。选用 RVA 仪测定糊化温度(gelatinization temperature, GT)。AC、GC 每个样品测定 3 次重复, GT 每个样品测定 2 次重复, 取平均值为性状值。

1.3.3 RVA 谱特征值 利用谷物黏度快速分析仪(Perten, 瑞典)测定 RVA 谱黏滞特性, 用配套软件 TWC 分析。参照美国谷物化学家协会 AACC61-01 和 61-02 操作规程设置参数。仪器测出的 RVA 参数包括峰值黏度(peak viscosity, PV)、热浆黏度(though viscosity, TV)、最终黏度(final viscosity, FV)、峰值

时间(peak time, Pet)、崩解值(breakdown viscosity, BDV)和消减值(setback viscosity, SBV)。每个样品重复测定 2 次, 取平均值为性状值。

1.3.4 淀粉合酶基因 *Wx* 和 *OsSIIa* 序列分析 分别在 *Wx* 基因上设计 4 对、在 *OsSIIa* 基因上设计 3 对有 100 bp 左右重叠区域的测序引物, 以选定品种的基因组 DNA 为模板, 进行 PCR 扩增、序列分析及基因全长序列拼接。利用 Oligo7.0 软件设计测序引物, 利用 SeqMan 软件执行序列拼接及多序列比对。*Wx* 等位基因第 4 外显子变异位点用陈涛等^[21]开发的受阻突变体系 PCR 扩增四引物检测, 通过测序分析第 5 外显子变异位点, 并以已报道的 Milky queen 中的 *Wx*^{mq} 序列为对照。所用的引物序列及 PCR 扩增片段长度见表 2。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 2016 处理数据和绘制图表, 用 SPSS17.0 软件进行 3 种类型粳稻间性状值的多重比较、差异显著性分析、相关性分析及聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同类型粳稻稻米理化性状间的差异

表 3 表明, 3 种类型粳稻中东北粳稻的 AC 最大, 江苏普通粳稻次之, 江苏半糯粳稻最小。PC 在 3 种类型粳稻中的表现与 AC 相反, 东北粳稻最小, 江苏

表2 试验所用引物的序列信息

Table 2 Sequence information of primers used in this study

| 引物名称 Primer | 引物序列 Primer sequence (5'-3') | 片段长度 Fragment length (bp) |
|----------------|---|------------------------------|
| | | |
| Wx-seq1 | F: GTGCCACCGTCGCAGGAGAAGAGATGT R: GGGGTGGTGGTGTGGGTGGCTATTGT | 1753 |
| Wx-seq2 | F: GGCTTCACGCAACGGCGCTACAAATAG R: CCATTGCGCTGCAAAGAACACAAGAAC | 1812 |
| Wx-seq3 | F: TCGTCGCTGACCGTCGTCGTTCAAC R: CGCAAGCACAGGGCTGGAGAAATCAAC | 2327 |
| Wx-seq4 | F: ACGGAACGGTATAACAATTCCATCTAT R: ACATAAATTCAAGGGTCCGATAAGATAC | 1096 |
| OsSIIa-seq1 | F: CGCGCACACACTCAAACCC R: ATCTAACAGCTGGAGTAGCCTT | 1573 |
| OsSIIa-seq2 | F: CAGGCCATACAATTAGGGAT R: TGTCCCTGCTCAATAATTACCAT | 1426 |
| OsSIIa-seq3 | F: AGTTCAGCAATTCTCCGTTT R: TCACATCATTCAAGACACGAG | 1614 |
| Wx-mp-O | F: ATGTTGTTCTTGTTCTTGCAGGC R: GTAGATCTCTCACCGGTCTTCCCCAA | 439/292/200 |
| Wx-mp-I | F: GGGTGAGGTTTTCCATTGCTACAATCG R: GTCGATGAACACACGGTCGACTCAAT | |

表3 3种类型粳稻米理化性状比较

Table 3 Comparison of physicochemical properties in three types of japonica rice cultivars

| 性状 Trait | 江苏普通粳稻 Jiangsu common japonica rice | | | | 东北粳稻 Northeast japonica rice | | | | 江苏半糯粳稻 Jiangsu semi-waxy japonica rice | | | |
|-------------|--|-------------|-------------|----------------|---------------------------------|-------------|-------------|----------------|---|-------------|-------------|----------------|
| | 均值 Mean | 最小值 Min. | 最大值 Max. | 变异系数 CV (%) | 均值 Mean | 最小值 Min. | 最大值 Max. | 变异系数 CV (%) | 均值 Mean | 最小值 Min. | 最大值 Max. | 变异系数 CV (%) |
| | | | | | | | | | | | | |
| AC (%) | 16.5 b | 14.2 | 18.9 | 7.8 | 19.0 a | 14.8 | 22.6 | 9.4 | 9.2 c | 7.5 | 11.0 | 10.3 |
| PC (%) | 9.0 a | 7.2 | 11.4 | 10.7 | 8.5 b | 6.4 | 10.9 | 12.8 | 9.2 a | 7.1 | 10.6 | 9.5 |
| GC (mm) | 68.8 b | 52.0 | 85.0 | 14.4 | 69.4 b | 58.5 | 86.5 | 10.2 | 84.2 a | 76.5 | 98.5 | 7.2 |
| GT (°C) | 73.4 a | 68.9 | 80.0 | 3.5 | 70.7 b | 67.3 | 74.5 | 2.2 | 73.2 a | 69.6 | 80.7 | 3.8 |
| PV (cP) | 2462.0 a | 1973.0 | 2944.0 | 10.5 | 2441.5 a | 1796.0 | 2946.0 | 9.5 | 2502.8 a | 1705.0 | 2953.0 | 15.0 |
| TV (cP) | 1560.4 a | 1210.0 | 1950.0 | 13.3 | 1586.1 a | 1110.0 | 2104.0 | 15.6 | 1261.8 b | 763.0 | 1765.0 | 22.4 |
| FV (cP) | 2602.4 a | 2135.0 | 3017.0 | 8.7 | 2634.9 a | 2015.0 | 3243.0 | 10.6 | 1823.0 b | 1229.0 | 2461.0 | 18.3 |
| BDV (cP) | 901.6 b | 586.0 | 1284.0 | 18.4 | 855.4 b | 479.0 | 1222.0 | 22.0 | 1241.0 a | 942.0 | 1683.0 | 16.5 |
| SBV (cP) | 140.4 a | -193.0 | 456.0 | 105.9 | 193.4 a | -212.0 | 471.0 | 86.5 | -679.9 b | -1269.0 | -334.0 | 36.5 |
| Pet (min) | 6.4 a | 6.1 | 6.7 | 2.6 | 6.5 a | 6.1 | 6.9 | 3.4 | 5.9 b | 5.2 | 6.3 | 5.1 |

AC: 直链淀粉含量; PC: 蛋白质含量; GC: 胶稠度; GT: 糊化温度; PV: 峰值黏度; TV: 热浆黏度; FV: 最终黏度; BDV: 崩解值; SBV: 消减值; Pet: 峰值时间。不同类型粳稻平均值后不同字母表示差异达 0.05 显著水平。

AC: amylose content; PC: protein content; GC: gel consistency; GT: gelatinization temperature; PV: peak viscosity; TV: though viscosity; FV: final viscosity; BDV: Breakdown viscosity; SBV: setback viscosity; Pet: peak time. Means within a column followed by different letters are significantly different at $P = 0.05$.

半糯粳稻最大。江苏半糯粳稻 GC 显著大于其余两种类型粳稻, 后两者间 GT 差异不显著, 江苏普通粳稻和江苏半糯粳稻的 GT 无显著差异, 但均显著高于东北粳稻。3 种类型粳稻在 AC、PC、GC、GT 上的变异系数均较小。在 RVA 谱特征值上, 峰值黏度 PV 在 3 种类型粳稻中无显著差异, 江苏半糯粳稻的 TV、FV、

SBV、Pet 特征值均显著低于其余 2 种类型粳稻, BDV 值则显著高于其余两种类型粳稻, 6 个 RVA 特征值在江苏普通粳稻和东北粳稻之间均无显著差异; 各 RVA 特征值中 SBV 的变异系数最大, 其余各特征值均较小, 其中 Pet 最小。图 1 为 6 个理化性状(AC、GC、GT、BDV、SBV 和 Pet)在 3 种类型粳稻中的频率分布图。

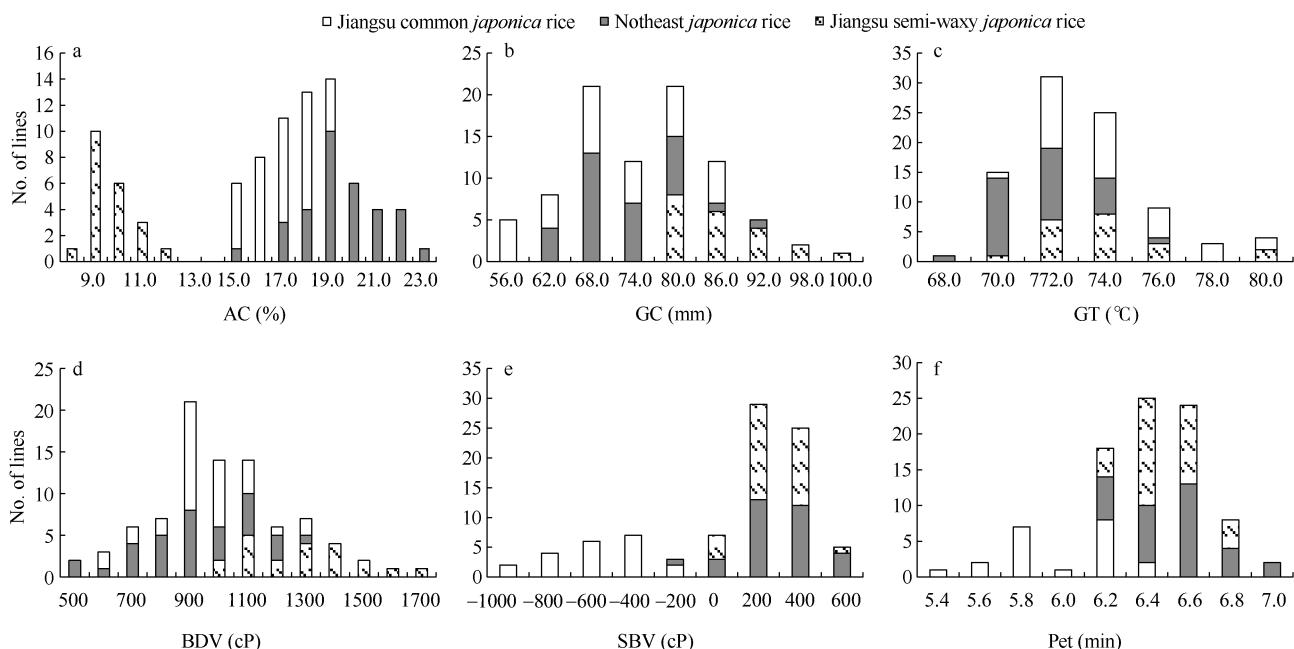


图 1 3 种类型粳稻理化性状的频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of physicochemical properties in three types of *japonica* rice

a: 直链淀粉含量; b: 胶稠度; c: 糊化温度; d: 崩解值; e: 消减值; f: 峰值时间。

a: amylose content; b: gel consistency; c: gelatinization temperature; d: breakdown viscosity; e: setback viscosity; f: peak time.

2.2 RVA 谱曲线的差异

从 3 种类型粳稻中分别选取 2 个代表性品种 (RVA 黏度值在平均值附近), 分析 RVA 谱特征值的变化趋势。如图 2 所示, 江苏普通粳稻(淮稻 5 号和泗稻 212)与东北粳稻(松梗 34 和吉梗 528)的 RVA 曲线相似, FV 与 PV 近似或高于 PV, 而江苏半糯粳稻(苏香粳 100 和南粳 2728)的 RVA 曲线显著异于其他二者, 具体表现为 Pet 提前, TV 较低, FV 显著低于 PV、介于 PV 和 TV 之间, 因而具有较高的 BDV 和较低的 SBV (表 3; 图 1-d, e)。

2.3 稻米理化性状间的相关性

AC 与 BDV、SBV、Pet 呈显著负或正相关性, 且

仅表现在江苏半糯粳稻和东北粳稻间, 在江苏普通粳稻中相关性不显著(表 4)。主要在江苏普通粳稻中检测到 PC 与 GC、GT、PV、HV、FV 间的相关性。GC 与所有性状均无相关性。GT 与 RVA 各特征值均有相关性, 其中仅在江苏普通粳稻和东北粳稻中 GT 与 PV、TV、FV 呈显著正相关性, 在江苏普通粳稻和半糯粳稻中 GT 与 BDV 和 SBV 分别呈正和负相关性。GT 与 Pet 在半糯粳稻中呈显著负相关而在东北粳稻中呈显著正相关。RVA 谱特征值两两性状间相关, 其中 3 种类型粳稻中 PV、TV、FV 两两之间均呈正相关, BDV 与 SBV 呈负相关, Pet 与 TV、FV、SBV 均呈正相关。仅在江苏普通粳稻和江苏半糯粳稻中 PV 与 BDV 呈正相关、与 SBV 呈负相关, PV 与 Pet 呈正相关、TV 与 BDV 呈负相关, 仅在东北粳稻中 SBV 与 TV 及 FV 呈正相关。

2.4 聚类分析

基于稻米理化性状, 87 个粳稻品种(系)可聚为 4 类群。第 I 类群包含 54 个品种(系), 由东北粳稻和江苏省农业科学院选育粳稻品系组成; 第 II 类群含 10 个品种, 主要为江苏省主栽粳稻品种, 还包括 3 个东北粳稻品种吉梗 81、五优稻 1 号和辽梗 399; 第 III 类群包含 3 个品种(系), 由 2 个江苏省农业科学院选育的粳稻品系和 1 个半糯粳稻(徐稻 9 号)组成; 第 IV 类群包含 20 个品种, 均为江苏半糯粳稻品种(系)(图 3)。

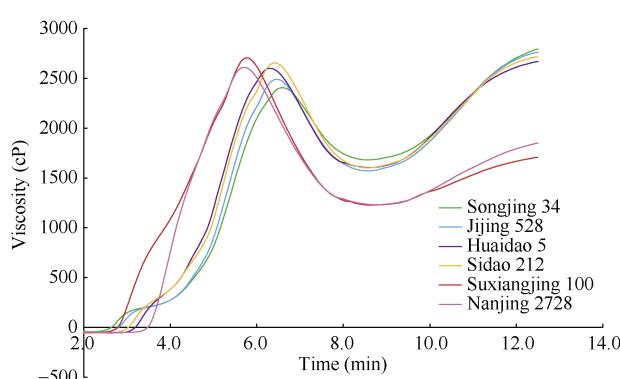


图 2 3 种类型粳稻的 RVA 谱曲线

Fig. 2 RVA profiles in three types of *japonica* rice

表4 3种类型粳稻稻米理化性状间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of physicochemical characters in three types of *japonica* rice

| 性状 Trait | 直链淀粉 含量 AC | 蛋白质含量 PC | 胶稠度 GC | 糊化温度 GT | 峰值黏度 PV | 热浆黏度 TV | 最终黏度 FV | 崩解值 BDV | 消减值 SBV |
|---------------|---------------|-------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 蛋白质 含量 PC | -0.054 | | | | | | | | |
| | 0.278 | | | | | | | | |
| | 0.061 | | | | | | | | |
| 直链淀粉 含量 GC | 0.307 | 0.343* | | | | | | | |
| | -0.081 | 0.097 | | | | | | | |
| | -0.204 | -0.036 | | | | | | | |
| 糊化温度 GT | -0.291 | 0.662** | -0.137 | | | | | | |
| | -0.176 | 0.336 | 0.296 | | | | | | |
| | -0.366 | 0.269 | 0.348 | | | | | | |
| 峰值黏度 PV | -0.089 | 0.427* | 0.268 | 0.693** | | | | | |
| | 0.046 | 0.251 | -0.047 | 0.455** | | | | | |
| | -0.056 | -0.187 | 0.111 | 0.123 | | | | | |
| 热浆黏度 TV | -0.228 | 0.433** | 0.295 | 0.470** | 0.768** | | | | |
| | 0.329 | 0.343 | 0.148 | 0.479** | 0.691** | | | | |
| | 0.240 | -0.146 | -0.036 | -0.234 | 0.842** | | | | |
| 最终黏度 FV | -0.159 | 0.334* | 0.267 | 0.408* | 0.820** | 0.938** | | | |
| | 0.285 | 0.389* | 0.068 | 0.404* | 0.803** | 0.906** | | | |
| | 0.400 | -0.165 | -0.072 | -0.323 | 0.761** | 0.972** | | | |
| 崩解值 BDV | 0.146 | 0.032 | 0.050 | 0.493** | 0.600** | -0.051 | 0.108 | | |
| | -0.375* | -0.153 | -0.252 | -0.070 | 0.321 | -0.463** | -0.203 | | |
| | -0.435* | -0.139 | 0.254 | 0.549** | 0.667** | 0.159 | 0.049 | | |
| 消减值 SBV | -0.088 | -0.239 | -0.060 | -0.584** | -0.492** | 0.090 | 0.095 | -0.880** | |
| | 0.414* | 0.303 | 0.179 | 0.047 | -0.039 | 0.562** | 0.565** | -0.784** | |
| | 0.625** | 0.057 | -0.265 | -0.622** | -0.487* | 0.036 | 0.196 | -0.942** | |
| 峰值时间 Pet | -0.162 | 0.311 | 0.223 | -0.003 | 0.129 | 0.678** | 0.526** | -0.647** | 0.576** |
| | 0.310 | 0.320 | 0.284 | 0.522** | 0.358* | 0.885** | 0.678** | -0.721** | 0.642** |
| | 0.551** | 0.045 | -0.305 | -0.635** | 0.157 | 0.645** | 0.708** | -0.604** | 0.717** |

第1行表示性状在江苏普通粳稻中的相关系数, 第2行表示在东北粳稻中的相关系数, 第3行表示在江苏半糯粳稻中的相关系数。*和**分别表示在0.05和0.01水平上的相关显著性。

The first row represents the correlation coefficient between traits in Jiangsu common *japonica* rice, the second row represents the correlation coefficient of Northeast *japonica*, and the third row represents the correlation coefficient in Jiangsu semi-waxy *japonica* rice. * and ** show the significant correlations at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. AC: amylose content; PC: protein content; GC: gel consistency; GT: gelatinization temperature; PV: peak viscosity; TV: though viscosity; FV: final viscosity; BDV: Breakdown viscosity; SBV: setback viscosity; Pet: peak time.

2.5 *Wx* 和 *OsSIIa* 基因序列差异分析

选取东北粳稻中吉粳512(AC: 22.57%)和松粳34(AC: 21.81%)、江苏普通粳稻中的泗稻212(AC: 18.21%)和淮稻5号(AC: 15.03%)、江苏半糯粳稻中的徐稻9号(AC: 10.71%)和宁粳8号(AC: 8.68%)等高、中、低AC的3组样品。经 *Wx* 基因扩增和序列分析表明, 2个东北粳稻品种和2个江苏普通粳稻品种的 *Wx* 基因序列完全一致, 而2个江苏半糯粳稻品

种在第4外显子上存在G/A单碱基变异(图4-a), 与江苏省农业科学院培育的南粳系列品种中 *Wx* 基因序列变异位点一致。基因型检测表明21个江苏半糯粳稻品种(系)均表现为突变基因型(图4-b)。以含 *Wx*^{mp} 基因型的 Milky Queen 序列为对照, 对部分江苏半糯粳稻的 *Wx* 第5外显子进行序列分析, 其序列完全一致、不存在 Milky Queen 中的碱基变异(图4-c), 说明江苏半糯粳稻品种均为 *Wx*^{mp} 等位基因型。

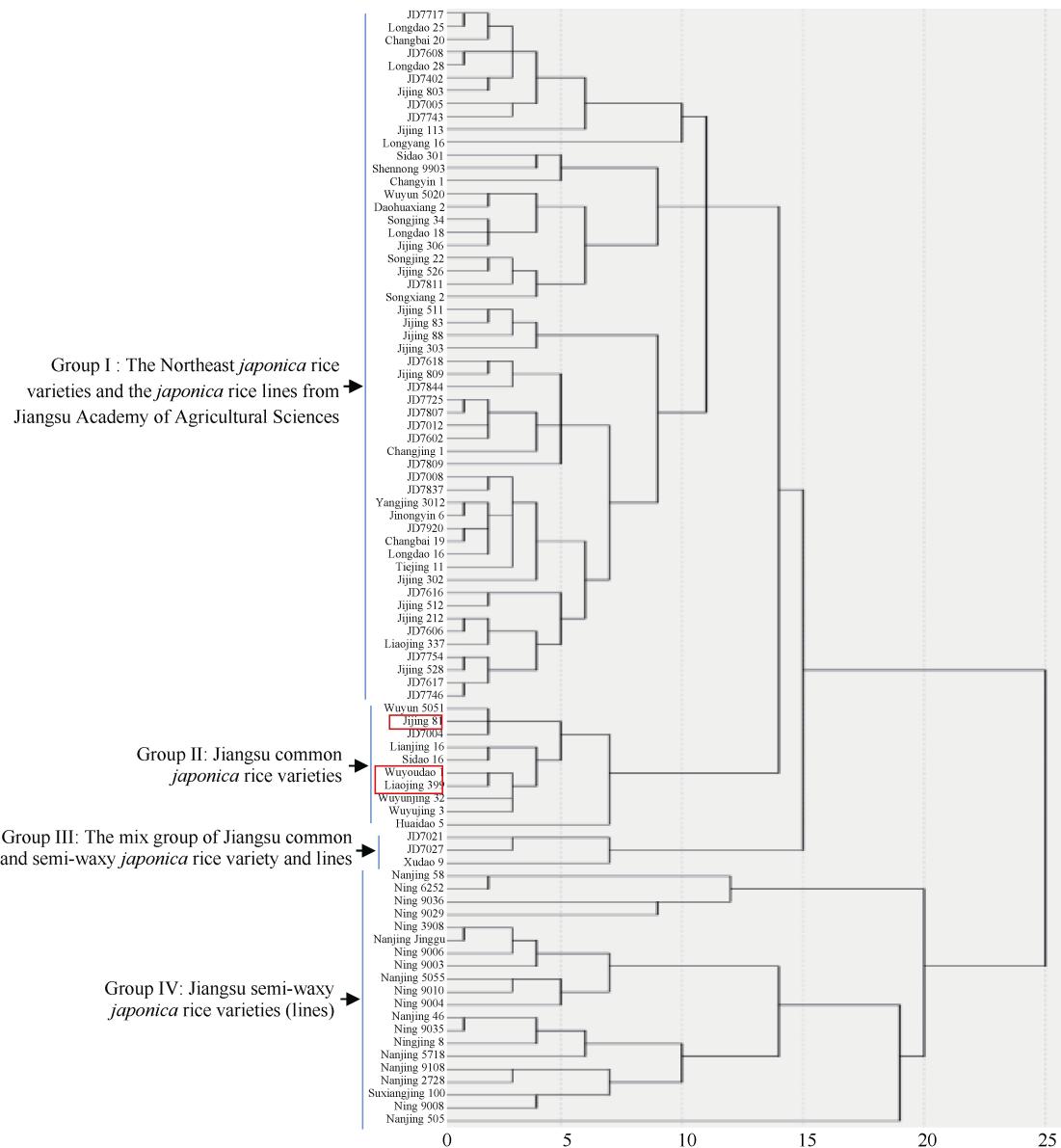


图 3 87 份粳稻品种(系)的聚类分析

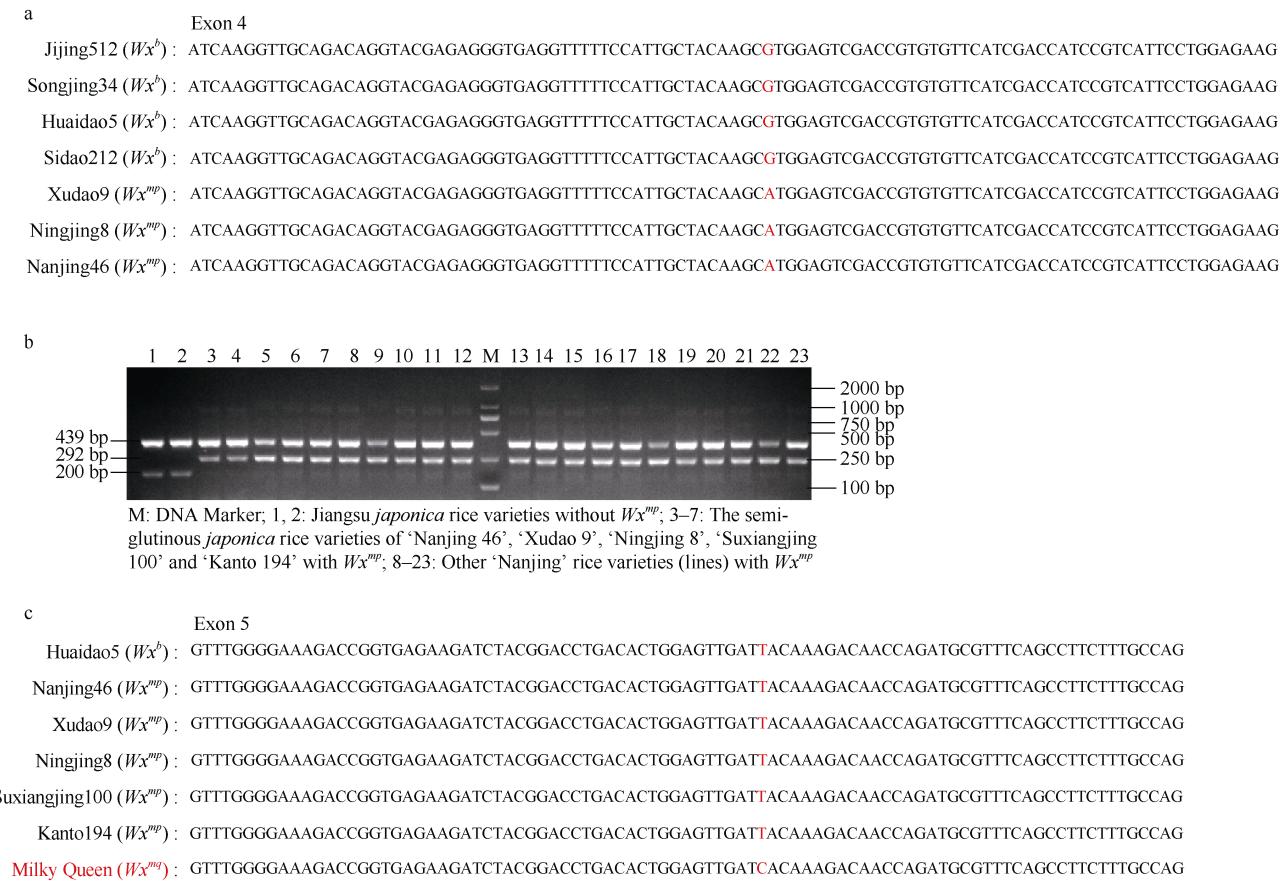
Fig. 3 Dendrogram of 87 *japonica* rice varieties (lines) based on physicochemical traits

可溶性淀粉合酶基因 *OsSSIIa* 是稻米 GT 的主效控制基因, 分别选取高、低 GT 材料进行了 *OsSSIIa* 序列分析, 与低 GT 品种南粳 46 和松粳 34 相比, 4 个高 GT 材料(南粳 505、南粳 2728、JD7021 和 JD7027)在 *OsSSIIa* 基因第 8 外显子上均发生了 TT/GC 替换(图 5)。

3 讨论

由于光、温及栽培条件不同，我国不同地区培育的粳稻稻米品质存在较大差异，一般东北地区优于江苏省，但是近年来江苏省选育的南粳46、南粳9108等半糯型粳稻的食味品质已赶超东北大米，说明

明食味品质受环境和遗传的双重影响。本研究根据地理来源和直链淀粉含量，将江苏和黑龙江、吉林、辽宁培育的 87 份粳稻品种划分为江苏普通粳稻、江苏半糯粳稻和东北粳稻 3 种类型。选取在品种原产地种植的水稻材料为研究对象，而非将不同地域品种同地点种植，避免了南北方粳稻对光、温变化、土壤性质等方面的差异，可如实反映品种自身的品质特性，体现不同地域品种间稻米品质的真实差异。通过对 AC、PC、GC、GT 及 RVA 特征值等理化性状差异，表明与东北粳稻相比，江苏普通粳稻的 AC 较低而 PC 和 GT 较高，其他理化性状无显著差异。稻米成分中 AC 和 PC 是影响稻米

图4 *Wx* 基因等位变异(a、c)及 *Wx^{mp}* 基因型检测(b)Fig. 4 Allelic variation of *Wx* gene (a, c) and detection of *Wx^{mp}* genotype (b)

Nanjing 46 (GT: 69.6°C) ...CACTGCCTCGAGACGTACCGCAAGTACAAGGAGAGCTGGAGGGGTTTCCAGGTGCGCGCATGTCGCAAGGACCTCAGCTGGGACCACGCCGCC...
 Songjing 34 (GT: 69.7°C) ...CACTGCCTCGAGACGTACCGCAAGTACAAGGAGAGCTGGAGGGGTTTCCAGGTGCGCGCATGTCGCAAGGACCTCAGCTGGGACCACGCCGCC...
 Nanjing 505 (GT: 79.9°C) ...CACTGCCTCGAGACGTACCGCAAGTACAAGGAGAGCTGGAGGGGCTCCAGGTGCGCGCATGTCGCAAGGACCTCAGCTGGGACCACGCCGCC...
 Nanjing 2728 (GT: 80.7°C) ...CACTGCCTCGAGACGTACCGCAAGTACAAGGAGAGCTGGAGGGGCTCCAGGTGCGCGCATGTCGCAAGGACCTCAGCTGGGACCACGCCGCC...
 JD7021 (GT: 80.0°C) ...CACTGCCTCGAGACGTACCGCAAGTACAAGGAGAGCTGGAGGGGCTCCAGGTGCGCGCATGTCGCAAGGACCTCAGCTGGGACCACGCCGCC...
 JD7027 (GT: 79.1°C) ...CACTGCCTCGAGACGTACCGCAAGTACAAGGAGAGCTGGAGGGGCTCCAGGTGCGCGCATGTCGCAAGGACCTCAGCTGGGACCACGCCGCC...

图5 *OsSIIa* 在不同糊化温度粳稻品种(系)中的序列分析Fig. 5 Sequence analysis of *OsSIIa* in *japonica* rice varieties (lines) with different gelatinization temperatures

食味的2个主要因素,一般PC越低、食味越好,AC在一定范围内也是越低食味越好^[22-23]。根据 *Wx* 基因序列分析,东北粳稻和江苏普通粳稻品种(系)中无碱基变异,均为 *Wx^b* 基因型,江苏普通粳稻中AC降低可能是通过降低 *Wx* 基因表达或降低GBSSI酶活而形成的。相关研究表明^[24-25],籽粒灌浆期高温可以降低粳稻 *Wx* 基因表达水平和相应酶活,从而减少淀粉中直链淀粉含量。江苏省粳稻灌浆期主要处于8月中旬至9月中旬的高温时间段,形成高温胁迫,而东北地区适宜的气候条件利于稻米灌浆和淀粉形成,因此灌浆期高温可能是导致江苏普通粳稻AC降低的原因。水稻栽培措施及管理对稻米PC

起重要作用^[26],目前我国除东北地区外,其他大部分地区的氮肥施用量均较高,一般为东北地区的两倍以上,特别是江苏省氮肥用量多年位居全国前列,因此造成江苏省粳稻的PC普遍偏高。江苏省粳稻的GT总体上高于东北粳稻,通过对不同品种的 *OsSIIa* 序列分析,发现高GT的品种(系)均含有籼稻型 *OsSIIa* 等位基因^[10],因此认为江苏省粳稻的高GT主要由其自身遗传背景决定。与东北粳稻和江苏普通粳稻相比,江苏半糯粳稻具有最低的AC,最大的GC及独特的RVA谱曲线,RVA特征值具体表现为最大的BDV,最小的TV、FV、SBV和Pet,说明半糯粳稻是一种理化性状异于普通粳稻的特殊类型,低AC是其形成的原因。

因, 这与已有研究结果一致^[19-20,27]。另外, 从性状的变异系数上看, 大多数性状值的变异系数在 3 种类型粳稻中均较小, 仅 SBV 的变异系数大, 特别是在江苏普通粳稻中 SBV 变异系数高达 105.9%, 在东北粳稻中也很高(86.5%)。SBV 是 RVA 谱二级参数, 由 FV 与 PV 相减得到, 可以反映米糊冷后的稳定性和回生趋势, 一般 SBV 越大, 淀粉冷糊稳定性差、易回生^[28]。SBV 变异系数大, 说明粳稻品种间的稻米回生特性存在较大差异, 主要由品种自身基因型决定, 同时受 AC、PC 和 GT 影响。

粳稻中 AC 与 SBV 存在显著正相关性, 而与 PV 和 BDV 存在显著负相关性^[4,29], AC 越低与 RVA 谱的关系越密切^[30]。本研究在江苏半糯粳稻和东北粳稻中也检测到 AC 与 SBV 的正相关性、与 BDV 的负相关性, 但未在江苏普通粳稻中检测到。这可能由于江苏普通粳稻品种间的 AC 变异幅度较小而弱化了与 SBV、BDV 间的关系。稻米糊化特性与食味品质密切相关, 稻米食味品质可以由 RVA 谱 BDV 和 SBV 反映, 因此一般食味品质好的稻米, BDV 较大、SBV 和 GT 较小, GT 与 BDV 呈负相关、与 SBV 呈正相关。本研究在江苏普通粳稻和江苏半糯粳稻中检测到 GT、BDV、SBV 的相关性, 但在东北粳稻中未检测到。原因可能是江苏普通粳稻和半糯粳稻中存在一些 GT 高值的品种(系), 大大提高了相关系数。RVA 谱特征值之间存在较高相关性, 这与以往的研究报道一致, 是由 RVA 谱各特征值间的相互关系决定的^[6,30-31]。通过聚类分析, 87 份粳稻品种(系)分为 4 个类群, 多数东北粳稻品种与江苏省农业科学院培育的粳稻品系聚为类群 I, 江苏普通粳稻主栽品种与少数东北粳稻品种聚为类群 II, 说明江苏普通粳稻与东北粳稻品种间有相互渗透, 可能与亲本材料的相互借鉴利用有关。按聚类结果对类群间理化性状进行比较, 发现类群 I 比类群 II 具有更高的食味品质, 表现为 BDV 较大, FV、SBV 和 Pet 较小。第 III 类群中仅含 3 个材料: 两个江苏普通粳稻品系(JD7021 和 JD7027)和半糯品种徐稻 9 号, 其 RVA 谱特征值位于普通粳稻(类群 I/II)和半糯粳稻(IV 类群)之间, 说明 JD7021 和 JD7027 的食味品质与半糯粳稻更接近, 具有较好的食味品质, 但是它们同时是高 GT 材料。因此后续研究中应以 RVA 谱为依据对粳稻类型材料进行食味品质筛选, 同时考虑 *OsSSIIa* 等位基因型的选择, 避免高 GT。

Wx^{mq} 和 *Wx^{mp}* 是在 *Wx^b* 基因上发生突变的两个 *Wx* 等位基因型, *Wx^{mq}* 最初是在低 AC 突变品种 Milky Queen 中发现的, 与 *Wx^b* 序列相比, 在第 4 外显子 53 bp 处发生 G/A 单碱基替换、第 5 外显子 52 bp 处发生 T/C 单碱基替换^[8,32]。*Wx^{mp}* 是在日本低 AC 粳稻品种 Milky Princess (即关东 194)中发现的, 与 *Wx^b* 序列相比, 仅在第 4 外显子 53 bp 处发生 G/A 单碱基替换^[8,33]。研究已证实江苏半糯粳稻存在第 4 外显子的 G/A 碱基变异^[21], 但是对第 5 外显子处碱基变异未知, 为明确江苏半糯粳稻为何种等位基因型(*Wx^{mq}* 或 *Wx^{mp}*), 本研究测序分析了第 5 外显子序列, 发现所有江苏半糯粳稻品种(系)中不存在 Milky Queen 中的碱基变异, 均与关东 194 序列一致, 因此研究所试江苏半糯粳稻品种(系)均为 *Wx^{mp}* 等位基因型。根据文献资料, *OsSSIIa* 基因第 8 外显子上的 2 个等位变异 G/A 和 GC/TT 被认为是决定水稻 GT 高低的关键位点, 其中 A 变异型会使 *OsSSIIa* 酶失活。一般高 GT 的水稻为 G-GC 单倍型, 而低 GT 的水稻为 G-TT 或 A-GC 单倍型^[10,34]。通过对 *OsSSIIa* 基因的测序分析, 发现测序材料的第 1 个变异位点(G/A)均为 G 型, 4 个高 GT 粳稻材料的 *OsSSIIa* 基因均为 G-GC 单倍型, 而其余低 GT 材料均为 G-TT 单倍型。后续研究中应根据 *OsSSIIa* 基因的 G/A 和 GC/TT 等位变异对粳稻育种材料的糊化温度进行标记辅助选择。

4 结论

与东北粳稻相比, 江苏普通粳稻的 AC 较低, PC 和 GT 较高, GC 和 RVA 谱特征值相当, 高 PC 和 GT 是江苏普通粳稻食味品质提高的主要限制因素, 可通过减少氮肥用量降低 PC, 同时重视 *OsSSIIa* 等位基因的标记辅助选择降低 GT。相比江苏普通粳稻和东北粳稻, 江苏半糯粳稻具有低 AC、高 GC、高 BDV 和低 SBV, 表现优良食味稻米特性, 携带 *Wx^{mp}* 等位基因是其理化特性形成的主要原因。RVA 谱可作为育种材料食味品质初步筛选的依据, 其应用可辅助水稻食味提升。

References

- [1] 崔晶, 楠谷彰人, 松江勇次, 森田茂纪. 中日合作水稻品质·食味研究的现状和展望. 北方水稻, 2011, 41(4): 1-6.
Cui J, Akihito K, Yuji M, Shigenori M. Present situation and expectation of the rice quality and eating under Sino-Japanese co-operation. North Rice, 2011, 41(4): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [2] 熊善柏, 赵思明, 李建林, 谭汝成. 米饭理化指标与感官品质

- 的相关性研究. 华中农业大学学报, 2002, 21(1): 83–87.
- Xiong S B, Zhao S M, Li J L, Tan R C. Study on the correlations between physicochemical properties and sensory qualities of cooked rice. *J Huazhong Agric Univ*, 2002, 21(1): 83–87 (in Chinese with English abstract).
- [3] 朱满山, 汤述翥, 顾铭洪. RVA 谱在稻米蒸煮食味品质评价及遗传育种方面的研究进展. 中国农学通报, 2005, 21(8): 59–64.
- Zhu M S, Tang S Z, Gu M H. Progress in the study on the assessing, genetic and breeding of the rice starch RVA profile in rice eating quality. *Chin Agric Sci Bull*, 2005, 21(8): 59–64 (in Chinese with English abstract).
- [4] 郑英杰, 于亚辉, 李振宇, 陈广红, 夏明, 阙补超. 北方两系杂交粳稻淀粉 RVA 谱特征与食味品质的关系. 中国稻米, 2018, 24(3): 49–54.
- Zheng Y J, Yu Y H, Li Z Y, Chen G H, Xia M, Que B C. Relationship between RVA profile characteristics and eating value of *japonica* two line hybrid rice in northern China. *China Rice*, 2018, 24(3): 49–54 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张丽霞, 余飞宇, 闫影, 王冬兰, 李瑞清, 曹黎明, 万常照, 吴书俊. 长三角地区 54 份粳稻品种食味指标的相关性分析. 上海农业学报, 2018, 34(5): 37–43.
- Zhang L X, Yu F Y, Yan Y, Wang D L, Li R Q, Cao L M, Wan C Z, Wu S J. Association analysis of eating quality traits in 54 *Japonica* rice germplasms in Yangtze River Delta region. *Acta Agric Shanghai*, 2018, 34(5): 37–43 (in Chinese with English abstract).
- [6] 贾良, 丁雪云, 王平荣, 邓晓建. 稻米淀粉 RVA 谱特征及其与理化品质性状相关性的研究. 作物学报, 2008, 34: 790–794.
- Jia L, Ding X Y, Wang P R, Deng X J. Rice RVA profile characteristics and correlation with the physical/chemical quality. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 790–794 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张昌泉, 赵冬生, 李钱峰, 顾铭洪, 刘乔泉. 稻米品质性状基因的克隆与功能研究进展. 中国农业科学, 2016, 49: 4267–4283.
- Zhang C Q, Zhao D S, Li Q F, Gu M H, Liu Q Q. Progresses in research on cloning and functional analysis of key genes involving in rice grain quality. *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 4267–4283 (in Chinese with English abstract).
- [8] 朱霁晖, 张昌泉, 顾铭洪, 刘巧泉. 水稻 *Wx* 基因的等位变异及育种利用研究进展. 中国水稻科学, 2015, 29: 431–438.
- Zhu J H, Zhang C Q, Gu M H, Liu Q Q. Progress in the allelic variation of *Wx* gene and its application in rice breeding. *Chin J Rice Sci*, 2015, 29: 431–438 (in Chinese with English abstract).
- [9] Jeon J S, Ryoo N, Hahn T R, Walia H, Nakamura Y. Starch biosynthesis in cereal endosperm. *Plant Physiol Bioch*, 2010, 48: 383–392.
- [10] Gao Z Y, Zeng D L, Cheng F M, Tian Z X, Guo L B, Su Y, Yan M X, Jiang H, Dong G J, Huang Y C, Han B, Li J Y, Qian Q. *ALK*, the key gene for gelatinization temperature is a modifier gene for gel consistency in rice. *J Integr Plant Biol*, 2011, 53: 756–765.
- [11] Tian Z X, Qian Q, Liu Q Q, Yan M X, Liu X F, Yan C J, Liu G F, Gao Z Y, Tang S Z, Zeng D L, Wang Y H, Yu J M, Gu M H, Li J Y. Allelic diversities in rice starch biosynthesis lead to a diverse array of rice eating and cooking qualities. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 21760–21765.
- [12] 陈温福, 潘文博, 徐正进. 我国粳稻生产现状及发展趋势. 沈阳农业大学学报, 2006, 37: 801–805.
- Chen W F, Pan W B, Xu Z J. Current situation and trends in production of *japonica* rice in China. *J Shenyang Agr Univ*, 2006, 37: 801–805 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王小虎, 钟卫国, 李标, 潘斌清, 端木李玲, 俞良, 胡江, 端木银熙, 梁国华, 钱前. 江苏省杂交粳稻与常规粳稻新品种主要性状比较. 江苏农业学报, 2017, 33: 729–738.
- Wang X H, Zhong W G, Li B, Pan B Q, Duan-Mu L L, Yu L, Hu J, Duanmu Y X, Liang G H, Qian Q. Comparative analysis of major traits of new varieties between *japonica* hybrid rice and conventional *japonica* rice in Jiangsu province. *Jiangsu J Agric Sci*, 2017, 33: 729–738 (in Chinese with English abstract).
- [14] 陈培峰, 顾俊荣, 乔中英, 赵步洪, 季红娟, 董明辉. 江苏省主要粳稻品种稻米品质研究. 西南农业学报, 2018, 31: 877–883.
- Chen P F, Gu J R, Qiao Z Y, Zhao B H, Ji H J, Dong M H. Study on rice quality of main *japonica* rice varieties in Jiangsu province. *Southwest China J Agric Sci*, 2018, 31: 877–883 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王才林, 张亚东, 朱镇, 赵凌, 陈涛, 林静. 优质水稻新品种南粳 46 的选育与应用. 中国稻米, 2008, (3): 38–40.
- Wang C L, Zhang Y D, Zhu Z, Zhao L, Chen T, Lin J. Breeding and application of a new high quality rice variety Nanjing 46. *China Rice*, 2008, (3): 38–40 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王才林, 张亚东, 朱镇, 姚姝, 赵庆勇, 陈涛, 周丽慧, 赵凌. 优良食味粳稻新品种南粳 9108 的选育与利用. 江苏农业科学, 2013, 41(9): 86–88.
- Wang C L, Zhang Y D, Zhu Z, Yao S, Zhao Q Y, Chen T, Zhou L H, Zhao L. Development of a new *japonica* rice variety Nanjing 9108 with good eating quality. *Jiangsu Agric Sci*, 2013, 41(9): 86–88 (in Chinese with English abstract).
- [17] 王才林, 张亚东, 朱镇, 陈涛, 赵庆勇, 赵凌, 周丽慧, 姚姝. 优良食味粳稻新品种南粳 5055 的选育及利用. 农业科技通讯, 2012, (2): 84–87.
- Wang C L, Zhang Y D, Zhu Z, Chen T, Zhao Q Y, Zhao L, Zhou L H, Yao S. Breeding and application of new good eating quality rice variety Nanjing 5055. *Bull Agr Sci Technol*, 2012, (2): 84–87 (in Chinese).
- [18] 陈培峰, 乔中英, 谢裕林, 朱勇良. 优质多抗香稻新品种“苏香粳 100”的选育与应用. 作物研究, 2017, 31(1): 15–17.
- Chen P F, Qiao Z Y, Xie Y L, Zhu Y L. Breeding and application of new high-quality, multi-resistant and fragrant rice variety ‘Suxiangjing 100’. *Crop Res*, 2017, 31(1): 15–17 (in Chinese).
- [19] 赵春芳, 岳红亮, 黄双杰, 周丽慧, 赵凌, 张亚东, 陈涛, 朱镇, 赵庆勇, 姚姝, 梁文化, 路凯, 王才林. 南粳系列品种的食味品质及理化特性. 中国农业科学, 2019, 52: 909–920.
- Zhao C F, Yue H L, Huang S J, Zhou L H, Zhao L, Zhang Y D, Chen T, Zhu Z, Zhao Q Y, Yao S, Liang W H, Lu K, Wang C L. Eating quality and physicochemical properties in Nanjing rice varieties. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 909–920 (in Chinese with English abstract).
- [20] 朱盈, 徐栋, 胡蕾, 花辰, 陈志峰, 张振振, 周年兵, 刘国栋, 张洪程, 魏海燕. 江淮优良食味高产中熟常规粳稻品种的特征. 作物学报, 2019, 45: 578–588.
- Zhu Y, Xu D, Hu L, Hua C, Chen Z F, Zhang Z Z, Zhou N B,

- Liu G D, Zhang H C, Wei H Y. Characteristics of medium-maturity conventional *japonica* rice with good taste and high yield in Jianghuai area. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 578–588 (in Chinese with English abstract).
- [21] 陈涛, 骆名瑞, 张亚东, 朱镇, 赵凌, 赵庆勇, 周丽慧, 姚姝, 于新, 王才林. 利用四引物扩增受阻突变体系 PCR 技术检测水稻低直链淀粉含量基因 *Wx-mq*. 中国水稻科学, 2013, 27: 529–534.
- Chen T, Luo M R, Zhang Y D, Zhu Z, Zhao L, Zhao Q Y, Zhou L H, Yao S, Yu X, Wang C L. Detection of *Wx-mq* gene for low amylose content by tetra-primer amplification refractory mutation system PCR in rice. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27: 529–534 (in Chinese with English abstract).
- [22] 徐铨, 唐亮, 徐凡, 福嵩阳, 黄瑞冬, 陈温福, 徐正进. 粳稻食味品质改良研究现状与展望. 作物学报, 2013, 39: 961–968.
- Xu Q, Tang L, Xu F, Fukushima A, Huang R D, Chen W F, Xu Z J. Research advances and prospects of eating quality improvement in *japonica* rice (*Oryza sativa* L.). *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 961–968 (in Chinese with English abstract).
- [23] Nakamura S, Cui J, Zhang X, Yang F, Xu X M, Sheng H, Ohtsubo K. Comparison of eating quality and physicochemical properties between Japanese and Chinese rice cultivars. *Biosci Biotech Bioch*, 2016, 80: 2437–2449.
- [24] Yamakawa H, Hirose T, Kuroda M, Yamaguchi T. Comprehensive expression profiling of rice grain filling-related genes under high temperature using DNA microarray. *Plant Physiol*, 2007, 144: 258–277.
- [25] 查曼. 高温影响水稻不同 *Wx* 等位基因表达及品质形成的研究. 扬州大学硕士学位论文, 江苏扬州, 2017.
- Zha M. The Research of Different *Wx* Alleles Expressions and Quality Formation Responding to High Temperature. MS Thesis of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, China, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [26] 王慧, 张从合, 陈金节, 严志, 周桂香, 黄艳玲. 稻米品质性状影响因素及相关基因研究进展. 中国稻米, 2018, 24(4): 16–21.
- Wang H, Zhang C H, Chen J J, Yan Z, Zhou G X, Huang Y L. Research advances in the influence factors and related genes of rice quality traits. *China Rice*, 2018, 24(4): 16–21 (in Chinese with English abstract).
- [27] 于新, 赵庆勇, 赵春芳, 张亚东, 朱镇, 赵凌, 陈涛, 周丽慧, 姚姝, 王才林. 携带 *Wx-mq* 基因的不同类型水稻新品种(系)直链淀粉含量分析. 江苏农业学报, 2012, 28: 1218–1222.
- Yu X, Zhao Q Y, Zhao C F, Zhang Y D, Zhu Z, Zhao L, Chen T, Zhou L H, Yao S, Wang C L. Analyses of amylose contents in different types of new rice varieties (lines) carrying *Wx-mq* gene. *Jiangsu J Agric Sci*, 2012, 28: 1218–1222 (in Chinese with English abstract).
- [28] 蔡一霞, 刘春香, 王维, 张洪熙, 张祖建, 杨静, 唐汉忠. 灌浆期表观直链淀粉含量相似品种稻米胶稠度和 RVA 谱的动态差异. 中国农业科学, 2011, 44: 2439–2445.
- Cai Y X, Liu C X, Wang W, Zhang H X, Zhang Z J, Yang J, Tang H Z. Dynamic differences of the RVA profile and gel consistency in two rice varieties with similar apparent amylose content during grain filling. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 2439–2445 (in Chinese with English abstract).
- [29] 胡培松, 翟虎渠, 唐邵清, 万建民. 利用 RVA 快速鉴定稻米蒸煮及食味品质的研究. 作物学报, 2004, 30: 519–524.
- Hu P S, Zhai H Q, Tang S Q, Wan J M. Rapid evaluation of rice cooking and palatability quality by RVA profile. *Acta Agron Sin*, 2004, 30: 519–524 (in Chinese with English abstract).
- [30] 李刚, 邓其明, 李双成, 王世全, 李平. 稻米淀粉 RVA 谱特征与品质性状的相关性. 中国水稻科学, 2009, 23: 99–102.
- Li G, Deng Q M, Li S C, Wang S Q, Li P. Correlation analysis between RVA profile characteristics and quality in rice. *Chin J Rice Sci*, 2009, 23: 99–102 (in Chinese with English abstract).
- [31] 隋炯明, 李欣, 严松, 严长杰, 张蓉, 汤述翥, 陆驹飞, 陈宗祥, 顾铭洪. 稻米淀粉 RVA 谱特征与品质性状相关性研究. 中国农业科学, 2005, 38: 657–663.
- Sui J M, Li X, Yan S, Yan C J, Zhang R, Tang S Z, Lu J F, Chen Z X, Gu M H. Studies on the rice RVA profile characteristics and its correlation with the quality. *Sci Agric Sin*, 2005, 38: 657–663 (in Chinese with English abstract).
- [32] Sata H, Yasuhiro S, Sakai M, Imbe T. Molecular characterization of *Wx-mq*, a novel mutant gene for low-amylase content in endosperm of rice (*Oryza sativa* L.). *Breed Sci*, 2002, 52: 131–135.
- [33] Yang J, Wang J, Fan F J, Zhu J Y, Chen T, Wang C L, Zheng T Q, Zhang J, Zhong W G, Xu J L. Development of AS-PCR marker based on a key mutation confirmed by resequencing of *Wx-mp* in Milky Princess and its application in *japonica* soft rice (*Oryza sativa* L.) breeding. *Plant Breed*, 2013, 132: 595–603.
- [34] Bao J S. Towards understanding of the genetic and molecular basis of eating and cooking quality of rice. *Cereal Food World*, 2012, 57: 148–156.