

摘要

我国现有内陆盐碱地面积近 1 亿 hm^2 ，对盐碱地进行合理的开发与利用，不仅可以有效缓解土地供需矛盾，而且对保障国家粮食安全具有重大战略意义。水稻是我国最重要的粮食作物，水稻种植一直被认为是改良盐碱地的重要生物方法。本研究收集了 3 个品种耐盐碱水稻（T477S/粤禾丝苗、广湘 24S/RA65 和 2020X2L547，分别用 YSM、GSR、GXL 代替）分别在 0%、0.3%、0.6% 盐碱浓度下（分别用 @0.0、@0.3、@0.6 表示）培育的共计 9 个稻谷样品，经砻谷、碾白、粉碎、过筛后得到米粉，随后采用碱提与酶解相结合的方法分离出大米淀粉，最后对米粉和淀粉进行结构表征和理化功能性质分析，以期耐盐碱水稻的深加工利用提供理论依据和数据支撑。主要研究结果如下：

耐盐碱水稻大米的长度、宽度和长宽比均随盐碱浓度的增大而减小。正常培育的 YSM、GSR 和 GXL 米粉的直链淀粉含量分别为 9.57%、17.80% 和 24.01%，随着盐碱浓度增大，YSM 和 GXL 的直链淀粉的含量呈下降的趋势，如 YSM@0.3 和 YSM@0.6 的直链淀粉含量分别为 9.11% 和 8.40%。米粉的蛋白含量随着盐碱浓度的增大而显著提高，其中 GXL 米粉中蛋白含量从 6.62%（GXL@0.0）增大至 10.13%（GXL@0.6）；盐碱胁迫亦影响到蛋白的氨基酸组成，其中对亮氨酸、赖氨酸和脯氨酸的影响较大；碱提与酶解相结合能有效脱除米粉中的蛋白质和脂肪。此外，盐碱胁迫增大了米粉中脂肪和灰分的含量，如 GSR 米粉的脂肪和灰分含量分别从 0.58%、0.48%（GSR@0.0）增至 1.00%、0.79%（GSR@0.6）。

米粉的持水性随盐碱浓度的增大而增大，持油性则下降，但淀粉的持水性和持油性未见显著变化。米粉的溶解度随盐碱浓度的变化与其直链淀粉含量变化趋势一致，即 YSM、GXL 米粉溶解度随盐碱浓度增大而减小，GSR 米粉的溶解度在盐碱浓度为 0.3% 时达到最大值（12.07%）。淀粉膨润力随盐碱浓度的变化与其直链淀粉含量变化趋势相反。由于脱除了蛋白，淀粉的溶解度（最大值为 47.84%）和膨润力（最大值为 28.71）相比米粉均显著提升。差示扫描量热仪（DSC）结果表明，米粉的糊化焓 ΔH 未见显著变化，但糊化温度区间（ ΔT ）略有增大；相比米粉，淀粉的糊化温度降低，且 GXL 淀粉的焓值随盐碱浓度的增加而增加。快速粘度仪（RVA）分析显示，盐碱胁迫显著提升了米粉的成糊温度（ $3^{\circ}\text{C}\sim 9^{\circ}\text{C}$ ），峰值时间也随盐碱浓度的增大而推迟，峰值黏度和崩解值均减小，GXL 米粉的回生值从 1898.50 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 降至 1099.00 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，变化幅度最大。流变学分析结果表明，米粉的 G' 和 G'' 随着角频率的增大而增大， G' 始终大于 G'' ，表明弹性特征始终大于粘性特征。盐碱胁迫影响米粉的稠度系数 K ，YSM@0.3 米粉的 K 值（114.38 $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ）高于对对照样（98.22 $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ），说明 YSM@0.3 米粉的粘性特征更加明显；然而，直链淀粉含量较高的 GSR 和 GXL 的 K 值均随盐碱浓度的增加而降低，说明弹性特征更加明显。脱除蛋白后，淀粉的 G' 和 G'' 均减小，其中 GSR 淀粉的减小趋势最明显。

不同盐碱浓度下的米粉和淀粉的颗粒形貌无显著差异，但同一品种的淀粉粒径分布与其直链淀粉含量相关，即直链淀粉含量越高，淀粉粒径越大。X-射线衍射（XRD）结果显示，耐盐碱水稻米粉和淀粉均为典型的 A 型结晶结构；此外，耐盐碱水稻米粉存在

微弱的 V 型结晶结构，可能是脂肪含量增加，导致淀粉与脂肪形成 V 型复合物；随着盐碱培育浓度的增大，3 种耐盐碱水稻米粉的相对结晶度均减小，淀粉相对结晶度均增大。此外，盐碱胁迫改变了淀粉的超分子层状结构，随着盐碱浓度的增大，淀粉的结晶层厚度（ l_c ）和半结晶层厚度（ d ）整体呈现出增大的趋势，其中 GXL 淀粉的变化最为显著， d 值从 9.37 nm（GXL@0.0）增至 10.13 nm（GXL@0.3）。盐碱胁迫增大了 3 种耐盐碱水稻淀粉的分子量。随着盐碱浓度的增大，YSM 和 GSR 淀粉的 A 链和 B₁ 链的占比整体呈现出增大的趋势，而 B₃ 链的占比则整体呈减小的趋势。

体外消化结果显示，随着盐碱浓度的增大，YSM 与 GSR 淀粉的慢消化淀粉（SDS）含量增大，GSR 淀粉的 SDS 含量的变化幅度最大，从 38.85% 增大至 46.32%。GXL 淀粉的快消化淀粉（RDS）含量随盐碱浓度的增大逐渐减小，抗性淀粉（RS）含量随之增长幅度最大，从 9.47% 增大至 23.06%。

综上所述，盐碱浓度显著影响耐盐碱水稻的化学组成、米粉的理化功能性质、淀粉的分子结构与消化特性，但是不同的水稻品种之间也表现出差异性。本课题研究结果为耐盐碱水稻在食品加工应用方面提供了理论依据和数据支撑，如耐盐碱水稻的高蛋白特性可为米蛋白的研究提供更加丰富的物质原料，其不易消化性可用于健康食品的开发。

关键词：耐盐碱水稻；米粉；淀粉；结构特征；理化功能性质

Abstract

In China, there are nearly 100 million hm^2 of saline field inland. The reasonable development and utilization of saline field can not only effectively alleviate the contradiction between land supply and demand, but also has great strategic significance to ensure national food security. Rice is the most important food crop in China, and rice cultivation has been considered an important biological method to improve saline land. In this study, a total of nine rice samples from three varieties of saline-tolerant rice (T477S/Yuehe Si Miao, Guangxiang 24S/RA65 and 2020X2L547, replaced by YSM, GSR and GXL, respectively) cultivated at 0%, 0.3% and 0.6% saline concentrations respectively (indicated by @0.0, @0.3 and @0.6) were collected. Rice flours were obtained by rice hulling, milling, crushing and sieving, followed by the extraction of rice starches from rice flours using a combination of alkaline extraction and enzymatic digestion, and finally the structural and physicochemical properties of rice flours and starches were analysed, with a view to provide theoretical basis and data support for the further processing and utilisation of salinity-tolerant rice. The main research results were as follows:

The length, width and aspect ratio of saline-tolerant rice decreased with increasing saline concentration. The amylose content of normally cultivated YSM, GSR and GXL rice flour was 9.57%, 17.80% and 24.01%, respectively. The amylose content of YSM and GXL tended to decrease with increasing saline concentration, for example, the amylose content of YSM@0.3 and YSM@0.6 was 9.11% and 8.40%. The protein content of rice flour increased significantly with increasing salinity concentration, with the protein content in GXL rice flour increasing from 6.62% (GXL@0.0) to 10.13% (GXL@0.6); salinity stress also affected the amino acid composition of the proteins, with a greater effect on leucine, lysine and proline; the combination of alkaline extraction and enzymatic digestion was effective in removing protein and fat from the rice flours. In addition, salinity stress increased the fat and ash content of the rice flour, the fat and ash content of GSR rice flour increased from 0.58% and 0.48% (GSR@0.0) to 1.00% and 0.79% (GSR@0.6) respectively.

There were no significant differences in the grain morphology of rice flours and starches at different saline concentrations, but the grain size distribution of starches of the same variety correlated with their amylose content, the higher the amylose content, the larger the starch grain size. X-ray diffraction (XRD) results showed that both saline-tolerant rice flours and starches had a typical A-shaped crystalline structure, and there was a weak V-shaped crystalline structure in saline-tolerant rice flours, due to the increased fat content, which led to the formation of V-shaped complexes between starch and fat; the relative crystallinity of all three salinity-tolerant rice flours decreased and that of starches increased as the salinity cultivation concentration increased. And saline stress altered the supramolecular lamellar structure of saline-tolerant starches, with an overall trend of increasing crystalline layer thickness (l_c) and semi-crystalline layer thickness (d), with the most significant change in GXL starches, where the d value increased from 9.37 nm (GXL@0.0) to 10.13 nm (GXL@0.3). Saline stress significantly increased the molecular weight of three saline-tolerant rice starches. The proportion of A and B₁ chains of YSM and GSR starches showed an overall increasing trend with increasing saline

concentration, while the proportion of B₃ chains showed an overall decreasing trend.

The water-holding capacity of rice flours increased with increasing saline concentration, while the oil-holding capacity decreased, but the water-holding capacity and oil-holding capacity of starches did not change significantly. The solubility of the rice flours varied with saline concentration in line with their amylose content, the solubility of YSM and GXL rice flours decreased with increasing saline concentration, while the solubility of GSR rice flours reached its maximum value (12.07%) at saline concentration of 0.3%. The variation of starches swelling power with saline concentration was opposite to the trend of their amylose content. The solubility (max. 47.84%) and swelling power (max. 28.71) of starches were significantly higher compared to rice flours due to the removal of protein. Differential scanning calorimetry (DSC) results showed no significant change in the enthalpy of pasting ΔH for rice flours, but pasting temperature interval (ΔT) increased slightly; compared to rice flours, the pasting temperature of starches decreased and the enthalpies of GXL starches gradually increased with increasing saline concentration. Rapid viscometer (RVA) analysis showed that saline stress significantly increased the pasting temperature of rice flours (3°C~9°C), and the peak time was also delayed with increasing saline concentration, peak viscosity and breakdown value decreased, the regeneration value of GXL rice flours decreased from 1898.50 mPa·s to 1099.00 mPa·s, which showed the largest change. The results of the rheological analysis showed that G' and G'' of the rice flours increased with increasing angular frequency, and G' was always greater than G'' , indicating that the elastic characteristics were always greater than the viscous characteristics. Saline stress affected the consistency coefficient K of rice flours, the K of YSM@0.3 rice flour (114.38 Pa·sⁿ) was higher than that of the control sample (98.22 Pa·sⁿ), indicating that the sticky characteristic of YSM@0.3 rice flour was more pronounced; however, the K values of both GSR and GXL with higher amylose content decreased with increasing saline concentration, indicating that the elastic characteristic was more pronounced. After protein removal, both G' and G'' of the starches decreased, with GSR starches showing the most obvious trend of decrease.

The in vitro digestion results showed that the slowly digestible starch (SDS) content of YSM and GSR starch increased with increasing saline concentration, with the largest change in SDS content of GSR starch from 38.85% to 46.32%. The fast digestible starch (RDS) content of GXL starch gradually decreased with increasing saline concentration, and the greatest resistant starch (RS) content showed the greatest increase from 9.47% to 23.06%.

In summary, saline concentration significantly affected the chemical composition, physicochemical properties of saline-tolerant rice flours, and the molecular structure and digestibility of saline-tolerant rice starches, but there was also variation exhibited between rice varieties. The results of this study are intended to provide data to support the application of saline-tolerant rice in food processing. For example, the high protein content of saline-tolerant rice can provide a richer material for rice protein researches, and its indigestibility can be used in the development of health foods.

Keywords: saline-tolerant rice, rice flour, starch, physicochemical properties, structural properties

缩写符号说明

英文缩写	英文全称	中文全称
DSC	Differential Scanning Calorimetry	差示扫描量热法
RVA	Rapid Viscosity Analysis	快速粘度分析
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	傅里叶红外光谱仪
XRD	X-Ray Diffraction	X-射线衍射
SEM	Scanning Electron Microscope	扫描电子显微镜
SAXS	Small-angle X-ray scattering	小角 X 射线散射
HPSEC-MALLS- RID	High Performance Size Exclusion Chromatography Multiangle Laser Light Scattering Differential Refractive Index Detector	高效液相色谱-多角度激光散射联用
HPSEC	High Performance Size Exclusion Chromatography	高效体积排阻色谱
ΔH	Enthalpy Change of Gelatinization	糊化焓
ΔH_r	Enthalpy Change of Retrogradation	回生焓
DP	Degree of Polymerization	聚合度

目 录

1 绪论.....	1
1.1 耐盐碱水稻概述.....	1
1.1.1 耐盐碱水稻简介.....	1
1.1.2 耐盐碱水稻的筛选与培育.....	1
1.1.3 盐碱对水稻生长发育及品质影响的研究现状.....	2
1.1.4 水稻耐盐碱的生理机理.....	3
1.2 大米粉和大米淀粉概述.....	3
1.2.1 大米粉的主要成分.....	3
1.2.2 大米粉和大米淀粉的功能特性.....	5
1.3 大米淀粉的提取方法.....	6
1.3.1 碱提法.....	6
1.3.2 酶法.....	6
1.3.3 表面活性剂法.....	7
1.3.4 超声波法.....	7
1.3.5 物理分解法.....	7
1.4 立题背景与研究意义.....	7
1.5 主要研究内容.....	8
2 实验材料与方法.....	9
2.1 实验材料与试剂.....	9
2.2 主要仪器.....	9
2.3 实验方法.....	9
2.3.1 稻谷前处理.....	9
2.3.2 大米粒型品质测定.....	10
2.3.3 米粉和淀粉的制备工艺.....	10
2.3.4 基本化学成分分析.....	10
2.3.5 颗粒形貌表征(SEM).....	11
2.3.6 粒径分布测定.....	11
2.3.7 X-射线衍射分析(XRD).....	11
2.3.8 傅里叶红外分析(FT-IR).....	11
2.3.9 小角 X-射线散射分析(SAXS).....	11
2.3.10 相对分子量分布测定.....	11
2.3.11 支链链长分布测定.....	11
2.3.12 氨基酸组成分析.....	12
2.3.13 持水持油性测定.....	12

2.3.14	溶解度和膨润力测定	12
2.3.15	热力学特性与长期回生特性测定(DSC)	13
2.3.16	糊化特性测定(RVA)	13
2.3.17	流变学特性测定	13
2.3.18	消化性测定	13
2.3.19	数据处理与分析	14
3	结果与讨论	15
3.1	耐盐碱水稻大米的外观品质	15
3.2	耐盐碱水稻米粉和淀粉的基本化学组成	16
3.3	耐盐碱水稻米粉和淀粉的结构特征	17
3.3.1	耐盐碱水稻米粉和淀粉的颗粒形貌	17
3.3.2	耐盐碱水稻淀粉的粒径分布	18
3.3.3	耐盐碱水稻米粉和淀粉的 X-射线衍射分析	19
3.3.4	耐盐碱水稻米粉和淀粉的傅里叶红外分析	20
3.3.5	耐盐碱水稻淀粉的小角 X-射线散射	22
3.3.6	耐盐碱水稻淀粉的相对分子量分布	23
3.3.7	耐盐碱水稻淀粉的支链链长分布	23
3.4	耐盐碱水稻米粉和淀粉理化功能性质	24
3.4.1	耐盐碱水稻米粉的氨基酸分析	24
3.4.2	耐盐碱水稻米粉和淀粉的持水持油性	25
3.4.3	耐盐碱水稻米粉和淀粉的溶解度和膨润力	26
3.4.4	耐盐碱水稻米粉和淀粉的热力学与长期回生特性	28
3.4.5	耐盐碱水稻米粉和淀粉的糊化特性	30
3.4.6	耐盐碱水稻米粉和淀粉的流变学特性	32
3.5	耐盐碱水稻淀粉的消化特性	35
	主要结论与展望	37
	主要结论	37
	展望	38
	参考文献	39

1 绪论

1.1 耐盐碱水稻概述

1.1.1 耐盐碱水稻简介

稻米 (*Oryza sativa* L.) 是世界上主要的粮食作物之一^[1], 是全球半数以上人口的主食, 是人类营养、能源供应和粮食安全的关键^[2]。中国是世界上最大的稻米生产国, 稻米种植面积约占全球水稻种植面积的 20%, 产量约占全球稻米产量的 30%, 被称作稻种资源富国和水稻科技强国^[3]。联合国人口组织预测, 到 2050 年, 世界人口总数将达到 93 亿, 结合饮食, 消费和收入趋势分析, 这将需要全球粮食产量增长 70%~100%^[4]。并且, 在过去几十年中, 随着收入水平提高, 人们对于粮食的需求量在逐步提升, 许多国家饮食模式已经发生了很大变化, 饮食逐渐倾向于富含碳水化合物, 脂肪和糖的加工食品^[5]。

但是与此同时, 以气候变暖为主要特征的全球气候变化给地球自然系统和人类经济社会发展带来了严重影响, 其中农业对气候变化影响最为敏感^[6]。研究表明, 气候变化所造成的温度、降水、光照等气象因素的变化, 都会影响粮食生产的过程和结果, 导致粮食生产能力减弱^[7-9]。近期, 全球人口的增多和城镇化的发展导致耕地面积减少, 干旱频繁发生和灌溉方法不当也造成了次生盐碱化面积的日益扩大。据估计, 全球大约有 10 亿 hm^2 盐碱化土地, 占陆地面积的 7%, 每年盐碱地面积还在以 100 万~200 万 hm^2 的速度扩大^[10]。综上所述, 研究水稻这种对盐碱中度敏感的作物, 对沿海滩涂和盐碱地的改良及粮食产量的提高都具有重要意义。

耐盐碱植物可以在盐碱地的环境下生长, 即使是在较高的盐碱浓度的环境中, 也能保持着较好的耐性。水稻对生长环境中的盐碱度有一定的敏感性, 其盐度阈值为 3.0 dS/m (FAO)^[11]。从生产来看, 耐盐碱水稻(海水稻)一般指的是可以在环境盐碱浓度为 0.3% 以上的盐碱地生长, 同时单产可达 300 $\text{kg}/667 \text{ m}^2$ 以上的水稻品种^[12]。耐盐碱稻为一年生禾本科植物, 是一种属于栽培稻和野生稻之间的品种, 由海边滩涂的野生水稻进行繁育, 生长结穗依靠海水灌溉, 晚种早熟, 有着极短的生育期^[13]。耐盐碱水稻的植株相对高大, 具有松散的株型、较粗的茎秆, 生长茂盛, 谷粒较小且带有长芒。耐盐碱水稻除了具有抗盐碱的特点外, 还有抗涝、不易倒伏以及抗病虫等能力, 相比于普通的水稻品种, 具有更强的生存竞争能力^[14]。

1.1.2 耐盐碱水稻的筛选与培育

水稻新品种选育的主要方法仍然是常规育种。斯里兰卡是国外最早一批开展筛选与培育耐盐碱水稻品种工作的国家, 并于 1939 年培育出世界上第 1 个抗盐水稻品种 Pokkali, 并最早推广。1944-1945 年, 印度制定了杂交育种耐盐碱水稻品种的计划^[15], 此后巴西^[16]等国也相继开展了对水稻耐盐性的研究。我国对水稻的耐盐碱性研究始于 19 世纪 50 年代, 在 80 年代开展了全国范围内的稻麦抗盐碱协作研究。“七五”期间, 国家启动水稻种质资源的耐盐碱性鉴定, 并开展了全国大协作。水稻耐盐碱水稻品种培育, 主要是通过耐盐碱种质筛选鉴定和人工杂交或回交等方法向优良水稻品种导入耐盐基因, 在多年多

代的盐胁迫培育后，选育出综合性状优良的耐盐品种^[12]。

水稻种质资源间耐盐碱性存在的较大差异与不完全相同的耐盐碱机制，是对耐盐碱水稻品种进行筛选的基础^[17]。系统选育一直是耐盐碱水稻品种选育的基础，从早期直到当下的耐盐品种（系）的培育主要还是依靠系统选育而成，辽宁省盐碱地利用研究所曾通过这种方法选育出了高产且耐盐碱的水稻品种辽盐2号、辽盐3号等，这些培育所得的品种具有高度的耐盐碱能力。在某种程度上，水稻在幼苗阶段的耐盐性可代表全生育期的耐盐水平，因此在早期世代加强幼苗选择可以提高育种效率^[18]。水稻耐盐性是多种抗盐生理生化反应的综合表现，大多数是由不同染色体上的多个基因控制数量性状，其中涉及的遗传基础复杂，因此，传统选育方法对耐盐碱水稻品种育种来说，不仅效率低下且速度缓慢。随着时代进步，生物技术的发展逐渐成熟，它将传统优良育种方法同先进生理生化指标相结合，利用转基因技术等方法助力常规育种成为了创新新品种选育方法的有效途径^[19]。

1.1.3 盐碱对水稻生长发育及品质影响的研究现状

当环境中的盐碱浓度超过植物能够正常生长的范围时，就会发生盐碱胁迫，这是目前农作物产量受限的一个重要制约因素。目前研究发现，盐碱浓度对植物的不利影响包括包括以下四个方面：（1）植物无法在这种盐碱度过高的环境中建立有效根系的土壤紧实度和硬度^[20]；（2）盐碱度引起的渗透胁迫导致植物无法充分利用水分；（3）阻碍植物对营养元素的运输效率，减少了植物对氮、磷、钾和钙等营养物质的吸收；（4）离子毒害：当土壤中 Na^+ 、 Cl^- 等无机盐离子含量高时，植物就会被动吸收超过自身耐受的无机盐离子，致使其体内细胞离子浓度协调失衡，甚至会导致植物对其他离子的吸收相应减少，影响植物的正常生长。钠盐是盐碱土的重要表现形式，也是自然界中含量最丰富的盐类之一，是对水稻造成伤害的主要因素。钠盐易溶解，并且和水离子半径接近，在维持细胞膜内外的渗透压方面发挥着重要作用^[21]。但是，当生长环境中钠盐浓度过高时，水稻的细胞生物膜功能会受到影响，进而抑制其吸收营养物质等正常的生理功能，造成代谢紊乱，对水稻的生长产生毒害作用^[22]。盐碱度对植物的生理和代谢过程的影响是非常复杂的，它取决于盐的种类和浓度、植物本身的基因型和生长阶段^[23]。盐碱胁迫会影响植物的所有发育阶段，不同作物对盐碱胁迫的敏感性因生长阶段而异^[16]。在盐碱胁迫下，水稻的生长和发育情况会受到抑制，组织器官的生长及分化速度减缓，并且这种抑制影响会随着盐碱度的持续增加而逐渐增大。水稻在萌发期是相对比较耐盐的，但是在这种胁迫下，其萌发期会推迟^[24]。水稻的幼苗期对盐碱危害最敏感的时期，最易受到盐碱胁迫，严重时会出现稻谷播种后无法出苗的情况。即使出苗成功，也无法抵抗病虫害等影响，一般都会出现死苗的现象。当水稻进入完全自养的生长阶段，耐盐碱性逐渐增强，在生殖生长期对盐碱的敏感性又再次提高^[25]。

此外，盐碱度对水稻生长发育的影响在水稻的理化指标和性能指标上也表现出了不同程度的反应。Baxter 等^[26]研究发现，盐碱环境下生长的水稻产量明显降低，大米粉中的蛋白质含量显示出增加的变化趋势，以谷蛋白含量的增加最为显著，米粉的糊化和质构特性也随之改变。Abdullah 等^[27]同样发现了水稻在盐处理环境下产量下降的现象，且

在盐胁迫下,发育中的水稻籽淀粉合成酶(α -1,4-葡聚糖糖基转移酶)的活性受到明显抑制,阻碍水稻中碳水化合物的积累。翟彩娇等^[28]研究结果显示盐碱胁迫会对大米粉的粘度特征值有显著影响,进而影响稻米的食用品质。贺奇等^[29]人研究发现随着盐碱胁迫程度的增加,稻米中的蛋白质含量也呈现了增长趋势,直链淀粉含量显著下降,导致稻米的品质受到影响。

1.1.4 水稻耐盐碱的生理机理

盐碱环境对植物的胁迫主要是渗透胁迫和离子胁迫,植物要在盐碱胁迫环境下克服这两种胁迫能力才能正常生长发育^[30]。在逆境生长条件下,植物首先通过有机和无机渗透调节来确保自身内部环境的稳定性^[31]:(1)有机渗透调节:植物合成有机物质,如脯氨酸、可溶性糖、甘露醇、甜菜碱等来降低细胞内部的水势,以此抵抗外界的不良生长环境。从细胞水平上来说,细胞自身的渗透调节能力在很大程度上决定着植物耐盐碱能力的强弱^[32]。(2)无机渗透调节:植物通过增加对 K^+ 、 Ca^{2+} 等亲水性无机离子的吸收,抑制对 Na^+ 的吸收,提高植物的抗盐能力^[33]。有研究学者认为,离子选择性吸收是水稻耐盐的主要机理^[34]。Baba等^[35]在盐胁迫水稻24 h处理后发现,水稻木质部内的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的离子浓度显著提高,相反, Na^+ 的转运受到抑制,表现出了较好的无机离子调节能力。除此之外,植物的细胞膜功能也可以通过体内的抗氧化调节机制来维持,植物体内抗氧化酶类的含量与酶活性的高低,是植物抗逆性的一个重要指标。非酶类抗氧化剂和抗氧化酶,可以通过还原、酶解的方式清除活性氧。水稻细胞离子区隔化也可以抵抗盐胁迫,Nakamura等^[36]研究发现了水稻体内的 Na^+/H^+ 转运蛋白,这种特异性转运蛋白参与水稻的耐盐反应。 Na^+/H^+ 逆转运蛋白是调节细胞内的离子运输分布和细胞内外水势的重要媒介,在水稻的细胞离子区隔化中发挥着重要作用。

1.2 大米粉和淀粉概述

1.2.1 大米粉的主要成分

1.2.1.1 大米淀粉

大米淀粉是大米的主要组成成分,大约占大米干重的90%,主要存在于成熟大米的胚乳细胞中^[37]。大米淀粉颗粒在已知的谷物淀粉中,颗粒直径是目前已知的谷物中最小的,颗粒表面光滑,是直径为3~10 μm 的多面体形状^[38]。大米淀粉一般以复粒的形式存在^[39],大米淀粉聚集体通常被蛋白体包裹,以此达到保护淀粉的作用,两者组合形成椭圆形。大米淀粉颗粒是由支链淀粉疏密相间的结晶区与无定形非结晶区组合而成,直链淀粉以螺旋结构掺杂在其中^[40],直链和支链淀粉的基本组成成分都是葡萄糖,区别在于葡萄糖小分子的连接方式不同。直链淀粉是由 α -D-1,4葡萄糖通过 α -1,4糖苷键链接而成的线性分子,呈现右手螺旋结构。支链淀粉由葡萄糖单元通过 α -1,4糖苷键连接而成,且主链与支链在分支点上通过 α -1,6糖苷键连接^[41]。支链淀粉和直链淀粉在淀粉颗粒中形成发散的各向异性和半结晶结构^[42]。在大米的理化特性研究中,淀粉一般被当作主要的研究对象,例如糊化特性和流变特性等都与淀粉的含量密切相关。此外,大米的品种、

直链淀粉含量、直链淀粉与支链淀粉的比例等因素，均会直接影响大米粉的功能特性。

1.2.1.2 大米蛋白

蛋白质是大米粉中仅次于淀粉的第二大成分，其中谷蛋白为主要成分，约占蛋白质含量的 80%，籼米中的蛋白质含量约占大米粉的 6%~8%。虽然相比于淀粉含量较低，但对大米的理化性质却有着非常重要的影响。大米蛋白是具有低过敏性、抗肥胖抗癌、抗氧化性等优势生理活性的植物蛋白^[43-48]，具有非常可观的市场价值。大米中的蛋白质按溶解性通常可分为醇溶蛋白、球蛋白、清蛋白和谷蛋白，其中谷蛋白的含量最多^[49]。对于不同品种、种植环境下的大米，其蛋白质含量也具有差异，并且大米中的蛋白质不是均匀分布的，绝大多数蛋白质分布在大米胚乳中。贾喜午等^[50]通过对不同品种大米粉进行脱脂脱蛋白，研究大米蛋白、脂肪含量对大米粉的理化特性的影响，发现蛋白质在大米中抑制了淀粉凝沉，对大米粉的热特性有显著影响。Martin 等^[51]通过水解蛋白质和破坏二硫键，发现蛋白质结构被破坏后，淀粉糊化黏度曲线下降。蛋白质在大米中含量及分布的不同，以及其与脂肪与淀粉的相互作用会导致在大米粉的理化性质发生变化，可能会对米饭的食用品质造成影响。

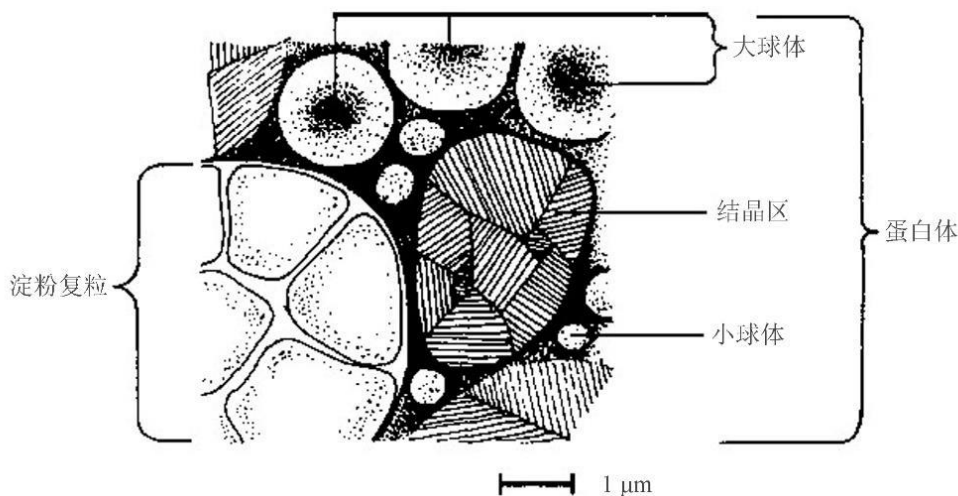


图 1-1 大米胚乳中淀粉颗粒与蛋白的结构图^[37]

Fig. 1-1 Structural diagram of starch granules and proteins in rice endosperm^[37]

1.2.1.3 脂肪

除了大米淀粉和蛋白质以外，脂质是大米粉中与淀粉颗粒结合的主要成分，包括脂肪和类脂，谷物中的脂质主要是单酰基脂质，包括游离脂肪酸和溶血磷脂^[40]。不同品种和不同生长环境下的稻米，其中含有的脂肪含量区别较大。研究发现，大米淀粉和脂肪的链接方式有三种：（1）存在于淀粉颗粒外部，游离脂质与淀粉表面的结合蛋白形成复合物，这类脂质通常可以被去除；（2）存在于淀粉颗粒内部，一般是淀粉结合脂质，在特定条件下一般可以去除；（3）结合脂质与淀粉颗粒的结合非常紧密，难以被去除。这类脂质的含量与淀粉的类别相关，籼米中的结合脂质含量较低，可忽略不计^[52]。大米中的脂肪和淀粉之间的相互作用，会形成淀粉-脂肪复合物，影响大米粉理化和功能性质。

1.2.2 大米粉和大米淀粉的功能特性

1.2.2.1 糊化特性

糊化特性是大米粉的重要特性之一，淀粉作为大米粉的重要成分，是重要的研究对象。淀粉颗粒不溶于冷水，当颗粒暴露在热水条件下时，淀粉颗粒会发生不可逆的膨胀和内部晶体结构的破坏，形成粘稠的透明糊溶液，这种现象称为糊化^[53]。糊化过程中，淀粉由有序晶体转变成无序非晶体，并发生能量变化^[54]。糊化分为三个阶段进行^[55]：（1）可逆吸水阶段：在达到糊化温度之前，水分子进入淀粉颗粒内部，与无定形区的羟基结合或被吸附，体积略有膨胀，但颗粒内部结晶结构不受影响。（2）不可逆吸水阶段：淀粉与水的体系加热到糊化温度时，淀粉颗粒之间相互碰撞挤压，直链淀粉渗出。温度进一步升高后，氢键断裂，晶体结构解体、双折射消失，晶体状态无法复原。（3）崩解阶段：淀粉糊化后，体系温度仍然持续升高，溶胀的淀粉颗粒发生破裂，完全崩解，相互之间联结、缠绕，形成一个网状的含水胶体，即常见的糊状体。淀粉的糊化特性会受作物的生长环境的影响，研究发现，盐碱培育出的稻米，其米粉中的蛋白含量和脂肪含量都有不同程度的升高，这将会影响大米粉糊化过程中的淀粉与水分子的结合，进而影响淀粉的糊化^[26]，主要在糊化特征值的变化上有所体现。

1.2.2.2 回生特性

淀粉回生，又称淀粉老化，是分散的淀粉分子又重新结合形成晶体结构。淀粉回生的本质是在温度逐渐降低的情况下，淀粉稀溶液中淀粉分子的运动逐渐减弱，分子间相互靠拢，氢键不断缔合，逐渐硬化^[56]。这种结合与原有淀粉分子的晶体结构不同，是不规则的，因此与原淀粉的性质有所差异。淀粉老化分为短期老化和长期老化两个阶段^[57]。短期老化主要由发生在淀粉糊化后冷却的几小时内，主要是直链淀粉分子的定向迁移，分子之间有序胶凝，聚集形成晶体。淀粉长期老化所需时间缓慢，主要由支链淀粉外侧短链的重结晶引起，须较长时间才能完成，且有热可逆性^[58]。短期老化期间，直链淀粉分子形成晶核，为长期老化提供晶种，支链淀粉以此为中心，结晶有序增长进一步形成晶体，形成淀粉的长期老化过程^[59]。淀粉的老化性质与储藏温度^[60]、直链淀粉和支链淀粉的比例^[61]、支链链长^[62]等因素密切相关。

1.2.2.3 流变特性

大米粉的流变特性与食品的质量控制和稳定性以及工艺优化方面有着重要意义，流变特性是食品物性学的研究中心，剪切应力、损耗模量和贮能模量是重要流变学参数^[63]。淀粉糊化后形成的凝胶可看作是一种混合体系，支链淀粉碎片作为分散相，可溶性淀粉作为分散介质，且主要以直链淀粉为主，淀粉糊的流变特性由分散相和分散介质等因素共同决定^[64]。在淀粉凝胶的形成过程中，淀粉颗粒膨胀，更多直链淀粉渗出，形成三维网状结构^[65,66]，因此在膨胀过程中，直链淀粉既可被认作是稀释剂，也可以是抑制剂^[67]。淀粉糊是一种典型的假塑性非牛顿流体，其粘度会随着剪切速率增加而下降^[68]。大米粉的流变特性会因淀粉的来源^[63]、淀粉糊的浓度^[69]、蛋白质的含量^[70]、直链淀粉和支链淀

粉的含量^[71]、温度^[72]等而受到影响。淀粉糊的流变特性与淀粉基食物的品质和稳定性有密切的关系，能够根据该特性的表征，预测和解释流动和形变，以及淀粉类食品处理过程中可能会发生的质地变化情况^[73]。

1.2.2.4 消化特性

淀粉是人类摄入能量的主要来源，研究其消化特性对人体健康具有较为重要的意义。根据淀粉在人体的消化特点，Englyst 等人^[74]将淀粉分为以下三种类型：快消化淀粉（Rapidly digestible starch, RDS）、慢消化淀粉（Slowly digestible starch, SDS）、抗性淀粉（Resistant starch, RS）。RDS 是指在小肠中能被快速消化吸收的淀粉（消化时间 <20 min）；SDS 是指在小肠中能被完全消化吸收但消化速度缓慢的淀粉（消化时间为 20~120 min）；RS 是指在小肠内不能被消化吸收而被排到大肠中的组分（消化时间 >120 min）。淀粉的消化性会影响血糖生成指数（Glycemic index, GI），长期食用高含量 RDS 的食物会给人体带来一定的健康风险，例如增加患糖尿病、肥胖症等疾病的风险。低 GI 食物中含有较多的 SDS 与 RS，能够有效维持餐后的血糖稳定^[75]。

1.3 大米淀粉的提取方法

大米淀粉作为大米粉中含量最多的成分，其纯度会影响大米粉和淀粉的功能特性^[76]。当分离大米淀粉时，蛋白质和脂质的脱除程度也会影响大米淀粉的功能特性，如若有较多的蛋白质和脂质残留，将会导致提取出的淀粉无法长久保存，出现特殊气味等诸多不利的影 响，因此，除蛋白是提取淀粉的关键。目前，大米淀粉的分离提取方法主要包括碱提法、酶法、表面活性剂法、超声波法和物理分解法。

1.3.1 碱提法

碱提法是目前工业化制备大米淀粉最常用的方法^[77]。大米中的蛋白质主要是谷蛋白和醇溶蛋白，约占大米蛋白的 80%，因此，普通的水磨和水洗等方法无法将蛋白去除。碱液可以使淀粉颗粒与大米蛋白的紧密结构变疏松，同时对蛋白质分子间的次级键，特别是氢键有破坏作用，可使某些极性基团发生解离致使蛋白质分子表面具有相同的电荷，从而对蛋白质分子有增溶作用，促进淀粉和蛋白质的分离^[78,79]。

碱液的浓度一般为 0.2%~0.5%的氢氧化钠溶液，以此浸泡大米或者大米粉，随后湿磨得到悬浮液混合体系，水洗多次除去碱液和脱除的大米蛋白，即可得到大米淀粉。这种方法工艺简单，蛋白脱除率高，且制备的淀粉纯度较高。

1.3.2 酶法

酶法分离大米淀粉的原理是利用蛋白酶水解包裹在大米淀粉颗粒外部的蛋白质，使得蛋白体和淀粉之间的结合由紧密转为疏松，蛋白质从而在水解过程中逐渐与淀粉分离，常用的蛋白酶有碱性、中性和酸性蛋白酶。在此过程中，通常需要使用 NaOH 来调控 pH 以达到酶的最适条件。反应结束后，需多次水洗至水解液呈中性。Lumduwong 等^[82]研究发现碱法与酶法提淀粉相比，酶法需要更多的碱液去维持反应过程中的 pH 条件，可能会产生较多的碱液废料和盐离子，并且制得的大米淀粉中残留的蛋白含量也略

高于碱提淀粉。同时，大多研究学者认为酶法反应的条件相对温和，淀粉和其他营养物质的结构和性质不易遭到破坏，同时分离得到的大米蛋白组分可以回收利用^[80,81]。

1.3.3 表面活性剂法

表面活性剂法利用烷基苯磺酸钠等表面活性剂与蛋白质结合，两者形成络合物变形而分离出淀粉^[83,84]，该方法是实验室常用的分离淀粉的方法。将大米浸泡在 3~4 倍体积的表面活性剂中 24~48 h，舍弃上清液，残余部分干燥研磨后即可得到大米淀粉成品。在提取大米淀粉的过程中，表面活性剂的用量较大，导致生产成本升高，且表面活性剂与大米蛋白络合后难以分离，无法回收利用^[85]，在水洗表面活性剂过程中仍然会产生废水处理困难的问题。

1.3.4 超声波法

超声波法是利用超声将淀粉外周的蛋白破损，从而达到分离淀粉的目的。Wang^[86]等在研究发现高强度超声波与中性蛋白酶组合才能提高大米淀粉的分离效果且使用该方法分离大米淀粉是一种不产生高盐废物的有效方法，但是超声处理后大米淀粉的破损率增加，同时其峰值黏度也有所增加。

1.3.5 物理分解法

美国农业部南部实验中心的科学家 Harmeet Guraya 利用名为 Microfluidizer 的新型均质器所产生的高压，对大米淀粉和蛋白质聚集体进行物理分解。这种新工艺的优点是可保留所提取大米淀粉和蛋白的原有品质，具有更好的完整性与功能性，且不产生工业废弃物。但是，高昂的机器价格限制了该方法的工业化应用^[87]。

1.4 立题背景与研究意义

众所周知，大米作为一种世界性的粮食作物，可以提供优质的大米淀粉和蛋白质，全世界有超过一半的人口将大米作为基础的主粮，以此来获取较高的热量和其他功能性成分。但是近年来，随着世界人口的持续增长，人类对世界粮食的产量需求有进一步的提高，需要更多的粮食生产来维持食品供给。与此同时，盐碱危害和气候变暖等环境问题导致粮食的生产受限，其中盐碱危害是影响全球稻田作物生产的严重问题，它妨碍作物的正常生长，限制作物产量潜力的正常发挥。因此，提高粮食作物的产量和质量成为了全球亟待解决的问题。袁隆平院士团队首先在中国成立海水稻研究中心，开展关于海水稻产量提升的研究，在改善盐碱滩涂状况的同时，提高粮食作物产量。相比于国内研究，国外研究更倾向于海水稻耐盐碱的生理机理、耐盐碱水稻的筛选与培育以及生理遗传方面的研究。随着耐盐碱水稻产量的提升，其食用和加工品质受到了研究学者的关注，针对其表观特性、理化性质的研究逐渐展开，研究已经发现盐碱培育环境会显著影响籽粒长宽比，且不同基因型的稻谷在盐碱培育下，胶稠度和直链淀粉含量都会受到较为显著的影响。淀粉作为大米粉中的主要成分，是决定大米粉理化性质和功能特性的关键因素，探究盐碱培育环境对大米淀粉的分子结构和理化特性的影响，能够更加深入地剖析盐碱条件对耐盐碱水稻米粉和淀粉的理化功能特性以及后续应用的影响。但是目

前，盐碱水稻米粉和淀粉理化功能特性与结构特征方面的研究数据还较为匮乏，这将会限制耐盐碱水稻米粉和淀粉的后续开发及市场应用。

因此本研究在现有耐盐碱水稻稻米资源的条件下，探究盐碱培育浓度对耐盐碱水稻米粉和淀粉的结构特征及理化功能特性方面的影响，以期今后耐盐碱水稻米粉和淀粉的深加工应用提供更加全面的理论参考和数据支撑，这对国民农业发展及食品民生具有较为重大的意义。

1.5 主要研究内容

本论文主要对湖南杂交水稻研究中心提供的 3 种耐盐碱水稻（T477S/粤禾丝苗、广湘 24S/RA65、2020X2L547）的共计 9 个样品的理化功能特性和结构进行表征，这 9 个样品为上述 3 个品种的水稻分别在盐碱浓度为 0%、0.3% 和 0.6% 的条件下培育获得。

本课题的主要研究内容如下：

- （1）对耐盐碱水稻在不同盐碱浓度条件下培育所得大米的外观大小进行测定分析。
- （2）探究盐碱浓度对耐盐碱水稻米粉的蛋白质、直链淀粉含量等基本组成成分的影响，结合 SEM、RVA、DSC、XRD、FT-IR 等分析方法探究盐碱浓度对耐盐碱水稻米粉理化功能性质和结构特征的影响。
- （3）耐盐碱水稻淀粉的提取与其理化功能性质和结构特征的探究。采用碱提和酶解相结合的方法提取耐盐碱水稻淀粉，通过测定分子量分布、支链链长分布等方式探究其分子结构的变化，并对其理化功能性质进行测定，进而为耐盐碱水稻的深加工利用提供更加科学深入的理论和数据支撑。

2 实验材料与amp;方法

2.1 实验材料与amp;试剂

耐盐碱水稻稻谷 9 份，湖南杂交水稻研究中心提供（详细见表 1-1）；普鲁兰酶、直链淀粉试剂盒，爱尔兰 Megazyme 公司；淀粉转葡萄糖苷（AMG）酶、猪胰腺 α -淀粉酶、普鲁兰多糖标准品，上海 Sigma 公司；实验所使用的试剂均为分析纯，购自上海国药集团化学试剂有限公司。

表 2-1 耐盐碱水稻稻谷信息
Table 2-1 Information of saline-tolerant rice

品种	盐碱培育浓度（%）	文中简写
	0.0	YSM@0.0
T477S/粤禾丝苗	0.3	YSM@0.3
	0.6	YSM@0.6
	0.0	GSR@0.0
广湘 24S/RA65	0.3	GSR@0.3
	0.6	GSR@0.6
	0.0	GXL@0.0
2020X2L547	0.3	GXL@0.3
	0.6	GXL@0.6

2.2 主要仪器

FC2R 型实验用砻谷机，VP-32 型实验用碾米机，JMWT 12 大米外观品质检测仪，日本佐竹公司；RVA 4500 型快速粘度分析仪，澳大利亚波通公司；LXJ-IIIB 型低速大容量多管离心机，上海安亭科学仪器厂；HYP-314 消化炉，上海纤检仪器有限公司；脂肪抽提器，上海沪南科学仪器联营厂；WFZ UV-2000 型紫外可见分光光度计，尤尼科上海仪器有限公司；BT-9300S 激光粒度分布仪，丹东百特仪器有限公司；DSC 3 型差示扫描量热仪，SevenEasy pH 计，瑞士 Mettler-Toledo 公司；DISCOVERY HR-3 型流变仪，美国 TA 仪器公司；IS10 型傅里叶红外光谱仪，美国 Nicolet 公司；D2 PHASER 型 X 射线衍射仪，德国布鲁克 AXS 有限公司；Quanta 2000 型扫描电子显微镜，美国 FEI 公司；Waters 2695 高效液相色谱仪，美国 Waters 公司；UV-3200 紫外分光光度计，上海美谱达仪器有限公司；Styragel HMW（6E、2E）色谱柱，美国 Waters 公司。

2.3 实验方法

2.3.1 稻谷前处理

对所得稻谷进行清理后，采用烘干机处理稻谷样品，保持稻谷的水分含量在 12.5%~14.5%，随后进行砻谷和碾米处理。首先用砻谷机脱除稻壳获得糙米，并选用 1.95

mm 孔径的厚度机去除未成熟粒。之后, 选用碾米机除去糠层获得精米, 约碾米 35 s, 使加工精度达到国家标准三级大米。最后, 选用角度为 45°的长度机除去碎米粒, 将最终得到的精米样品放入 4°C冰箱保存, 供后续实验使用。

2.3.2 大米粒型品质测定

采用图像扫描仪和带有大米外观品质分析软件的计算机测定精米的粒型品质。整精米混匀后取出约 1000 粒作为实验样品, 将试样置于扫描仪玻璃板上, 扫描试样, 即可获得精米试样图像。并且大米外观品质分析软件可直接检测得出大米的长度、宽度和粒型(长宽比)。

2.3.3 米粉和淀粉的制备工艺

将精米用粉碎机粉碎, 并过 100 目筛, 得到耐盐碱水稻米粉。将米粉与 0.2% NaOH 溶液按照固液比 1:10 (w/v) 混合搅拌 5 h, 使米粉在碱液中分散。之后, 米粉与 NaOH 溶液混合物在 4500 r/min 条件下离心 10 min, 弃去上清液, 沉淀物用适量去离子水洗涤, 上述步骤重复数次。沉淀物加适量水搅拌分散, 用盐酸调节分散液 pH, 加入碱性蛋白酶, 置于酶反应器中在一定温度下反应一定时间, 反应结束后调分散液 pH 至 7, 水洗 2 次得湿淀粉, 冻干后粉碎, 过 100 目筛后得到淀粉样品, 置于干燥器中储藏备用。

2.3.4 基本化学成分分析

耐盐碱水稻米粉和淀粉的水分含量测定参照国家标准 GB/T 5009.3-2016 的直接干燥法; 直链淀粉含量的测定参照 GB/T 15683-2008; 蛋白质含量参照 GB/T 5009.5-2016 的凯氏定氮法; 脂肪测定参照 GB/T 5009.6-2016 的索氏抽提法; 灰分测定参照 GB/T 5009.4-2016 的食品中总灰分测定。

总淀粉的测定在 GB/T 5009.9-2016 酶水解法的基础上进行了改进, 具体实验方法如下: 100 mg 待测米粉与 10 mL 醋酸钠溶液 (0.1 mol/L, pH=5) 混合, 制成 1% 的样品溶液。随后向溶液中加入 300 U 耐高温 α 淀粉酶, 震荡 3 s 后, 置于沸水浴中继续加热反应 15 min。反应结束, 混合物放在 50°C 水浴环境中一定时间以平衡温度, 之后加入 326 U AMG (淀粉葡萄糖苷酶), 继续在 50°C 水浴中反应 30 min, 反应过程中每 5 分钟震荡 1 次。上述步骤全部结束后取出反应样品冷却至室温, 之后在 13000 r/min 条件下离心 5 min, 取出 1 mL 上清液稀释 5 倍后按 1:30 (v/v) 加入 GOPOD, 50°C 下反应 20 min 后, 在 510 nm 处测定吸光度。总淀粉含量的计算公式如下:

$$X = (A \times F \times EV \times D) / M \quad (2-1)$$

式中: X——样品总淀粉的含量 (%);

A——所测得的吸光度值;

F——吸光度值转换为葡萄糖的因子, 本实验取 94.3;

EV——样品最终体积, 本实验为 10.2 mL;

D——稀释倍数, 本实验为 5;

M——样品质量 (mg)。

2.3.5 颗粒形貌表征 (SEM)

利用扫描电镜测定耐盐碱水稻米粉和淀粉的形态结构。将淀粉样品用双面胶带固定在铝片上,喷金,采用 5.0 kV 加速电压拍摄图像,分别以放大 2000 倍和 5000 倍的放大倍率观察米粉和淀粉样品的图像。

2.3.6 粒径分布测定

利用激光衍射粒度仪测定耐盐碱水稻米粉和淀粉的粒径分布。称取 100 mg 样品置于 15 mL 离心管中,加入 5 mL 蒸馏水,充分震荡混匀。测试过程中,控制折射率在 10%~15%,超声 3 min,采用连续测试模式。

2.3.7 X-射线衍射分析 (XRD)

利用 X-射线衍射仪器获得大米淀粉的晶体结构和相对结晶度^[88]。测试条件为:扫描角度范围 4~40° (2θ),靶型: Cu/Kα,目标电压 40 kV,电流 30 mA,扫描速度 2°/min,步长 0.05°。实验数据利用 Jade 6.0 软件以及 Origin 2018 进行处理,计算样品的相对结晶度 (RC)。

$$RC(\%) = \frac{A_c}{A_a + A_c} \times 100 \quad (2-2)$$

其中 A_a 代表非结晶面积, A_c 代表结晶区面积。

2.3.8 傅里叶红外分析 (FT-IR)

采用傅里叶变化红外光谱仪-衰减全反射模式 (ATR)^[89,90]测定。用压头将样品紧压于 ATR 附件的晶体表面,扫描 60 次,分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描范围为 600~4000 cm^{-1} 。

2.3.9 小角 X-射线散射分析 (SAXS)

取 100 mg 淀粉,加入 100 μL 去离子水调制成分散乳,并将其放置在室温下平衡过夜。以去离子水为空白,测试条件设置为:加速电压为 50 kV,电流为 1 mA,产生电子辐射波长为 $\lambda=0.154 \text{ nm}$ ^[88]。

2.3.10 相对分子量分布测定

采用高效尺寸排阻色谱法 (HPSEC) 测定淀粉分子量,使用高效液相色谱仪与多角度激光散射和示差折光检测器 (HPSEC-MALLS-RID) 串联测定^[91]。将 50 mg 淀粉样品分散到含 10 mL 50 mmol/L LiBr 的二甲基亚砷 (DMSO) 溶液中,在沸水浴中加热 1 h,直到样品完全溶解,然后在 30°C 下的恒温水浴中搅拌 12 小时。溶解的样品在进样前用 0.22 μm 的有机系统膜过滤,之后注入 SEC-MALLS-RID 系统。色谱条件设置如下:色谱柱 Styragel 保护柱, Styragel HMW 2 DMF, Styragel HMW 6E DMF 三柱串联使用,流动相为经过超声的含有 50 mmol/L LiBr 的 DMSO 溶液,流速为 0.6 mL/min。柱温箱温度为 60°C。折光指数增量 (dn/dc) 为 0.06 mL/g。使用 Astra 5.3.4 软件进行数据分析。

2.3.11 支链链长分布测定

2.3.11.1 淀粉样品预处理

尺寸排阻色谱法用于测定支链淀粉的链长分布, 高效液相色谱仪配备示差检测器联用^[91]。称取 50 mg 淀粉样品放置于 15 mL 具塞玻璃棕色瓶中, 溶于 10 mL 90% (v/v) 的 DMSO 中, 沸水浴加热 0.5 h, 冷却至室温, 并于 25°C 的恒温酶反应器中搅拌过夜。准确移取 1 mL 溶液于 50 mL 离心管中, 加入 6 mL 无水乙醇混合均匀后 5000 r/min 离心 15 min, 弃除上清液, 并将离心管放置于通风处确保剩余的无水乙醇完全挥发。随后加入 9.0 mL 煮沸的超纯水, 并立即置于沸水浴中加热约 10 min 使沉淀完全溶解。溶液冷却至 50°C, 加入 40 μ L 50 mmol/L 甘氨酸-盐酸缓冲液 (pH 3.5), 混匀后立即加入 7.5 μ L 普鲁兰酶 (1000 U/mL), 同样温度下脱支反应 48 h 后, 将样品置于沸水浴中 10 min 灭酶。吸取 1 mL 溶液过 0.22 μ m 水系滤膜后趁热进样。

2.3.11.2 色谱条件

色谱分离流动相为超纯水, 流速为 1 mL/min, 色谱柱 Shodex SB-802.5 HQ 和 SB-804 HQ 串联使用, 柱温箱温度为 60°C, 检测器温度为 30°C, 进样量为 20 μ L。以 1 mg/mL 的麦芽五糖、麦芽七糖和普鲁兰多糖 (P-5、P-10、P-20、P-50、P-100) 作为标样。依据上述标样制定标准曲线计算样品脱支后 DP。

2.3.12 氨基酸组成分析

称取 100 mg 样品置于密封的水解管中, 加入 8 mL 的 6 mol/L HCl, 通入 3 min 氮气后密封。120°C 条件下水解 24 h 后取出, 并用 10 mmol/L 的 NaOH 进行中和后定容、过滤和离心 (14000 r/min)。然后采用自动氨基酸分析仪, 在 38°C 和 1 mL/min 的流速条件下测 254 nm 处测定吸光度^[92]。氨基酸的含量表示为: g/100 g 蛋白质。色氨酸 (Trp) 由于在酸性下易被降解而未检测到。

2.3.13 持水持油性测定

持水持油性的测定参照 Li^[93] 的方法并做适当修改。称取大约 100 mg 样品置于 5 mL 样品管中, 将所称样品与空样品管的克重分别准确记录为 m、m₁。加水或者大豆油浸没样品, 25°C 条件下水浴震荡 30 min 后, 4500 r/min, 30 min 条件下离心, 之后倒出上清液, 风干后称样品与样品管总重, 记录为 m₂。持水性与持油性的计算公式如下:

$$\text{持水性/持油性 (\%)} = \frac{m_2 - m_1 - m}{m} \quad (2-3)$$

2.3.14 溶解度和膨润力测定

溶解度和膨润力的测定参照 Xing^[94] 的方法并做适当修改。取米粉和淀粉样品于 50 mL 离心管中, 加入适量去离子水配制成 2% 的米粉乳和淀粉乳。用涡旋振荡器振荡 30 s 后, 分别在 50°C、70°C、90°C 的恒温水浴锅中振荡加热 30 min, 期间每 10 min 取出离心管用涡旋振荡器将样品混合均匀。离心管冷却至室温后, 4000 r/min 离心 20 min, 分离上清液和沉淀。将上清液转移入烘干至恒重的干净铝盒, 置于 105°C 烘箱烘干至恒重称量, 计算溶解度, 下层沉淀即为膨胀米粉或者膨胀淀粉。溶解度和膨润力的计算公式如下:

$$\text{溶解度} (\%) = \frac{\text{水溶样品重} (\text{g}) \times 100}{\text{样品干基质量} (\text{g})} \quad (2-4)$$

$$\text{膨润力} (\text{g/g}) = \frac{\text{离心管中沉淀物质量} (\text{g}) \times 100}{\text{样品干基质量} (\text{g}) \times (100 - \text{溶解度})} \quad (2-5)$$

2.3.15 热力学特性与amp;长期回生特性测定 (DSC)

利用差示扫描量热仪测定米粉和淀粉的热特性^[95]。准确称取 3 mg 样品加入 DSC 铝制坩埚中，并按照样品与水的比例为 1:3 (w/v) 补加适量去离子水，密封坩埚，于 4℃ 冰箱中均湿 12 h。测试前，以空坩埚作为参比，扫描程序设置为：起始扫描温度 30℃，终止扫描温度 100℃，升温速率为 10℃/min。初始糊化温度 (T_0)，峰值糊化温度 (T_p)，终值糊化温度 (T_c) 以及糊化焓 (ΔH) 的分析采用系统自带软件。测试后的淀粉样坩埚冷却至室温，装入密封袋中，立即放入 4℃ 冰箱冷藏，14 d 后取出，按照同样升温程序进行 DSC 热扫描，测试样品回生焓 (ΔH_r)。

2.3.16 糊化特性测定 (RVA)

在已知样品水分含量的基础上，以水分基为 12% 计算出所需样品质量与蒸馏水质量，用电子天平准确称量样品和蒸馏水，在 RVA 铝罐中将两者均匀混合 30 s，立刻将淀粉悬浮液放入仪器中。测试条件^[96]如下：起始温度 50℃ 维持 1 min，接着以 12℃/min 的速率使体系加热到 95℃，维持 2.5 min，最后以相同速率使体系冷却到 50℃，维持 2 min，总时间为 13 min。前 10 s 搅拌桨转速设置为 960 r/min，后续时间转速恒定为 160 r/min。测试数据由仪器自动分析和计算。

2.3.17 流变学特性测定

将 2.3.16 中糊化完成的米粉糊或淀粉糊在 25℃ 水浴锅中平衡温度 30 min，之后转移至流变仪平台上。选用 40 mm 铝制平板进行测试，板间距设置为 1 mm，轻轻刮掉粉团周围多余的部分，加硅油以防止水分蒸发，样品在测试前静置平衡 2 min 以消除加载样品所引起的机械作用影响。

静态学流变实验的测试条件为：设定温度恒定为 25℃，角频率为 1 rad/s，剪切速率设置为 0.01~100 s⁻¹ 递增，扫描频率为 1 Hz，实验用 power-law 方程 (2-6) 进行拟合^[97]。

$$\sigma = K\gamma^n \quad (2-6)$$

其中 σ 代表剪切应力， K 代表稠度系数， γ 代表剪切速率， n 代表流体行为指数。

动态粘弹性测试条件为：设定温度恒定为 25℃，角频率为 1 rad/s，应变为 0.01%~100% 的范围内进行振幅扫描测试，在线性黏弹区中选择合适的应变值。根据选择的应变值，在角频率为 1~100 rad/s 的范围内进行动态频率扫描测试，观察记录损耗模量 (G'')、贮能模量 (G') 和损耗角正切值 ($\tan\delta$) 随角频率的变化。

2.3.18 消化性测定

称取 100 mg (以干基计) 淀粉样品置于 50 mL 离心管中，加入 5 mL 现配的消化液和 5 颗玻璃珠，在 37℃ 水浴恒温振荡器振荡反应 120 min，振荡速率设为 100 r/min，消化液配制参考 Pan 等^[98]人的方法。分别于反应 10 min、20 min、30 min、40 min、60 min、

80 min、120 min 时从离心管中迅速吸取 100 μL 酶解液加入到 900 μL 无水乙醇中结束反应，在 14000 r/min 条件下离心 5min，随后用 D-葡萄糖试剂盒（GOPOD）测定葡萄糖含量。

$$\text{RDS}(\%) = \frac{G_{20} \times 0.9}{m} \times 100 \quad (2-7)$$

$$\text{SDS}(\%) = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{m} \times 100 \quad (2-8)$$

$$\text{RS}(\%) = 100 - \text{RDS} - \text{SDS} \quad (2-9)$$

其中， m 为初始样品质量（mg）， G_{20} 为反应 20 min 体系葡萄糖含量， G_{120} 为反应 120 min 体系葡萄糖含量。

2.3.19 数据处理与分析

实验数据使用 Origin 2018 与 GraphPad Prism 7 进行处理，并以平均值 \pm 标准差表示。采用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析， $p < 0.05$ 表示差异显著。

3 结果与讨论

3.1 耐盐碱水稻大米的外观品质

采用大米外观品质分析仪采集不同盐碱浓度培育所得水稻的大米外观图，由图 3-1 可以清晰地看出，随着盐碱培育浓度的增大，米粒大小逐渐减小，结合表 3-1 中大米的长宽特征指标分析可知，随着盐碱浓度的增大，YSM、GSR、GXL 三种耐盐碱水稻大米的长度和宽度均减小，长度的变化最为明显，减小幅度在 0.5~0.8 cm。这可能是因为盐碱胁迫干扰了水稻的光合作用以及代谢过程中的酶活性^[99]。光合作用是构成植物生产力的最重要生理活动，叶绿素是参与该过程的重要成分，盐碱胁迫能抑制植物叶绿素合成反应，并能增强叶绿素酶活性，以此减少叶绿素的合成，增加叶绿素的分解^[100]。在盐碱条件下，水稻的叶绿素含量的减少程度与盐胁迫程度呈正相关^[101]。此外，还有研究表明，气孔关闭是导致盐敏感植物在盐胁迫下光合作用下降的主要原因^[102]。在盐胁迫下，水稻细胞内 CO₂ 分压升高，不利于 CO₂ 进入细胞，保卫细胞的正常形态被破坏，气孔指向性减弱，CO₂ 的净同化率降低，从而削弱了光合作用，减少了光合产物的有效积累^[103]，最终影响水稻的生长发育和成熟期的各种代谢活动。

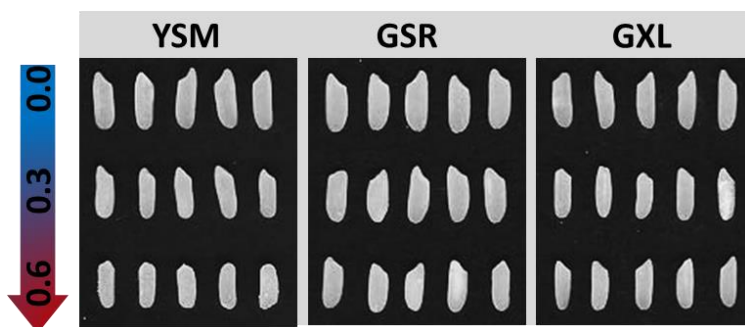


图 3-1 耐盐碱水稻大米的外观对比图

Fig. 3-1 Comparison picture of the appearance of saline-tolerant rice

表 3-1 耐盐碱稻米的长宽特征指标

Table 3-1 Indicators of length and width characteristics of saline-tolerant rice

样品	长宽比	长度 (cm)	宽度 (cm)
YSM@0.0	3.0 ± 0.4	6.0 ± 0.4	2.0 ± 0.1
YSM@0.3	2.9 ± 0.3	5.5 ± 0.3	1.9 ± 0.1
YSM@0.6	2.8 ± 0.4	5.2 ± 0.5	1.8 ± 0.1
GSR@0.0	2.8 ± 0.4	6.0 ± 0.5	2.2 ± 0.2
GSR@0.3	2.6 ± 0.3	5.4 ± 0.5	2.1 ± 0.2
GSR@0.6	2.6 ± 0.2	5.2 ± 0.2	1.9 ± 0.1
GXL@0.0	2.9 ± 0.7	5.6 ± 0.6	1.9 ± 0.2
GXL@0.3	2.9 ± 0.8	5.0 ± 0.5	1.7 ± 0.2
GXL@0.6	2.9 ± 0.4	5.1 ± 0.4	1.7 ± 0.1

3.2 耐盐碱水稻米粉和淀粉的基本化学组成

耐盐碱水稻米粉的基本化学组成如表 3-2。由表可知，不同盐碱培育浓度对耐盐碱水稻米粉的总淀粉、直链淀粉、蛋白质、脂肪和灰分含量均产生一定的影响。YSM、GSR、GXL 米粉的总淀粉含量均随着盐碱浓度的增加而减小。YSM、GXL 米粉的直链淀粉含量随着盐碱浓度的增加同样出现了下降的趋势。不同的是，GSR 米粉的直链淀粉含量在盐碱条件下增大，在 0.3%盐碱条件下达到最大值（19.16%）。因此，盐碱培育条件对耐盐碱水稻总淀粉与直链淀粉含量的变化受其品种影响，在本研究中整体呈下降趋势，这与贺奇^[29]等人的研究结果一致。盐敏感水稻在盐碱条件下培育时，其淀粉合成酶的活力会受到抑制，可能会导致其总淀粉和直链淀粉含量下降。

YSM、GSR、GXL 米粉的蛋白质、脂肪和灰分含量均随盐碱浓度增加而逐渐增加。植物在盐碱胁迫环境中需要克服渗透胁迫和离子胁迫才能维持自身正常生理代谢，目前已有研究表明植物的主要耐盐机理是离子选择性吸收^[35]，盐离子可通过转运蛋白运载进入植物体内，这可能是大米粉中灰分含量增加的原因。此外，在盐离子诱导下，植物可能产生更多的氮化物^[104]。Zeng 等^[105]发现受盐胁迫的水稻植株对氮元素的有效利用可能会增加，这会影响稻谷的蛋白质组成，使得蛋白质含量增加。表 3-2 显示，YSM、GSR、GXL 米粉中脂肪含量随着盐碱培育浓度增大而显著增大 ($p < 0.05$)，但均在 1.00%以下。高浓度的盐溶液会破坏植物细胞膜，导致溶质渗透到细胞外，正常生理代谢活动受到干扰，此过程可能干扰脂肪酶的活性，脂肪无法正常分解，导致植物体内脂肪含量增加。

表 3-2 耐盐碱水稻米粉的基本化学组成
Table 3-2 Basic chemical composition of salt-tolerant rice flours

样品	水分 (%)	总淀粉 (%)	直链淀粉 (%)	蛋白质 (%)	脂肪 (%)	灰分 (%)
YSM@0.0	12.14 ± 0.00 ^c	80.06 ± 0.87 ^{ab}	9.57 ± 0.07 ^e	6.98 ± 0.25 ^f	0.48 ± 0.03 ^{de}	0.49 ± 0.02 ^f
YSM@0.3	12.80 ± 0.01 ^a	80.48 ± 3.21 ^a	9.11 ± 0.29 ^{ef}	7.68 ± 0.13 ^d	0.52 ± 0.06 ^{cde}	0.66 ± 0.01 ^d
YSM@0.6	11.82 ± 0.15 ^e	75.52 ± 0.74 ^c	8.40 ± 0.00 ^f	8.22 ± 0.05 ^c	0.74 ± 0.10 ^b	0.71 ± 0.01 ^e
GSR@0.0	12.28 ± 0.02 ^b	77.67 ± 0.76 ^{abc}	17.80 ± 0.57 ^d	6.70 ± 0.00 ^f	0.58 ± 0.09 ^{cde}	0.48 ± 0.00 ^f
GSR@0.3	11.95 ± 0.04 ^d	79.95 ± 0.05 ^{ab}	19.16 ± 0.36 ^c	7.33 ± 0.06 ^e	0.65 ± 0.08 ^{bc}	0.59 ± 0.00 ^e
GSR@0.6	11.91 ± 0.01 ^d	75.69 ± 2.79 ^c	18.46 ± 0.07 ^{cd}	8.12 ± 0.06 ^c	1.00 ± 0.05 ^a	0.79 ± 0.01 ^a
GXL@0.0	10.55 ± 0.02 ^f	81.12 ± 1.54 ^a	24.01 ± 0.93 ^a	6.62 ± 0.06 ^f	0.46 ± 0.05 ^e	0.63 ± 0.00 ^d
GXL@0.3	9.72 ± 0.09 ^g	78.65 ± 1.89 ^{abc}	23.20 ± 0.50 ^{ab}	9.53 ± 0.12 ^b	0.63 ± 0.03 ^{bcd}	0.69 ± 0.00 ^e
GXL@0.6	10.00 ± 0.00 ^h	76.17 ± 0.54 ^{bc}	22.55 ± 0.57 ^b	10.13 ± 0.05 ^a	0.66 ± 0.04 ^{bc}	0.75 ± 0.00 ^b

注：同列数据后不同字母表示组间差异显著 ($p < 0.05$)。

大米淀粉是采用碱提与酶解相结合的方法脱除大米粉中的蛋白质和脂肪后得到的，其基本成分如表 3-3。大米淀粉纯度大约为 92.37%~96.77%，蛋白含量为 0.23%~0.72%，脂肪含量降低到了 0.15%以下。在同样的脱脂脱蛋白条件下，不同盐碱浓度培育的同种耐盐碱水稻淀粉的纯度接近，但是 GXL 米粉的蛋白质更难脱除，说明 GXL 米粉中淀粉与蛋白质结合最为紧密。

表 3-3 耐盐碱水稻淀粉的基本化学组成
Table 3-3 Basic chemical composition of salt-tolerant rice starches

样品	水分 (%)	总淀粉 (%)	蛋白质 (%)	脂肪 (%)
YSM@0.0	3.16 ± 0.28	94.45 ± 0.63	0.23 ± 0.02	0.10 ± 0.02
YSM@0.3	3.26 ± 0.17	94.63 ± 0.17	0.36 ± 0.04	0.15 ± 0.03
YSM@0.6	2.98 ± 0.66	96.77 ± 0.94	0.46 ± 0.08	0.08 ± 0.04
GSR@0.0	2.82 ± 0.21	92.88 ± 1.49	0.60 ± 0.05	0.06 ± 0.03
GSR@0.3	3.23 ± 0.02	92.37 ± 1.46	0.61 ± 0.04	0.11 ± 0.03
GSR@0.6	3.26 ± 0.22	95.16 ± 0.47	0.47 ± 0.01	0.05 ± 0.02
GXL@0.0	2.49 ± 0.13	93.49 ± 1.19	0.62 ± 0.00	0.14 ± 0.10
GXL@0.3	2.36 ± 0.07	92.74 ± 1.53	0.71 ± 0.06	0.14 ± 0.06
GXL@0.6	2.63 ± 0.10	94.07 ± 0.23	0.72 ± 0.05	0.07 ± 0.06

3.3 耐盐碱水稻米粉和淀粉的结构特征

3.3.1 耐盐碱水稻米粉和淀粉的颗粒形貌

在不同盐碱培育浓度条件下所得 YSM、GSR、GXL 米粉的颗粒形态如图 3-2 所示。由图可以看出，所有样品的米粉颗粒形状均是不规则的，淀粉颗粒被蛋白质大分子紧紧包裹。同一品种的大米粉样品，随着盐碱培育浓度的增大，米粉颗粒的团聚变得更加紧密。正常培育所得米粉的扫描电镜图显示，米粉颗粒周围存在较多的单个淀粉颗粒，随着盐碱培育浓度的增大，散落的淀粉颗粒逐渐减少，这种变化趋势在 3 个品种中均有出现。由表 3-2 的大米粉基本成分可知，每个品种的蛋白质含量均随盐碱培育浓度的增大呈现增加趋势，这可能会导致有更多的蛋白体包裹淀粉颗粒，使得米粉团聚更加紧密。

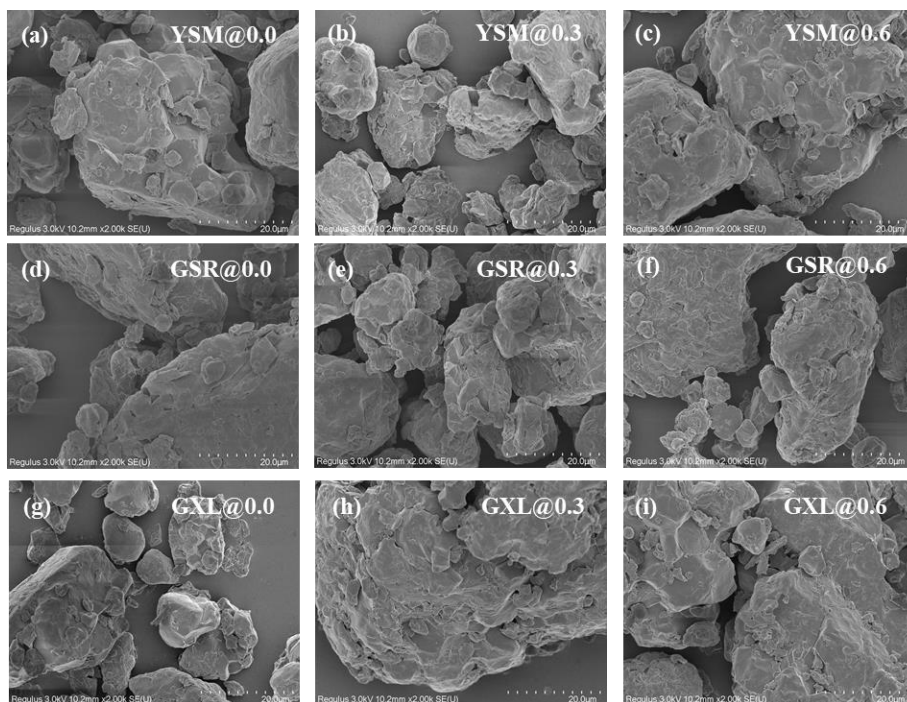


图 3-2 YSM、GSR、GXL 米粉的颗粒形态 (比例尺=20.0 μm)

Fig. 3-2 Morphology of rice flours for YSM、GSR、GXL (scale bar=20.0 μm)

脱脂脱蛋白之后的耐盐碱水稻淀粉颗粒形貌如图 3-3 所示。耐盐碱水稻淀粉颗粒呈现为多边形，大小约为 3-10 μm ，这与文献报道一致^[38]。部分淀粉颗粒表面出现了沟壑，这可能是碱提淀粉导致的^[106]。不同盐碱培育浓度下得到的淀粉未见明显的表现特征变化，说明盐碱处理后的大米淀粉仍然具有正常培育所得大米淀粉的形貌特征。0.3%和 0.6%盐碱培育浓度下的 YSM、GXL 淀粉相比原淀粉更小，GSR 的淀粉颗粒在盐碱培育浓度为 0.3%时最大，这与它们各自的直链淀粉含量变化趋势一致，即同一品种的淀粉粒径大小与其直链淀粉含量相关，即直链淀粉含量越高，淀粉粒径越大。

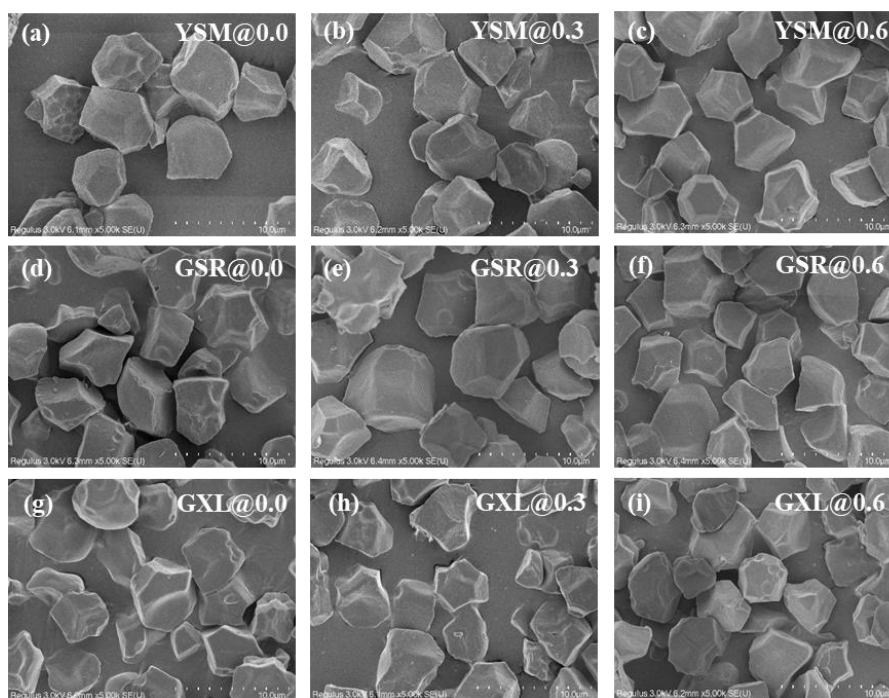


图 3-3 YSM、GSR、GXL 淀粉颗粒形貌（比例尺=10.0 μm ）

Fig. 3-3 Morphology of starch particles for YSM、GSR、GXL (scale bar=10.0 μm)

3.3.2 耐盐碱水稻淀粉的粒径分布

耐盐碱水稻淀粉的粒径分布见图 3-4，由于米粉是由干法粉碎获得，团聚体较多，其粒径分布无法精准测定，故未在文中给出。耐盐碱水稻淀粉颗粒的粒径呈双峰型分布这与 Zhong^[107]等的研究结果一致，两个峰分别出现在 2 μm 和 7 μm 处，但 GXL 淀粉颗粒粒径在 2 μm 的峰并不明显。耐盐碱水稻品种的不同可能是造成大米淀粉颗粒粒径分布出现差异的主要原因。以 2 μm 和 10 μm 为界限，可以将淀粉颗粒分为大型、中型、小型^[108-111]，已有研究表明，大米淀粉的大颗粒在灌浆期出现，之后会分解成为中、小颗粒，随着中、小淀粉颗粒的占比增多，大颗粒会逐渐减少^[112]。D10、D50 和 D90 分别表示颗粒累积分布为 10%、50%以及 90%的粒径。由表 3-4 可知，随着盐碱培育浓度的增大，YSM 与 GXL 淀粉的 D50 显著减小 ($p<0.05$)，小型淀粉颗粒占比逐渐增多，大型颗粒占比显著减小 ($p<0.05$)。GXL 淀粉的小颗粒占比从 15.24%增至 19.03%，大颗粒占比从 11.81%降至 2.66%，变化最明显。GSR 淀粉的 D50 在 0.3%盐碱培育条件下最大 (6.28 μm)，大颗粒占比高于 GSR@0.0 淀粉，与耐盐碱水稻淀粉 SEM 图像表现一致。

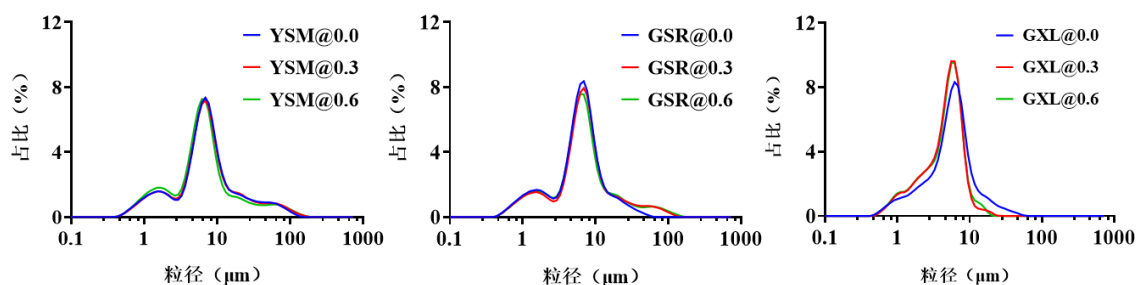


图 3-4 耐盐碱水稻淀粉的粒径分布

Fig. 3-4 Particle size distribution of saline-tolerant rice starches

表 3-4 耐盐碱水稻淀粉的粒径参数

Table 3-4 Particle size parameter distribution of saline-tolerant rice starches

样品	小颗粒占比 ($<2\ \mu\text{m}$) (%)	中颗粒占比 ($2-10\ \mu\text{m}$) (%)	大颗粒占比 ($>10\ \mu\text{m}$) (%)	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
YSM@0.0	15.68±0.29 ^{de}	60.00±0.40 ^g	24.33±0.11 ^a	1.43±0.01 ^{bc}	6.44±0.00 ^a	27.04±0.01 ^b
YSM@0.3	15.38±0.24 ^e	59.83±0.21 ^g	24.79±0.03 ^a	1.48±0.03 ^{ab}	6.39±0.01 ^{ab}	28.63±0.01 ^a
YSM@0.6	17.15±0.38 ^c	62.24±0.96 ^f	20.61±0.58 ^b	1.32±0.03 ^e	5.82±0.06 ^c	25.87±0.02 ^c
GSR@0.0	16.90±0.04 ^c	68.32±0.13 ^d	14.78±0.17 ^c	1.30±0.03 ^e	5.80±0.05 ^c	24.42±0.12 ^d
GSR@0.3	15.61±0.07 ^{de}	63.90±0.04 ^e	20.49±0.03 ^b	1.38±0.01 ^{bcd}	6.28±0.09 ^b	22.34±1.24 ^e
GSR@0.6	16.08±0.11 ^d	63.39±0.20 ^e	20.53±0.08 ^b	1.30±0.10 ^e	5.75±0.08 ^c	21.70±0.05 ^e
GXL@0.0	15.24±0.15 ^e	72.95±0.25 ^c	11.81±0.09 ^d	1.58±0.03 ^a	5.37±0.04 ^d	11.50±0.03 ^f
GXL@0.3	18.49±0.16 ^b	78.86±0.36 ^a	2.66±0.20 ^f	1.43±0.01 ^{bc}	4.61±0.01 ^e	7.59±0.02 ^g
GXL@0.6	19.03±0.12 ^a	77.75±0.03 ^b	3.23±0.15 ^e	1.37±0.02 ^{de}	4.61±0.08 ^e	7.80±0.05 ^g

注：同列数据后不同字母表示组间差异显著 ($p<0.05$)。

3.3.3 耐盐碱水稻米粉和淀粉的 X-射线衍射分析

X-射线从不同角度穿过晶格的内部缝隙后产生衍射现象，出现不同的衍射图谱其中衍射峰表示结晶区，弥散峰表示无定形区^[113]。如图所示，所有耐盐碱水稻米粉和淀粉样品的 XRD 图谱在 $2\theta=15.13^\circ$ ， 17.31° ， 18.08° ， 23.10° 均出现衍射峰，说明盐碱处理后的淀粉仍然是典型的 A 型结晶结构。与此同时，在 12.5° 出现弱衍射峰，V 型结构的存在说明了淀粉-脂肪复合物的形成^[114]。耐盐碱水稻淀粉的 XRD 衍射图显示，脱脂脱蛋白后， 12.5° 峰消失，表明淀粉-脂肪复合物减少，淀粉重新聚集，A 型结晶结构增强。

此外，由表 3-5 可知，盐碱培育改变了耐盐碱水稻米粉和淀粉的相对结晶度。3 种耐盐碱水稻米粉的相对结晶度随着盐碱浓度的升高逐渐降低，米粉中蛋白含量升高，淀粉含量降低，导致米粉的相对结晶度降低。并且正常培育所得的 YSM、GSR、GXL 米粉的相对结晶度呈递减变化，与其各自的直链淀粉含量变化趋势相反。脱脂脱蛋白后，YSM、GSR 与 GXL 淀粉的相对结晶度高于其对应米粉，且随盐碱浓度的增大均显著增大 ($p<0.05$)。盐碱培育可能会改变耐盐碱水稻淀粉分子排列的紧密程度，进而影响淀粉长程有序化程度。并且由对耐盐碱水稻米粉和淀粉的基本化学成分研究可知，耐盐碱水

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/448062132024006042>