

网络出版时间:2014-06-21 18:03

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.07.035

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.07.035.html>

高直链玉米淀粉的理化特性研究

李志伟^{1,2}, 钟雨越¹, 吴权明¹, 王文斌^{1,2}, 高杰^{1,2}, 刘香香¹,
康慧敏¹, 郭东伟^{1,2}, 薛吉全^{1,2}

(1 西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨凌 712100; 2 农业部西北旱区玉米生物学与遗传育种重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】研究高直链玉米淀粉的理化特性, 为高直链淀粉玉米新品种的培育及高直链玉米淀粉的产业化开发利用提供参考。【方法】以源自 13 份高直链淀粉玉米自交系和 1 份普通玉米自交系的籽粒为材料, 研究了高直链玉米淀粉和普通玉米淀粉的淀粉粒表型特征、热特性、糊化特性、溶解度和膨胀势的差异。【结果】普通玉米淀粉中直链淀粉含量为 27.72%; 高直链玉米淀粉中直链淀粉含量为 44.22%~78.81%, 可分为Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ 4 个级别。SEM 结果显示, 随着直链淀粉含量的增加, A 型淀粉粒形态由饱满光滑、有蜡质光泽的球体或多面体变为皱缩无光泽的不规则多面体, B 型淀粉粒则由饱满光滑的小球体逐渐变为无蜡质光泽的椭圆形, 直至扭曲成不规则颗粒。随着直链淀粉含量的升高, 初始温度(T_0)、峰值温度(T_p)、最终温度(T_c)、温变范围(T_0-T_c)逐渐升高, 焓变(ΔH)则逐渐降低。普通玉米淀粉有明显的粘度峰, 糊化曲线呈现出典型的“双峰”特征, 高直链玉米淀粉的粘度峰随直链淀粉含量的增加逐渐消失, 曲线呈“S”型。普通玉米淀粉和高直链玉米淀粉的溶解曲线和膨胀曲线都显示了相同的趋势, 但溶解度和膨胀势随直链淀粉含量的增加而显著降低。【结论】与普通玉米淀粉相比, 高直链玉米淀粉在淀粉粒形态、热特性、糊化特性、溶解度和膨胀势等方面都表现出了不同程度的差异, 且直链淀粉含量越高差异越大。

【关键词】 玉米; 高直链淀粉; 热特性; 糊化特性; 溶解度; 膨胀势

【中图分类号】 S330.2

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2014)07-0053-08

Physicochemical properties of high-amylose maize starch

LI Zhi-wei^{1,2}, ZHONG Yu-yue¹, WU Quan-ming¹, WANG Wen-bin^{1,2},
GAO Jie^{1,2}, LIU Xiang-xiang¹, KANG Hui-min¹, GUO Dong-wei^{1,2}, XUE Ji-quan^{1,2}

(1 College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Maize in Arid Area of Northwest Region, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】High-amylose maize starch is an important industrial raw material. This study investigated its physicochemical properties to improve the cultivation of new varieties and industrial exploitation. 【Method】Using thirteen high-amylose maize inbreds and one common inbred (Zheng 58), the differences in phenotypic characteristics of starch granules, thermal properties, pasting properties, solubility and expansion power of high-amylose maize starch and normal maize starch were investigated. 【Result】The amylose content of common maize inbred starch was 27.72%. The amylose content of high-amylose maize inbred starch was 44.22%—78.81%, and could be divided into four levels. According to scanning electron micrographs, A-type starch granules from common inbred were full and smooth spheres or polyhedrons with waxy luster but those from high-amylose maize inbred were shrunken irregular and dull polyhed-

〔收稿日期〕 2014-01-20

〔基金项目〕 陕西省现代农作物种业项目(K332021315); 西北农林科技大学推广专项(Z222021317)

〔作者简介〕 李志伟(1986—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士, 主要从事作物遗传育种研究。E-mail: lizhiwei3705@163.com

〔通信作者〕 薛吉全(1964—), 男, 陕西武功人, 教授, 博士生导师, 主要从事玉米遗传育种和高产高效栽培技术研究。

E-mail: xjq2934@163.com

郭东伟(1973—), 男, 陕西杨凌人, 副教授, 主要从事玉米育种研究。E-mail: gdwei1973@126.com

rons. There were also significant differences in B-type starch granules and full and smooth spheres gradually changed to dull ovals, even to distorted irregular shapes. With increase of amylose content, T_o , T_p , T_c and $T_o - T_c$ gradually increased but ΔH gradually reduced. The pasting properties (RVA) of common inbred starch showed typical “doublets” curve, while that of high-amylose maize inbred starch showed “S” curve with the increase of amylose content. The melting curves and expansion curves of common inbred starch and high-amylose maize inbred starch showed same trends, while starch solubility and swelling degree decreased significantly with the increase of amylose content. 【Conclusion】 Compared to common corn starch, high-amylose corn starch was different in the phenotypic characteristics of starch granules, thermal properties, pasting properties, solubility and swelling power. The difference increased as the increase of amylose content.

Key words: maize; high-amylose starch; thermal property; pasting properties; solubility; swelling power

淀粉是重要的工业原料,其直支比(直链淀粉和支链淀粉的比例)是影响淀粉加工特性的主要因素之一。高直链淀粉是指直链淀粉含量超过总淀粉 50% 的淀粉。高直链淀粉具有普通淀粉不具备的许多优良特性和工业用途,其颗粒形态及理化特性是影响淀粉加工特性的重要参数,直接影响到淀粉的加工利用。目前,对小麦、大豆、水稻、普通玉米淀粉理化特性的研究报道较多^[1-4]。然而,在我国由于缺少高直链淀粉玉米种质,20 世纪 90 年代之前,尚未见有关这方面研究。近年来,高直链淀粉玉米品种培育已引起有关部门的重视,开始有研究机构从事相关研究,但仍处于起步阶段,有关不同级次高直链淀粉理化特征的研究仍相对较少^[5]。本研究以农业部西北旱区玉米生物学与遗传育种重点实验室自育的 13 个高直链淀粉玉米自交系和 1 个普通玉米自交系(对照)为材料,研究了玉米高直链淀粉和普通淀粉的淀粉粒形态结构、直链淀粉含量、热特性、糊化特性、溶解度和膨胀势的差异,以期高直链淀粉玉米新品种的培育及高直链玉米淀粉的产业化开发利用提供可靠参数。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的 13 份高直链淀粉玉米自交系,是农业部西北旱区玉米生物学与遗传育种重点实验室用 1 个田间高直链淀粉天然突变株与 13 个骨干自交系杂交,经 6 代回交选育而成的高直链淀粉玉米自交系;对照普通玉米自交系郑 58,由农业部西北旱区玉米生物学与遗传育种重点实验室提供。

1.2 玉米淀粉的制备

将玉米籽粒浸泡于 50 ℃、体积分数 0.25% 的亚硫酸溶液中 60 h,然后细磨、过滤、离心,去上清

液,加入 0.2% NaOH,4 h 后用 ddH₂O 洗涤,再加入丙酮,静置,离心去丙酮,真空抽滤,风干得玉米淀粉。

1.3 测定项目及方法

(1)直链淀粉含量测定参照 Zhu 等^[6]的双波长法(UV-visible spectrophotometer Evolution 300, Thermo,美国)。重复 9 次,取平均值。

(2)总淀粉含量采用近红外光谱分析法(DA7200,波通,瑞典)测定。重复 3 次,取平均值。

(3)淀粉粒 SEM 表型特征检测。将淀粉粒粘附于载物台,用离子溅射仪表面喷金,扫描电镜(S-3400N,Hitachi,日本)2.00K 和 3.00K 倍数下观察并拍照。

(4)热特性分析。参照 Li 等^[7]的方法进行差示热量扫描分析(DSC)。重复 3 次,取平均值。

(5)糊化特性分析。每样本取 2.5 g 干淀粉,参照 Jiang 等^[8]的方法(Super III, Petern,瑞典)检测淀粉的糊化特性。重复 3 次,取平均值。

(6)溶解度和膨胀势的测定参照 Jiang 等^[8]的方法。重复 3 次,取平均值。

1.4 统计分析

试验数据以 Microsoft Excel 2003 及 DPS6.5 处理软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 高直链玉米淀粉中直链淀粉和总淀粉的含量

表 1 结果表明,高直链玉米淀粉和普通玉米淀粉的直链淀粉含量存在显著差异,高直链玉米淀粉中有 2 个自交系的直链淀粉含量在 40%~50%;5 个自交系的直链淀粉含量在 50%~60%;3 个自交系的直链淀粉含量在 60%~70%;3 个自交系的直链淀粉含量超过 70%,依据董亚琳等^[9]的观点,可

以将 13 个高直链淀粉玉米自交系划定为Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ和Ⅶ级淀粉,为高直链淀粉玉米品种的选育提供理论依据。当直链淀粉含量低于 50%时,籽粒总淀粉在普通玉米自交系和高直链淀粉玉米自交系间有显

著差异,当直链淀粉含量超过 50%时,普通玉米自交系和高直链淀粉玉米自交系的籽粒总淀粉含量则明显降低,说明玉米直链淀粉含量的增加会导致玉米总淀粉含量的降低。

表 1 高直链玉米淀粉中直链淀粉和总淀粉的含量

Table 1 Amylose content and total starch content of high-amylose maize starch					
编号 No.	直链淀粉/% Amylose content	总淀粉/% Total starch	编号 No.	直链淀粉/% Amylose content	总淀粉/% Total starch
1	27.72±1.58 l	75.36±0.54 b	8	58.00±0.54 f	68.71±0.36 f
2	44.22±0.98 k	73.41±0.24 c	9	60.25±0.87 e	68.83±0.57 f
3	45.67±1.27 j	76.76±0.82 a	10	60.67±0.24 e	70.26±1.02 e
4	52.69±0.46 i	70.08±0.15 e	11	66.83±0.58 d	66.26±0.42 h
5	55.53±0.84 h	69.06±0.26 f	12	72.67±1.15 c	70.09±0.27 e
6	57.08±1.05 g	68.03±1.58 g	13	73.86±0.68 b	71.10±0.36 d
7	57.86±0.26 f	69.19±0.84 f	14	78.81±1.76 a	70.14±1.16 e

注:1. 普通玉米淀粉;2~14. 高直链玉米淀粉。同列数据后标不同小写字母者表示差异极显著($P<0.01$)。
Note:1. Common maize starch;2-14. High-amylose maize starch. Different lowercase letters in each column indicate extremely significant difference ($P<0.01$).

2.2 高直链玉米淀粉淀粉粒的表型特征

淀粉以淀粉粒形式存在于胚乳之中,依据淀粉粒的直径,银永安等^[10]将淀粉粒划分为 A 型和 B 型 2 种,其中 A 型为直径 $\geq 10\text{ }\mu\text{m}$ 的淀粉粒,B 型为直径 $<10\text{ }\mu\text{m}$ 的淀粉粒。图 1 结果表明,在普通玉米淀粉中,A 型淀粉粒呈饱满光滑的球体或多面体,B 型淀粉粒为饱满光滑的小球体(图 1-a);淀粉粒表面有明显蜡质光泽(图 1-b);部分淀粉粒表面分布有细小孔状结构,这可能是淀粉粒形成过程中不利的环境因素引起的,也可能与淀粉粒本身具有的淀粉酶有关^[11]。在直链淀粉含量为 55.53%的 5 号高直链玉米淀粉中,A 型淀粉粒形态发生明显皱缩扭曲,呈不规则的多面体,B 型淀粉则拉长呈明显的椭圆形,但淀粉粒依然饱满(图 1-c);A 型和 B 型淀粉粒表面依然有蜡质光泽(图 1-d)。随着直链淀粉含量的进一步增加,A 型淀粉粒进一步扭曲变形成不规则的颗粒状,淀粉粒直径也明显下降,视野内的小粒淀粉进一步增多(图 1-e);B 型淀粉粒则发生扭曲,呈不规则形状;淀粉粒表面缺少明显蜡质光泽(图 1-f)。

2.3 高直链玉米淀粉的热特性

DSC 主要反映淀粉晶体溶化过程中系统的能量变化和淀粉热稳定性^[12],直链淀粉含量是影响淀粉热稳定性的主要因素。如图 2 所示,直链淀粉含量较低的普通玉米淀粉和Ⅳ级玉米淀粉溶化时有明显的 G 峰,随着直链淀粉含量的增加,G 峰右移并逐渐不明显,直至近乎一条直线,说明随着直链淀粉

含量的增加,要破坏淀粉粒的结构需要更多的热能。当直链淀粉含量较高时,试验设计的处理条件可能尚无法破坏淀粉粒的结构,使 DSC 曲线不显示明显的吸热峰。

不同级别直链淀粉 DSC 的特征参数见表 2。初始温度(T_o)是晶体结构开始破坏时的温度,其大小表征淀粉晶体结构的稳定性。由表 2 可以看出,随着直链淀粉含量的增加, T_o 逐渐增加,变化范围在 65.75~70.11℃,各级淀粉之间差异显著,说明直链淀粉含量越高,破坏这样的淀粉结构需要更高的初始温度。峰值温度(T_p)反映了淀粉粒结构破坏过程中吸热最快时的温度。直链淀粉含量越高 T_p 越大,变化范围在 69.40~83.27℃,各级淀粉间差异显著。最终温度(T_c)为淀粉粒完全破坏时的温度。 T_c 也随着直链淀粉含量的升高而升高,普通玉米淀粉与Ⅳ级玉米淀粉之间无显著差异,但与其他各级淀粉差异显著。温变范围(T_o-T_c)代表初始温度到最终温度所跨越的温度范围,温变范围越大说明淀粉粒溶化所需的时间越长,晶体结构越不易破坏。温变范围随直链淀粉含量升高而升高,其中Ⅶ级玉米淀粉的温变范围达到普通淀粉的 2 倍多,这说明破坏直链淀粉所需要的能量更多,时间更长。焓变(ΔH)为破坏淀粉颗粒所吸收的热能。随直链淀粉含量的增加 ΔH 逐渐降低,且各级淀粉间差异显著。以上结果说明,高直链玉米淀粉的结构较普通玉米淀粉更稳定,需要吸收较多的热能才能破坏其淀粉粒晶体结构。

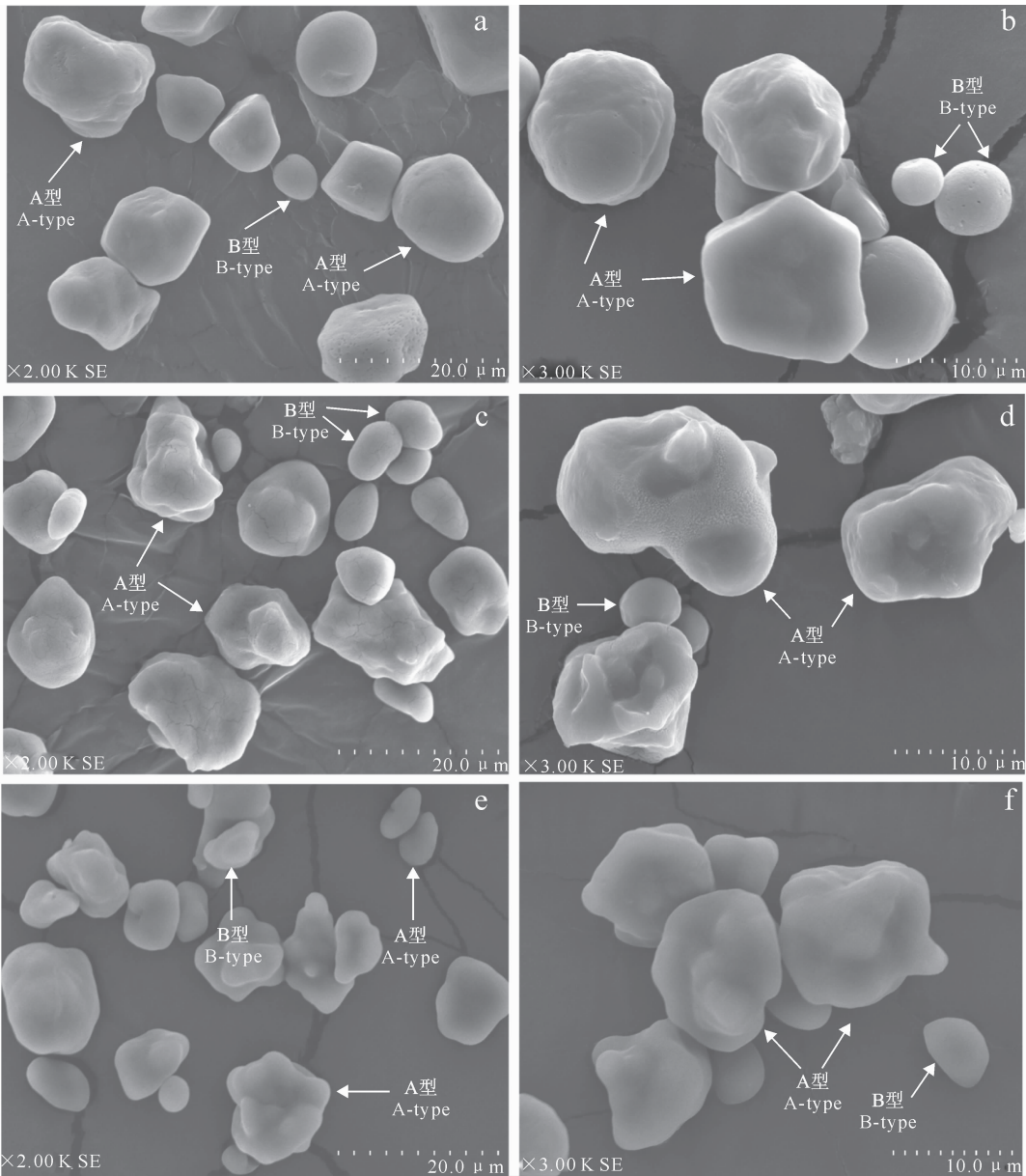


图 1 高直链玉米淀粉淀粉粒的 SEM 检测结果

a、b. 普通玉米淀粉;c、d. 5 号高直链玉米淀粉;e、f. 14 号高直链玉米淀粉

Fig. 1 Scanning electron micrographs of starch granules in high-amylose maize starch

a、b. Common maize starch;c、d. High-amylose maize starch of No. 5;e、f. High-amylose maize starch of No. 14

表 2 不同级别直链淀粉 DSC 的特征参数

Table 2 Characteristic parameters of differential scanning calorimetry for different amglöse

淀粉级别 Starch levels	初始温度/℃ <i>T</i> ₀	峰值温度/℃ <i>T</i> _p	最终温度/℃ <i>T</i> _c	温变范围/℃ <i>T</i> ₀ — <i>T</i> _c	焓变/(J·g ⁻¹) ΔH
CK	65.75±0.15 d	69.40±0.10 e	76.43±0.83 d	10.77±0.91 d	9.40±0.76 a
Ⅳ	66.37±0.15 d	71.08±0.16 d	78.19±0.36 d	11.27±0.23 d	7.56±0.69 b
Ⅴ	67.45±0.31 c	76.25±0.76 c	86.28±0.33 c	18.72±0.54 c	6.32±0.07 c
Ⅵ	68.29±0.12 b	79.37±0.22 b	90.71±0.16 b	22.61±0.34 b	4.66±0.41 d
Ⅶ	70.11±0.49 a	83.27±0.16 a	96.22±0.87 a	26.47±1.31 a	3.29±0.10 e

注:表中数据为 3 次重复的平均值,以“平均值±标准差”(n=3)表示。同列数据后标不同小写字母者表示差异极显著(*P*<0.01)。

Note:The data in the table are “average±standard deviation” (n=3). Different lowercase letters in each column indicate extremely significant difference (*P*<0.01).

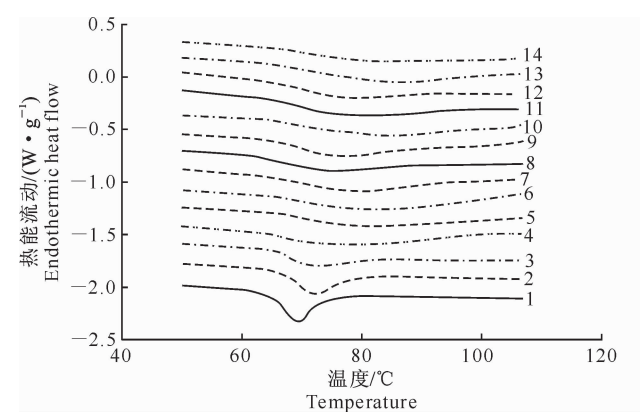


图 2 高直链玉米淀粉的差示热量扫描曲线

1. 普通玉米淀粉;2~14. 高直链玉米淀粉。下同

Fig. 2 Differential scanning calorimetric curves of high-amylose maize starch

1. Common maize starch;2—14. High-amylose maize starch.

The following figures are same

2. 4 高直链玉米淀粉的糊化特征

淀粉糊化现象是指随着温度的增加,淀粉逐渐吸水、膨胀、裂解,并溶解在水中形成凝胶,体系粘度明显增加的过程。由图 3 可以看出,普通玉米淀粉糊化曲线为典型的“双峰”曲线;随着直链淀粉含量的增加,淀粉的糊化曲线发生变化,粘度峰值逐渐降低并后延,糊化曲线逐渐呈“S”型;峰值粘度与最终粘度间的差值逐渐减小,粘度谷不明显。当直链淀粉含量超过 70%时,糊化曲线则呈水平直线状,没有明显的粘度峰。

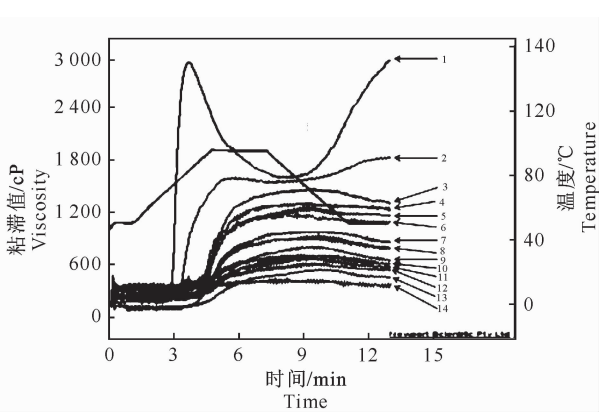


图 3 高直链玉米淀粉的糊化特征曲线

Fig. 3 RVA pasting curves of high-amylose maize starch

由表 3 可知,直链淀粉含量对各级淀粉的糊化参数有显著影响。当直链淀粉含量增加时,峰值粘度、最低粘度、衰减值、最终粘度及回生值均显著降低,而峰值时间则随着直链淀粉含量的增加而显著增加,变化范围在 3.67~7.00 min。说明高直链玉米淀粉糊化后的粘度低于普通玉米淀粉,但其达到峰值粘度需要更长的时间,且糊化后的体系在室温及高温下的稳定性均高于普通玉米淀粉。糊化温度代表了淀粉糊化的难易程度,当直链淀粉含量增加时,淀粉糊化难度增大。

表 3 不同级别直链淀粉的糊化特征值

Table 3 Pasting properties of starch with different amylose levels

淀粉级别 Starch levels	峰值粘度/cP Peak 1	最低粘度/cP Trough 1	衰减值/cP Breakdown	最终粘度/cP Final viscosity	回生值/cP Setback	峰值时间/min Peak time	糊化温度/℃ Pasting temperature
CK	2 912.00±2.00 a	1 588.00±1.73 a	1 150.00±2.65 a	2 933.00±1.15 a	1 345.00±1.00 a	3.67±0.21 c	62.85±0.27 b
Ⅳ	1 494.50±1.80 b	1 408.00±1.25 b	154.00±1.00 b	1 566.50±2.05 b	187.00±0.55 b	6.07±0.06 b	62.87±0.32 b
Ⅴ	1 065.20±1.31 c	969.40±0.20 c	130.20±1.83 c	1 020.00±1.00 c	61.60±1.47 c	6.89±0.05 a	62.84±0.16 b
Ⅵ	664.33±2.02 d	581.67±0.77 d	103.67±1.26 d	608.67±0.84 d	30.00±0.92 d	6.93±0.09 a	63.72±0.13 a
Ⅶ	475.33±1.75 e	411.67±1.04 e	74.67±1.61 e	461.33±0.75 e	12.67±0.57 e	7.00±0.02 a	63.98±0.45 a

注:衰减值=峰值粘度-最低粘度,回生值=最终粘度-最低粘度。表中数据为“平均值±标准差”(n=3)。同列数据后标不同小写字母者表示差异极显著(P<0.01)。

Note: Breakdown=Peak 1-Though 1, Setback=Final viscosity-Though 1. The data in the table are “average±standard deviation”(n=3). Different lowercase letters in each column indicate extremely significant difference (P<0.01).

2. 5 高直链玉米淀粉的溶解度和膨胀势

淀粉溶解度是指随着温度的增加,淀粉溶解在水中的比例。由图 4 可知,普通玉米淀粉和高直链玉米淀粉在不同温度处理下表现出了类似的溶解度变化趋势;在 55~75℃,溶解度随着温度的升高逐渐增加,在 75℃达到峰值;而后逐渐下降,在 95℃降到最低值。高直链玉米淀粉在各个温度节点上的

溶解度显著低于普通玉米淀粉,且随着直链淀粉含量的增加,溶解度逐渐下降。在峰值 75℃时,普通玉米淀粉的溶解度达到 82.67%,Ⅶ级淀粉只有 10%左右,说明高直链玉米淀粉较普通玉米淀粉更难溶解。

膨胀势反映了淀粉粒的持水能力。由图 5 可知,高直链玉米淀粉与普通玉米淀粉的膨胀势变化

也呈现出类似的趋势,即随着温度的升高逐渐上升。在 55~65 ℃,膨胀势曲线接近水平直线。在 65 ℃ 时,普通玉米淀粉膨胀势呈指数增长,95 ℃ 时达到顶点,并有随着温度的增加持续增长的趋势。与普通玉米淀粉不同的是,高直链玉米淀粉膨胀势快速增加的拐点出现在 75 ℃,且膨胀势显著低于普通玉

米淀粉,在 95 ℃ 时,Ⅳ级淀粉的膨胀势仅为普通玉米淀粉的约 1/3。此外,普通玉米淀粉随温度增加膨胀势的变化范围也显著高于高直链玉米淀粉,这种变化范围随直链淀粉含量的增加显著降低。说明高直链玉米淀粉的持水能力较普通玉米淀粉弱。

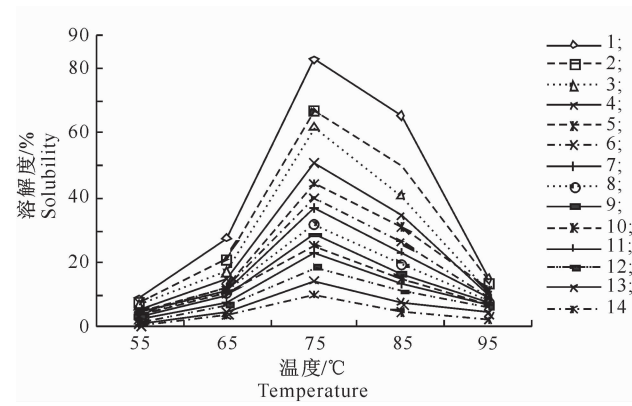


图 4 高直链玉米淀粉的溶解度

Fig. 4 The solubility of high-amylose maize starch

3 讨 论

淀粉粒的形态是影响淀粉加工特性的重要指标^[13]。本研究结果显示,在普通玉米淀粉中,A 型淀粉粒为饱满光滑、有蜡质光泽的球体或多面体,B 型淀粉粒为饱满光滑的球体;这与李佳佳等^[14]、邱礼平等^[15]的研究结果相似。当直链淀粉含量提高到 50% 时,A 型淀粉粒即发生一定程度的皱缩变形,在Ⅶ级淀粉中,这种皱缩现象则进一步加剧;而 B 型淀粉粒在 V 级淀粉中形态仅由球形变为椭圆形,没有发生皱缩现象,皱缩现象只出现在直链淀粉含量更高的Ⅶ级淀粉,这可能是由于在 B 型淀粉粒中支链淀粉含量更高^[16],更能抵抗因支链淀粉含量降低而造成的结构变化。

侯蕾等^[17]研究认为,DSC 图谱中应存在 G 峰和 M2 峰。G 峰吸热焓值随支链淀粉含量增加而升高,M2 峰吸热焓值随直链淀粉含量增加而升高^[18]。王中荣等^[19]研究表明,M2 峰通常出现在 110~160 ℃。本研究测定了 40~110 ℃ 淀粉的 DSC 特性,结果表明,由于在普通玉米淀粉和Ⅳ级玉米淀粉中支链淀粉含量较高,其 DSC 曲线谱存在明显的 G 峰;随着直链淀粉含量的增加,G 峰不再明显且位置向右偏移,直链淀粉含量进一步增加,DSC 曲线几乎趋于一条直线。说明随着直链淀粉含量的增加,淀粉大分子完全溶解需要更多的热能。至于更高温度

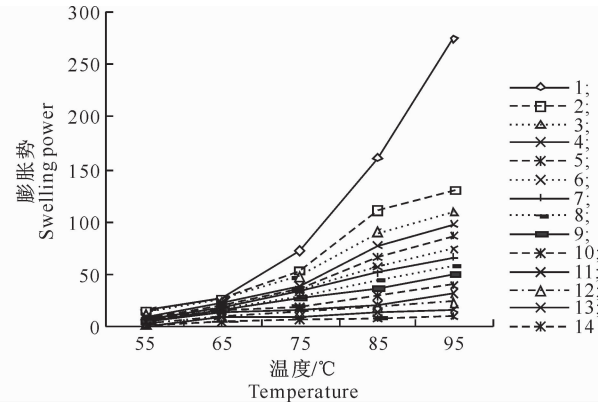


图 5 高直链玉米淀粉的膨胀势

Fig. 5 The swelling power of high-amylose maize starch
下 DSC 曲线上 M2 峰的分布特征尚有待进一步研究确定。

淀粉糊化现象是随着温度的增加淀粉粒吸水膨胀、裂解,并溶解在水中形成凝胶,体系粘度明显增加的过程。王中荣等^[20]研究表明,在同一温度条件下,直链淀粉含量 50% 以上淀粉的糊化难度高于普通淀粉,这与本研究的结果一致。本研究结果表明,普通玉米淀粉中支链淀粉含量较高,容易糊化,因此呈现出典型的“双峰”糊化特征曲线;Ⅳ级~Ⅶ级淀粉中直链淀粉含量较高,较难糊化,呈现“S”型糊化曲线,达到峰值粘度后,粘度值变化较小,趋于一条直线。黄祖强等^[21]研究表明,在 60 ℃ 之前,淀粉的溶解度随着温度的升高而增加;当温度超过 60 ℃,溶解度呈下降趋势。本研究结果显示出类似的溶解趋势,但是本研究溶解度下降拐点在 75 ℃,其原因是玉米淀粉材料的来源不同所致,说明选育的高直链玉米淀粉较普通玉米淀粉更难溶解。马齐等^[22]研究表明,玉米淀粉的膨胀势随着温度的上升逐渐增加,这与本研究的结果一致。袁美兰^[23]、Singh 等^[24]研究表明,淀粉颗粒的膨胀势除了取决于淀粉的来源和淀粉颗粒的形态结构外,还与其支链淀粉的性质有关。直链淀粉起稀释和抑制膨胀的作用,尤其是在有脂类存在的情况下,直链淀粉与脂类形成复合物抑制淀粉颗粒的膨胀。

4 结 论

普通玉米淀粉和高直链玉米淀粉在淀粉粒形态、热特性、糊化特性、溶解度和溶胀势等理化特性上存在显著差异。随着直链淀粉含量的增加,A型淀粉粒由饱满光滑、有蜡质光泽的球体或多面体变为皱缩无光泽的不规则多面体,B型淀粉粒则由饱满光滑的小球体逐渐变为无蜡质光泽的椭圆形,直至扭曲成不规则颗粒;随着直链淀粉含量的升高,DSC参数 T_o 、 T_p 、 T_c 、 $T_o - T_c$ 逐渐升高, ΔH 逐渐降低。普通玉米淀粉糊化曲线呈现出典型的“双峰”特征,高直链玉米淀粉为“S”型曲线;峰值粘度、最低粘度、最终粘度、衰减值、回生值随直链淀粉含量增加逐渐降低,峰值时间逐渐增加,糊化温度变化不明显。高直链玉米淀粉和普通玉米淀粉显示了相同趋势的溶解度和膨胀势曲线,淀粉的溶解度和膨胀势随直链淀粉含量的增加而降低。

[参考文献]

- [1] 宋健民,刘爱峰,李豪圣,等. 小麦籽粒淀粉理化特性与面条品质关系研究 [J]. 中国农业科学,2008,41(1):272-279.
Song J M,Liu A F,Li H S,et al. Relationship between starch physiochemical properties of wheat grain and noodle quality [J]. Scientia Agricultura Sinica,2008,41(1):272-279. (in Chinese)
- [2] 张 波,董 玲,魏益民,等. 大豆理化特性与挤压组织化产品特性的关系 [J]. 中国农业科学,2009,42(11):4012-4018.
Zhang B,Dong L,Wei Y M,et al. Relationship between extrudate texturization properties and physicochemical properties of soybeans [J]. Scientia Agricultura Sinica,2009,42(11):4012-4018. (in Chinese)
- [3] 林亲录,肖华西. 两种大米淀粉及其磷酸酯淀粉理化特性的比较研究 [J]. 食品与机械,2009,25(4):9-13.
Lin Q L,Xiao H X. Comparison of the physicochemical properties of two rice varieties starch and its modified starches [J]. Food & Machinery,2009,25(4):9-13. (in Chinese)
- [4] 陆大雷,郭换粉,董 策,等. 普通、甜、糯玉米果穗不同部位籽粒淀粉理化特性和颗粒分布差异 [J]. 作物学报,2011,37(2):331-338.
Lu D L,Guo H F,Dong C,et al. Starch physicochemical characteristics and granule size distribution at api-cal, middle and basal ear positions in normal, sweet, and waxy maize [J]. Acta Agronomica Sinica,2011,37(2):331-338. (in Chinese)
- [5] 黄晓杰,张春红,赵增煜,等. 高直链玉米淀粉的特性及研究现状分析 [J]. 农业科技与装备,2007,12(6):58-60.
Huang X J,Zhang C H,Zhao Z Y,et al. Characteristic and current situation of high amylose maize starch [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment,2007,12(6):58-60. (in Chinese)

- [6] Zhu T M,David S,Jackson,et al. Comparision of amylose determination method and the development of a dual wavelength iodine binding technique [J]. Cereal Chem,2008,85(1):51-58.
- [7] Li L,Michael Blanco,Jay-lin Jane,et al. Physicochemical properties of endosperm and pericarp starches during maize development [J]. Science Direct,2007,67:630-639.
- [8] Jiang Q Q,Gao W Y,Li X,et al. Characterizations of starches isolated from five different *Dioscorea* L. species [J]. Food Hydrocolloids,2012,29:35-41.
- [9] 董亚琳,才 卓,徐国良,等. 高直链淀粉玉米研究及其利用 [J]. 农业与技术,2006,26(4):53-54.
Dong Y L,Cai Z,Xu G L,et al. Research and use on high-amylose starch corn [J]. Agriculture & Technology,2006,26(4):53-54. (in Chinese)
- [10] 银永安,齐军仓,李卫华,等. 小麦胚乳 A、B 型淀粉粒理化特性研究 [J]. 中国农业科学,2010,43(11):2372-2379.
Yin Y A,Qi J C,Li W H,et al. Physico-chemical characteristics of A,B type starch granule in wheat endosperm [J]. Scientia Agricultura Sinica,2010,43(11):2372-2379. (in Chinese)
- [11] 朱培蕾,赵贵云,汪名春,等. 玉米多孔淀粉形成条件及其成孔过程的研究 [J]. 安徽农业大学学报,2011,38(2):164-169.
Zhu P L,Zhao G Y,Wang M C,et al. Formation conditions and pore forming process of porous corn starch [J]. Journal of Anhui Agricultural University,2011,38(2):164-169. (in Chinese)
- [12] Vania Zanella Pinto,Nathan Levien Vanier,Bruna Klein,et al. Physicochemical, crystallinity, pasting and thermal properties of heat-moisture-treated pinhao starch [J]. Starch Starke,2012,64:855-863.
- [13] 张传辉,姜 东,戴廷波,等. 小麦籽粒淀粉粒粒级分布特征及其与淀粉理化特性关系研究进展 [J]. 麦类作物学报,2005,25(6):130-133.
Zhang C H,Jiang D,Dai T B,et al. Advances in starch granule size distribution characteristics and its relationships with physiochemical characteristics of starch in wheat grain [J]. Journal of Triticeae Crops,2005,25(6):130-133. (in Chinese)
- [14] 李佳佳,卢未琴,高群玉,等. 不同直链淀粉含量玉米微晶淀粉理化性质研究 [J]. 粮食与油脂,2011(2):13-17.
Li J J,Lu W Q,Gao Q Y,et al. Studies on physicochemical properties of microcrystalline starches made from different content of amylose [J]. Cereals & Oils,2011(2):13-17. (in Chinese)
- [15] 邱礼平,温其标. 不同直链淀粉含量玉米淀粉结构特性及其降解性能的研究 [J]. 粮油加工,2005,4(10):83-86.
Qiu L P,Wen Q B. Study on structural and degradative properties of different amylose content in corn starch [J]. Cereals and Oils Processing,2005,4(10):83-86. (in Chinese)
- [16] 银永安,齐军仓,李卫华,等. 小麦胚乳 A、B 型淀粉粒形成机理及理化特性研究 [J]. 作物杂志,2012,26(4):337-343.
Yin Y A,Qi J C,Li W H,et al. Study on formation mechanism and physicochemical characteristics of A,B type starch gran-

- ules in wheat endosperm [J]. *Crop Research*, 2012, 26(4): 337-343. (in Chinese)
- [17] 侯 蕾, 韩小贤, 郑学玲, 等. 不同直链淀粉含量玉米淀粉研究进展 [J]. *粮食与油脂*, 2013(6): 11-14.
Hou L, Han X X, Zheng X L, et al. Research advance on corn starch with different content of amylose [J]. *Cereals & Oils*, 2013(6): 11-14. (in Chinese)
- [18] 黄 强, 王 婵, 罗发兴, 等. 玉米淀粉的热力学性质与消化性 [J]. *华南理工大学学报*, 2011, 39(9): 7-11.
Huang Q, Wang C, Luo F X, et al. The thermodynamic and digestive properties of corn starch [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2011, 39(9): 7-11. (in Chinese)
- [19] 王中荣, 刘 雄. 不同直链淀粉含量的玉米淀粉理化性质及其应用研究 [J]. *粮食与油脂*, 2007(5): 15-19.
Wang Z R, Liu X. Studies on physical-chemical properties and application of cornstarch with different content of amylose [J]. *Cereals & Oils*, 2007(5): 15-19. (in Chinese)
- [20] 王中荣, 刘 雄. 高直链淀粉性质及应用研究 [J]. *粮食与油脂*, 2005(11): 10-13.
Wang Z R, Liu X. Study on properties and application of high amylose starch [J]. *Cereals & Oils*, 2005(11): 10-13. (in Chinese)
- [21] 黄祖强, 胡华宇, 童张法, 等. 机械活化法制备冷水可溶性玉米淀粉的工艺研究 [J]. *食品与发酵工业*, 2005, 31(12): 1-3.
Huang Z Q, Hu H Y, Tong Z F, et al. Processive research on soluble corn starch in cold water of mechanical active method [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2005, 31(12): 1-3. (in Chinese)
- [22] 马 齐, 秦 涛, 田 萍, 等. 黄姜淀粉的理化性质分析 [J]. *食品研究与开发*, 2007, 28(5): 98-101.
Ma Q, Qin T, Tian P, et al. Analysis on some physiochemical property of dioscorea, zingiberensis wright starch [J]. *Food Research and Development*, 2007, 28(5): 98-101. (in Chinese)
- [23] 袁美兰. 淀粉结构和性质的研究概况 [J]. *畜牧与饲料科学*, 2011, 32(1): 102-104.
Yuan M L. Research survey on structure and properties of starch [J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2011, 32(1): 102-104. (in Chinese)
- [24] Singh J, Singh N. Studies on the morphological, thermal and rheological properties of starch separated from some Indian potato cultivars [J]. *Food Chemistry*, 2011, 75(1): 67-77.

(上接第 52 页)

- [18] 崔喜艳, 张继晓, 窦 瑶, 等. 双分子荧光互补技术 (BiFC) 分析玉米 SSI 与 PPK1 之间的蛋白互作 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(7): 49-53, 59.
Cui X Y, Zhang J X, Dou Y, et al. SSI and PPK1 interactions in bimolecular fluorescence complementation (BiFC) assay [J]. *Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed*, 2013, 41(7): 49-53, 59. (in Chinese)
- [19] 郭术俊, 赵保明, 唐 洁, 等. pBiFC-VN173-Olig2 和 pBiFC-VC155-Id4 真核表达质粒的构建及其在活细胞内的相互作用 [J]. *华中科技大学学报: 医学版*, 2011, 40(2): 137-141.
Guo S J, Zhao B M, Tang J, et al. Construction of pBiFC-VN173-Olig2 and pBiFC-VC155-Id4 eukaryotic expression vectors and their interaction in living cells [J]. *Acta Medicinæ Universitatis Scientiæ et Technologiæ Huazhong*, 2011, 40(2): 137-141. (in Chinese)
- [20] 严 晶, 霍克克. 双分子荧光互补技术及其在蛋白质相互作用研究中的应用 [J]. *生物化学与生物物理进展*, 2006, 33(6): 589-595.
Yan J, Huo K K. Biomolecular fluorescence complementation (BiFC) and its application in researching on protein-protein interactions [J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 2006, 33(6): 589-595. (in Chinese)
- [21] Hu C D, Chinenov Y, Kerppola T K. Visualization of interactions among bZip and Rel family proteins in living cells using bimolecular fluorescence complementation [J]. *Molecular Cell*, 2002, 9(4): 789-798.
- [22] 樊晋宇, 崔宗强, 张先恩. 双分子荧光互补技术 [J]. *中国生物化学与分子生物学学报*, 2008, 24(8): 767-774.
Fan J Y, Cui Z Q, Zhang X E. Bimolecular fluorescence complementation technique [J]. *Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 2008, 24(8): 767-774. (in Chinese)
- [23] Grinberg V A, Hu C D, Kerppola K T. Visualization of Myc/Max/Mad family dimers and the competition for dimerization in living cells [J]. *Mol Cell Biol*, 2004, 24(10): 4294-4308.
- [24] Boruc J, Van den Daele H, Hollunder J, et al. Functional modules in the *Arabidopsis* core cell cycle binary protein-protein interaction network [J]. *Plant Cell*, 2010, 22(4): 1264-1280.
- [25] 王金明, 丁在松, 张桂芳, 等. 家稗丙酮酸磷酸双激酶 (PPDK) 基因的克隆及序列分析 [J]. *作物学报*, 2007, 33(6): 927-930.
Wang J M, Ding Z S, Zhang G F, et al. Cloning and sequence analysis of *pdk* gene in *Echinochloa crusgalli* var. *frumentacea* (Roxb.) W. F. Wight [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(6): 927-930. (in Chinese)
- [26] 张建福, Swapan K Datta, 王国英, 等. 玉米高光效基因 PPDK 在籼稻 IR64 中的整合及其与光合作用相关的特性分析 [J]. *分子植物育种*, 2006, 4(6): 797-804.
Zhang J F, Swapan K D, Wang G Y, et al. Integration of C4-specific PPDK gene of maize to C3 rice IR64 and its photosynthesis characteristics analysis [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2006, 4(6): 797-804. (in Chinese)