

陈海华教授主持“淀粉改性和品质改善”特约专栏文章之二

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.05.007

陈妍, 王雨生, 张星, 等. 不同添加量的氨基酸辅助干热处理对玉米淀粉理化和消化性质的影响[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(5): 123-129.
CHEN Y, WANG Y S, ZHANG X, et al. Effect of different amounts amino acid combined with dry-heat treatment on physicochemical and digestive properties of common corn starch[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(5): 123-129.

不同添加量的氨基酸辅助干热处理对玉米淀粉理化和消化性质的影响

陈妍¹, 王雨生¹, 张星¹, 陈海华^{1,2}✉

(1. 青岛农业大学 食品科学与工程学院, 山东 青岛 266109;

2. 青岛农业大学 巴瑟斯未来农业科技学院, 山东 青岛 266109)

摘要:以玉米淀粉为原料,通过氨基酸(天冬氨酸和赖氨酸)辅助干热处理对其改性,采用快速黏度仪、差式扫描量热仪、X射线衍射仪,对不同氨基酸添加量(0.5%、2%、4%和10%, w/w)的干热玉米淀粉的糊化特性、热特性、结构特性和消化性质进行了研究。结果表明,氨基酸添加量对干热处理玉米淀粉-氨基酸混合物的理化性质和消化性质有显著影响。随着两种氨基酸添加量的增多,淀粉的峰值黏度、回生值和糊化焓值降低,而相对结晶度和抗性淀粉含量升高;干热玉米淀粉-天冬氨酸混合物的糊化温度呈先升高而后降低的趋势,干热玉米淀粉-赖氨酸混合物的糊化温度呈升高趋势。提高氨基酸添加量能促进淀粉颗粒内部的晶体排列更紧密、有序,能更好地抑制淀粉的短期老化,降低淀粉的消化性能;可作为玉米淀粉改性的一种新方法,为生产改性淀粉提供参考。

关键词:赖氨酸;天冬氨酸;玉米淀粉;干热处理;理化性质;消化性质

中图分类号: TS231 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)05-0123-07

网络首发时间: 2022-09-01 10:01:57

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.ts.20220831.1632.008.html>

Effect of Different Amounts Amino Acid Combined with Dry-heat Treatment on Physicochemical and Digestive Properties of Common Corn Starch

CHEN Yan¹, WANG Yu-sheng¹, ZHANG Xing¹, CHEN Hai-hua^{1,2}✉

(1. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China; 2. Barthurst Future Agri-Tech Institute of Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China)

Abstract: Corn starch was modified by dry heat treatment combined with amino acids (aspartic acid and

收稿日期: 2022-06-02

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2016CM17); 山东省高等学校优秀中青年骨干教师国际合作培养项目(SD20130825); 青岛农业大学研究生创新立项(QNYCX20029)

Supported by: Natural Science Foundation of Shandong Province (No.ZR2016CM17); International Cooperation Program for Excellent Lecturers by Shandong Provincial Education Department (No.SD20130825); Qingdao Agricultural University Postgraduate Creative Education Program (No.QNYCX20029)

作者简介: 陈妍,女,1997年出生,在读硕士生,研究方向为食品加工与安全。E-mail: 15345400727@163.com.

通讯作者: 陈海华,女,1973年出生,博士,教授,研究方向为食品化学。E-mail: haihchen@163.com.

lysine) in the present research. Gelatinization, thermal, structural, and digestive properties of dry heat-treated corn starch with different amount of amino acids were investigated by using Rapid Viscosity Analyser, differential scanning calorimetry, and X-ray diffractometry. The results indicated that the amount of amino acids showed significant effects on the physicochemical properties and digestive properties of dry heat-treated corn starch-amino acid mixtures. With increasing the addition of amino acids, peak viscosity, setback value, and gelatinization enthalpy of starch decreased, while relative crystallinity and resistant starch content increased. Gelatinization temperature of dry heat-treated corn starch-aspartic acid mixtures showed a tendency to increase first and then decrease with increasing the amount of aspartic acid. However, gelatinization temperature of dry heat-treated corn starch-lysine mixtures increased with increasing the amount of lysine. Increasing the amount of amino acids also promoted a tighter and more ordered crystal arrangement inside starch granules, which could inhibit the short-term retrogradation and reduce the digestibility of starch. This study can be used as a new method for corn starch modification and provide a reference for the production of modified starch.

Key words: lysine; aspartic acid; corn starch; dry-heat treatment; physicochemical properties; digestive properties

淀粉是自然界中一种常见的天然多糖,是人类饮食中碳水化合物的重要来源,也是食品工业生产中的重要原料^[1]。玉米淀粉资源丰富、来源广泛且价格低廉,食品工业中需求量较大,约占淀粉总产量的 80%^[2],但由于其黏度低、热稳定差和易老化等缺点,极大的限制了淀粉在工业中的应用^[3]。通过物理或化学改性方法对淀粉进行改性,可以改善上述缺点,或增加新的功能,使其更适合实际应用的要求。

干热处理是将淀粉在含水量较低 (<20%) 条件下进行高温处理 (120~200 °C) 的一种物理改性方法,能够改变淀粉的理化性质^[3]。与其他改性方法相比,干热处理操作简单、安全。近年来研究发现干热条件下淀粉与离子胶共混处理,能显著提高淀粉的黏度和稳定性,抑制其老化速度,从而改善食品的理化性质^[4]。Li 等^[5]发现在干热条件下将黄原胶添加到蜡质玉米淀粉,能显著提高淀粉的热稳定性和剪切稳定性。Wang 等^[6]发现干热处理协同海藻酸钠能降低淀粉的糊化黏度和糊化温度,抑制淀粉的短期老化。Gul 等^[7]研究发现羧甲基纤维素钠和海藻酸钠协同干热处理对荸荠淀粉进行改性,能降低淀粉溶解度和糊化温度,提高了淀粉对水和油的结合力。

氨基酸是一种带有氨基和羧基的有机化合物,是蛋白质的基本结构单元,在人体营养和健康中发

挥着重要作用。有些氨基酸不能在体内合成,只能通过饮食摄取。因此,氨基酸常作为营养补充剂广泛用于食品工业^[8]。氨基酸作为小分子化合物,其氨基和羧基基团能与淀粉羟基基团发生相互作用,改变淀粉糊化性质及溶胀能力等^[9],抑制玉米淀粉的长期老化^[1]。已有研究发现适量的赖氨酸与干热处理能降低淀粉糊化温度^[10],因此我们推测,氨基酸添加量和干热处理能改善玉米淀粉的加工特性。但氨基酸协同干热处理对玉米淀粉性质影响的报道较少。本课题组过去研究了干热处理温度和时间对玉米淀粉-氨基酸混合物的理化性质及消化性能的影响,发现 130 °C 干热处理 2 h 的影响最显著^[11],但未研究氨基酸添加量对干热处理玉米淀粉-氨基酸混合物理化及消化特性的影响。

本文选择两种不同荷电特性的氨基酸,与玉米淀粉混合后进行干热处理,通过快速黏度分析仪、差示扫描量热仪、X 射线衍射仪等,系统研究了氨基酸添加量对干热玉米淀粉-氨基酸混合的糊化特性、热特性、结构特性和消化特性的影响,以期为玉米淀粉改性提供一种的新方法,为制备低消化速率的玉米淀粉改性产品提供理论支持。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

赖氨酸 (Lysine, Lys) 和天冬氨酸 (Aspartic

acid, Asp): 北京索莱宝生物科技有限公司; 玉米淀粉(CS, 直链淀粉含量为 26.2%): 山东滨州金辉玉米开发有限公司; α -淀粉酶(1.3×10^4 U/g)和淀粉葡萄糖苷酶(1×10^5 U/g): 上海源叶生物科技有限公司; 瓜尔胶、3,5-二硝基水杨酸、无水乙醇均为分析纯。

1.2 仪器与设备

4D 型快速黏度分析仪(RVA): 澳大利亚 Newport 科学公司; DSC-1 型差示扫描量热仪: 瑞士 Metter-Toledo 国际公司; D8-ADVANCED X 射线衍射仪: 德国布鲁克 AXS 有限公司; DHG-070A 型烘箱: 上海精宏试验设备有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

将 Asp 或 Lys 分散于 50 mL 蒸馏水, 用磁力搅拌器充分搅拌 10 min, 制备 0.5%、2%、4% 和 10% (w/w, 淀粉干基计) 的氨基酸溶液。将 CS (干基) 分散于 Asp 或 Lys 溶液中充分搅拌均匀, 于 40 °C 干燥至水分含量 10% 左右。将淀粉-氨基酸混合物研磨成粉末, 置于 130 °C 干热处理(DHT) 2 h 后, 研磨、过 100 目筛。玉米淀粉-天冬氨酸和玉米淀粉-赖氨酸干热混合物分别用 DCSA 和 DCSL 表示, 样品处理条件和样品名称如表 1 所示。

表 1 淀粉样品的处理

Table 1 Treatments for dried cornstarch g

样品	淀粉	Asp	Lys	样品	淀粉	Asp	Lys
DCSA0.5	49.75	0.25	-	DCSL0.5	49.75	-	0.25
DCSA2	49.00	1.00	-	DCSL2	49.00	-	1.00
DCSA4	48.00	2.00	-	DCSL4	48.00	-	2.00
DCSA10	45.00	5.00	-	DCSL10	45.00	-	5.00

1.3.2 糊化特性的测定

参照 Wang 等^[6]的方法, 采用快速黏度分析仪测定样品的糊化特性, 准确称取 3 g 淀粉样品(干基)和 25 mL 蒸馏水于铝罐中, 搅拌混匀后, 置于样品台上进行测定。测试程序如下: 首先以 960 r/min 搅拌 10 s, 然后降至 160 r/min 并保持至实验结束; 初始温度 50 °C 保持 1 min, 以 12 °C/min 加热至 95 °C, 并保持 2.5 min, 再以 12 °C/min 冷却至 50 °C 并保持 2 min。记录样品的糊化温度(PT)、峰值黏度(PV)、衰减值(BD)和回生值(SB)。

1.3.3 热特性的测定

用差示扫描量热仪(DSC)分析样品的热特性。首先, DSC 用钢进行校准。然后准确称取 3 mg 淀粉样品(干基)与 9 μ L 去离子水, 置于铝坩埚中, 压盖密封后在 25 °C 下平衡水分 12 h, 放入 DSC 进行测定, 空白铝坩埚作为对照。氮气流量 50 mL/min, 升温速率 10 °C/min, 温度范围 30~115 °C, 记录升温过程中样品的热力学参数 T_0 (糊化起始温度)、 T_p (糊化峰值温度)、 T_c (糊化终止温度)和 ΔH (糊化焓值)。

1.3.4 X 射线衍射的测定

参照 Jiang 等^[11]方法, 样品在 25 °C、相对湿度 100% 的环境中平衡 24 h。用 X 射线衍射仪对样品的晶体结构进行分析, 扫描速度 0.1°/s, 扫描区域 4~40°, 目标电压和电流分别为 40 kV 和 40 mA, 记录 X 射线衍射图谱, 并用 Jade 5.0 计算样品的相对结晶度(RC)。RC 值为结晶峰的积分面积占总积分面积的百分比。

1.3.5 消化特性的测定

参考 Englyst 等^[12]的方法, 准确称取 200 mg 淀粉样品和 6.25 mg 瓜尔胶, 分散于 5 mL 磷酸缓冲溶液(0.2 mol/L, pH 5.2), 并涡旋 5 min, 加入 5 个直径为 5 mm 的玻璃球, 于 37 °C 水浴保温 10 min, 加入 2.5 mL 混合酶溶液(290 U/mL 的 α -淀粉酶和 100 U/mL 的淀粉葡萄糖苷酶), 于 37 °C 振荡水浴(160 r/min)反应, 分别于 20 min 和 120 min 时, 取出 1 mL 的水解液, 快速加入 9 mL 乙醇(66%, v/v)混合进行灭酶, 4 500 r/min 离心 10 min 后, 采用 3,5-二硝基水杨酸法测定上清液中葡萄糖含量。样品中快速消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(RDS)和抗消化淀粉(RS)的质量分数按下述公式计算:

$$RDS(\%) = (G_{20} - FG) \times 0.9 \times 100 / TS$$

$$SDS(\%) = (G_{120} - G_{20}) \times 0.9 \times 100 / TS$$

$$RS(\%) = [TS - (RDS + SDS)] / TS$$

式中: G_{20} -酶解 20 min 后释放的葡萄糖含量(mg);

G_{120} -酶解 120 min 后释放的葡萄糖含量(mg);

TS-酶水解处理前淀粉中游离的葡萄糖含量

(mg);

0.9-葡萄糖转化为无水葡萄糖的摩尔质量。

1.4 数据分析

所有样品至少平行测试 3 次, 取平均值。用 SPSS 20.0 分析软件中 Duncan's 多重比较法 ($P < 0.05$) 进行多组样本间差异显著性分析, 用 Origin 9.0 进行相关图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 糊化特性分析

如表 2 所示, Asp 和 Lys 添加量对干热处理淀粉的 PT 影响规律不同。随着 Asp 添加量的增多, 干热淀粉的 PT 呈先升高而后降低的趋势, Asp 添加量为 4% 时, PT 达到最大值, 为 74.0 °C。而随着 Lys 添加量的增多, 淀粉的 PT 呈升高趋势, Lys 添加量为 10% 时, PT 达到最值, 为 75 °C。随着氨

基酸添加量的增加, DCSA 和 DC SL 的 PV 均降低。与添加 0.5% 氨基酸的干热淀粉相比, DCSA10 和 DC SL10 的 PV 分别降低了 878 cP 和 1 141 cP。

壳聚糖是带有氨基的阳离子多糖, 而阿拉伯胶是酸性多糖, 有研究发现这两种多糖影响淀粉的理化性质。Zhou 等^[13]研究发现随着阿拉伯胶比例的增加, 湿热处理玉米淀粉的 PV 呈降低趋势。这可能是干热处理能破坏玉米淀粉分子间的氢键, 促进氨基酸分子上的氨基和羧基与淀粉分子的羰基和羟基发生相互作用, 抑制了淀粉与水分子的相互作用, 阻止了淀粉颗粒的溶胀和糊化, 使 PT 升高^[5]。Asp 分子含有两个羧基, 呈弱酸性, Asp 添加量较高时, 可能引起干热过程中淀粉分子酸水解, 导致淀粉的 PT 和 PV 降低^[14-15]。此外, Lys 和 Asp 中含有大量亲水基团, 与水之间存在强的氢键作用, 抑制淀粉的吸水溶胀, 导致 PV 降低^[9, 15]。

表 2 干热玉米淀粉-氨基酸混合物的糊化特性

Table 2 Pasting parameters of dried cornstarch-amino acid mixtures

样品	PT/°C	PV/cP	BD/cP	SB/cP	样品	PT/°C	PV/cP	BD/cP	SB/cP
DCSA0.5	73.1±0.0 ^b	3 036±1 ^a	2 013±3 ^a	548±21 ^a	DCSL0.5	73.8±0.1 ^b	4 836±20 ^a	2 437±5 ^c	1 923±12 ^{ab}
DCSA2	73.2±0.1 ^b	2 758±29 ^b	1 927±44 ^a	436±25 ^b	DCSL2	74.1±0.2 ^b	4 491±15 ^b	2 532±43 ^a	1 846±21 ^c
DCSA4	74.0±0.0 ^a	2 633±25 ^c	1 759±30 ^b	422±5 ^b	DCSL4	74.3±0.6 ^{ab}	4 246±42 ^c	2 480±52 ^{bc}	1 872±46 ^{bc}
DCSA10	73.1±0.5 ^b	2 158±23 ^d	1 512±62 ^c	329±16 ^c	DCSL10	75.0±0.3 ^a	3 695±1 ^d	2 175±8 ^d	1 581±22 ^d

注: 同列数据, 小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同表示差异不显著 ($P > 0.05$)。

Note: Different lower case letters in the same column indicated the mean values were significantly different ($P < 0.05$). Same lower case in the same column indicated the mean values were insignificantly different ($P > 0.05$).

随着 Asp 添加量的增多, 淀粉的 BD 值降低, Asp 添加量为 10% 时, DCSA10 的 BD 值最低, 为 1 512 cP, 表明添加 Asp 能提高淀粉糊的热稳定性和剪切稳定性。当 Lys 添加量 < 4% 时, 随着 Lys 添加量的提高, 淀粉的 BD 值没有显著变化; 而当 Lys 添加量 > 4% 时, 随着 Lys 添加量的提高, 淀粉的 BD 值显著降低, 表明提高 Lys 的添加量能提高淀粉糊对热和剪切的稳定性。Ito 等^[16]发现随着 Lys 添加量的增多, 马铃薯淀粉的 BD 值呈降低的趋势。BD 降低可能是干热处理破坏了玉米淀粉分子间的氢键, 促进氨基酸分子上的氨基和羧基与淀粉发生酯化反应和美拉德反应, 从而提高了淀粉的稳定性^[4-5]。

随着 Asp 和 Lys 添加量的增加, 淀粉的 SB 值呈降低趋势, 说明提高 Asp 和 Lys 添加量, 能抑制干热淀粉的短期老化。这可能是干热过程中, 氨基

酸的羧基和淀粉的羟基之间形成酯键, 阻碍了淀粉分子间氢键的形成, 使淀粉的 SB 值降低^[14]。

2.2 热特性分析

T_0 和 T_c 表示淀粉中最不稳定结晶和最稳定结晶的熔融温度, T_p 表示淀粉中大部分结晶熔融的温度^[17]。如表 3 所示, 随 Asp 添加量的增多, 当 Asp 的添加量低于 4% 时, 淀粉糊的 T_0 、 T_p 、 T_c 呈升高趋势; 而 Asp 添加量高于 4% 时, 淀粉糊的 T_0 、 T_p 、 T_c 没有差别。当 Asp 添加量为 4%, DCSA 的 T_0 、 T_p 、 T_c 达到最大值, 分别为 64.10 °C、69.48 °C、74.96 °C, 但当 Asp 添加量达到 10% 时, 干热淀粉的 T_0 、 T_p 、 T_c 有略微降低, 表明提高 Asp 添加量能提高干热玉米淀粉的稳定性, 但 Asp 添加量过高则导致干热玉米淀粉的稳定性降低。随着 Lys 添加量的增多, 淀粉糊的 T_0 、 T_p 、 T_c 逐渐升高, 当 Lys

表 3 干热玉米淀粉-氨基酸混合物的热特性参数

Table 3 Thermal properties parameters of dried cornstarch-amino acid mixtures

样品	$T_o/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$	样品	$T_o/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
DCSA0.5	62.79±0.46 ^b	68.28±0.45 ^c	73.79±0.69 ^b	11.02±0.97 ^a	DCSL0.5	64.38±0.07 ^c	69.69±0.09 ^c	74.89±0.34 ^c	11.35±0.14 ^a
DCSA2	63.13±0.18 ^b	68.68±0.14 ^b	73.90±0.39 ^b	9.19±0.08 ^b	DCSL2	64.74±0.11 ^{bc}	70.23±0.01 ^{bc}	75.58±0.06 ^b	11.56±0.24 ^a
DCSA4	64.10±0.50 ^a	69.48±0.51 ^a	74.96±0.74 ^a	9.20±0.02 ^b	DCSL4	65.16±0.18 ^b	70.76±0.03 ^b	75.91±0.17 ^b	11.42±0.22 ^a
DCSA10	63.84±0.01 ^a	69.11±0.13 ^{ab}	74.61±0.01 ^a	8.66±0.15 ^c	DCSL10	66.50±0.47 ^a	72.50±0.60 ^a	77.88±0.83 ^a	11.42±0.14 ^a

注: 同列数据, 小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$), 相同表示差异不显著 ($P>0.05$)。

Note: Different lower case letters in the same column indicated the mean values were significantly different ($P<0.05$). Same lower case in the same column indicated the mean values were insignificantly different ($P>0.05$).

添加量为 10% 时, DCSL 的 T_o 、 T_p 、 T_c 达到最大, 分别为 66.50 °C、72.50 °C、77.88 °C, 说明提高 Lys 添加量能提高干热处理玉米淀粉的结晶稳定性, 延缓了干热淀粉的糊化。

Li 等^[18]发现随着 HCl 浓度的增加, 湿热处理百合淀粉的 T_o 、 T_p 、 T_c 升高。Ji 等^[19]发现 Lys 和 Asp 均能提高湿热玉米淀粉的 T_o 、 T_p 、 T_c 。Chen 等^[9]发现 Lys 和 Asp 均能提高马铃薯淀粉的 T_o 、 T_p 、 T_c 。这可能是氨基酸添加量的增多, 能促进干热过程中氨基酸与淀粉分子的交联, 增强淀粉分子之间的静电相互作用, 提高 T_o 、 T_p 、 T_c ^[9]。而 Asp 为酸性氨基酸, 当 Asp 添加量较高时 (10%), 干热处理过程中能优先攻击淀粉颗粒的无定型区域, 导致 T_o 、 T_p 、 T_c 降低^[9]。

随着 Asp 添加量的增多, 淀粉糊的 ΔH 降低; 而随着 Lys 添加量的增多, 干热淀粉的 ΔH 没有明显变化。Zhou 等^[13]发现随着瓜尔豆胶质量分数的增加, 湿热处理的玉米淀粉的 ΔH 呈降低的趋势。 ΔH 降低可能是弱酸性 Asp 的存在, 能促进干热处理对淀粉结晶区的破坏, 也能攻击淀粉颗粒的无定

形区^[15], 降低淀粉颗粒无定形区的有序度, 降低淀粉熔融所需要的能量^[9-10,15]。

2.3 X 射线衍射图谱分析

由图 1 可知, DCSA 和 DCSL 在 2θ 为 15° 和 23° 处有强峰, 在 17° 和 18° 处有双峰, 20° 左右存在微弱的衍射峰, 呈 A 型结晶结构特征。20° 的小峰可能是直链淀粉-内源性脂质复合物的衍射峰^[20]。随着 Lys 添加量的增多, 淀粉糊的 X 衍射峰位置未发生变化, 说明增加 Lys 的添加量对 DCSL 的结晶结构类型没有影响; 而随着 Asp 添加量的增多, DCSA 型结晶结构类型没有改变, 但 DCSA2、DCSA4 和 DCSA10 在 2θ 为 11.7° 和 23.7° 出现新峰, 新峰的产生可能与外源 Asp 晶体的存在有关^[19]。Ji 等^[10]发现 CS-Lys 干热复合物的晶型与天然玉米淀粉相似, 呈现典型的 A 型结晶结构。Ji 等^[19]还发现添加 Asp 后的玉米淀粉在 2θ 为 11.7° 和 23.7° 出现新峰, 而 Lys 的添加没有改变玉米淀粉的衍射峰位置, 也没有出现新的衍射峰。

如图 1 所示, DCSA 和 DCSL 的 RC 值随氨基酸添加量的增加而升高。DCSA10 和 DCSL10 的

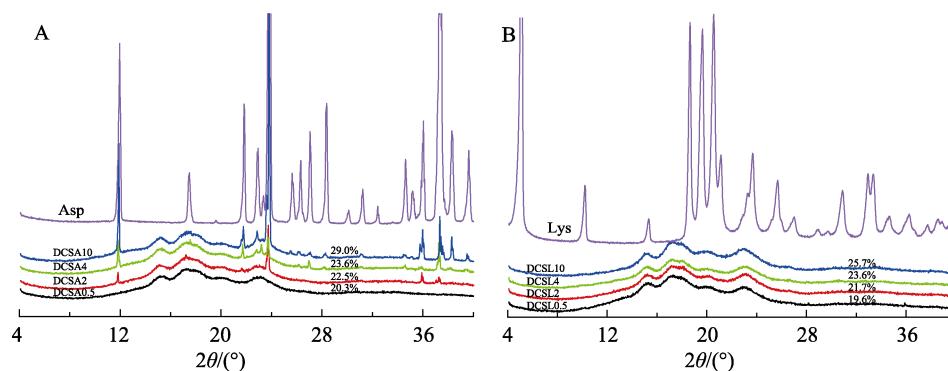


图 1 干热玉米淀粉-氨基酸混合物的 X 射线衍射图谱及相对结晶度

Fig. 1 X-ray diffraction patterns and relatively crystallinity of dried cornstarch-amino acid mixtures

A: 干热玉米淀粉-天冬氨酸混合物; B: 干热玉米淀粉-赖氨酸混合物

A): dried cornstarch-aspartic acid mixtures; B): dried cornstarch-lysine mixtures

RC 值分别为 29.0%和 25.7%，比对应的 DCSA0.5 和 DCSL0.5 的 RC 值升高 8.7%和 6.1%。Liang 等^[21]发现 Asp 协同热湿处理能显著提高玉米淀粉的 RC 值。González 等^[20]发现干热处理能显著提高小麦淀粉的 RC 值。Primo-Martín 等^[22]也发现小麦淀粉经过焙烤处理后，其 RC 值提高了一倍。这可能是干热处理过程中，热能和低水分促使淀粉颗粒内部的晶体排列更紧密、有序^[14]。

2.4 消化性质分析

由表 4 可知，随着氨基酸添加量的增多，DCSA 和 DCSL 的 RDS 含量逐渐降低，如 DCSA10 和 DCSL10 的 RDS 比 DCSA0.5 和 DCSL0.5 分别低 12.3%和 4.3%。随着氨基酸添加

量的增多，DCSA 和 DCSL 的 RS 含量逐渐升高，如 DCSA10 和 DCSL10 的 RS 比 DCSA0.5 和 DCSL0.5 的 RS 分别高 9.2%和 3.5%。当氨基酸添加量低于 2%时，DCSA 和 DCSL 的 SDS 均随氨基酸添加量的增多而升高。当氨基酸添加量为 2%，DCSA 的 SDS 含量为 27.14%，比 DCSA0.5 的 SDS 值高 2.65%，DCSL 的 SDS 含量为 32.83%，比 DCSL0.5 的 SDS 值高 1.21%；而当氨基酸添加量高于 2%时，提高氨基酸添加量对 DCSA 和 DCSL 中的 SDS 没有显著影响。说明干热处理过程中，氨基酸添加量增多促进了 SDS 和 RS 的形成。氨基酸添加量的增加能抑制干热淀粉的快速消化，抑制血糖的快速升高。

表 4 干热玉米淀粉-氨基酸 RDS、SDS 和 RS 的含量
Table 4 Contents of RDS, SDS and RS in dried cornstarch-amino acid mixtures

样品	RDS	SDS	RS	样品	RDS	SDS	RS
DCSA0.5	41.61±0.41 ^a	24.49±0.33 ^b	33.90±0.08 ^c	DCSL0.5	41.56±0.49 ^a	31.62±0.33 ^b	26.82±0.16 ^b
DCSA2	32.59±0.16 ^b	27.14±0.00 ^a	40.28±0.16 ^b	DCSL2	40.35±0.08 ^b	32.83±0.08 ^a	26.82±0.16 ^b
DCSA4	32.01±0.16 ^b	27.31±0.41 ^a	40.68±0.57 ^b	DCSL4	40.00±0.08 ^b	32.89±0.16 ^a	27.11±0.24 ^b
DCSA10	29.31±0.08 ^c	27.60±0.16 ^a	43.09±0.24 ^a	DCSL10	37.24±0.08 ^c	32.43±0.16 ^{ab}	30.33±0.08 ^a

注：同列数据，小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)，相同表示差异不显著 ($P > 0.05$)。

Note: Different lower case letters in the same column indicated the mean values were significantly different ($P < 0.05$). Same lower case in the same column indicated the mean values were insignificantly different ($P > 0.05$).

Ji 等^[19]发现 Asp 和 Lys 能降低湿热玉米淀粉 RDS 值，提高湿热玉米淀粉的 SDS 值和 RS 值。Zhou 等^[13]发现随着黄原胶/瓜尔胶比例的增加，湿热处理淀粉的 RDS 呈降低的趋势，SDS 和 RS 呈升高的趋势。Chen 等^[23]发现随着塔拉胶添加量的增加，湿热淀粉的 RDS 呈降低的趋势，SDS 和 RD 呈升高的趋势。本文中 RDS 降低、SDS 和 RS 值升高可能是在干热过程中玉米淀粉分子的羟基与氨基酸的羧基之间发生酯化反应，同时分子链发生重排，形成了较强的空间位阻，抑制了酶对淀粉的水解^[19]。

3 结论

氨基酸的添加量对于干热玉米淀粉-氨基酸混合物的理化性质和消化性质有显著影响。提高天冬氨酸或赖氨酸添加量能降低淀粉糊的峰值黏度、回生值和糊化焓值。这可能是干热处理过程中氨基酸的羧基和淀粉的羟基之间形成酯键，阻碍淀粉分子间氢键的形成，从而抑制淀粉的短期老化。提高氨基

酸添加量能促进淀粉糊的相对结晶度和抗性淀粉含量增加，降低淀粉的消化能力，但不改变干热淀粉的结晶类型，这可能与氨基酸存在时干热淀粉内部的晶体排列更紧密、有序有关。

提高天冬氨酸 (Asp) 添加量，玉米淀粉的糊化温度 (PT) 呈先升高而后降低的趋势；提高赖氨酸 (Lys) 添加量，玉米淀粉的 PT 显著升高。高添加量 Asp 和 Lys (~10%) 均能显著提高淀粉糊的热稳定性和剪切稳定性。实验结果表明氨基酸辅助干热处理可为制备慢消化淀粉提供理论依据。

参考文献:

- [1] CHEN Y, WANG Y S, ZHANG X, et al. Retardant effect of different charge-carrying amino acids on the long-term retrogradation of normal corn starch gel[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 189: 1020-1028.
- [2] KONG B H, NIU H H, SUN F D, et al. Regulatory effect of porcine plasma protein hydrolysates on pasting and gelatinization action of corn starch[J]. International Journal of Biological

- Macromolecules, 2016, 82: 637-644.
- [3] 黄峻榕, 张梦雅, 吴小勇, 等. 食用胶干法变性淀粉的制备、性质及应用进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(9): 373-376.
HUANG J R, ZHANG M Y, WU X Y, et al. Research of the preparation, property and application of starch modified by dry heating with hydrocolloids[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(9):373-376.
- [4] LIM H S, BEMILLER J N, LIM S T. Effect of dry heating with ionic gums at controlled pH on starch paste viscosity[J]. Cereal Chemistry 2003, 80(2): 198-202.
- [5] LI Y, ZHANG H E, SHOEMAKER C F, et al. Effect of dry heat treatment with xanthan on waxy rice starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(2): 1647-1652.
- [6] WANG Y S, XU P C, CHEN H H. Effect of dry heat treatment combined with sodium alginate addition on the physicochemical properties of normal cornstarch[J]. Current Topics in Nutraceutical Research, 2018, 16(1): 57-64.
- [7] GUL K, RIAR C S, BALA A, et al. Effect of ionic gums and dry heating on physicochemical, morphological, thermal and pasting properties of water chestnut starch[J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 59(1): 348-355.
- [8] MITSUHASHI S. Current topics in the biotechnological production of essential amino acids, functional amino acids, and dipeptides[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2014, 26: 38-44.
- [9] CHEN W T, ZHOU H X, YANG H, et al. Effects of charge-carrying amino acids on the gelatinization and retrogradation properties of potato starch[J]. Food Chemistry, 2015, 167: 180-184.
- [10] JI Y, YU J C, XU Y B, et al. Impact of dry heating on physicochemical properties of corn starch and lysine mixture[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 91: 872-876.
- [11] JIANG H, WANG Y S, ZHANG X, et al. Synergistic effect of charged amino acid combined with dry heating treatment on physicochemical properties and in vitro digestibility of cornstarch[J]. Starch - Stärke, 2020, 72(9-10): 1900298.
- [12] ENGLYST K N, ENGLYST H N, HUDSON G J, et al. Rapidly available glucose in foods: An in vitro measurement that reflects the glycemic response[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1999, 69(3): 448-454.
- [13] ZHOU S, HONG Y, GU Z B, et al. Effect of heat-moisture treatment on the in vitro digestibility and physicochemical properties of starch-hydrocolloid complexes[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 104: 105736.
- [14] ALI N A, DASH K K, ROUSTRAY W. Physicochemical characterization of modified lotus seed starch obtained through acid and heat moisture treatment[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126513.
- [15] LIM H S, HAN J A, BEMILLER J N, et al. Physical modification of waxy maize starch by dry heating with ionic gums[J]. Journal of Applied Glycoscience, 2006, 53(4): 281-286.
- [16] ITO A, HATTORI M, YOSHIDA T, et al. Contribution of the net charge to the regulatory effects of amino acids and ϵ -poly(L-lysine) on the gelatinization behavior of potato starch granules[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2006, 70(1): 76-85.
- [17] ZHOU X, BAIK B K, WANG R, et al. Retrogradation of waxy and normal corn starch gels by temperature cycling[J]. Journal of Cereal Science, 2010, 51(1): 57-65.
- [18] LI H, WANG R R, LIU J, et al. Effects of heat-moisture and acid treatments on the structural, physicochemical, and in vitro digestibility properties of lily starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 956-968.
- [19] JI Y, YU J C. *In vitro* digestion and physicochemical characteristics of corn starch mixed with amino acid modified by heat-moisture treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 720-725.
- [20] GONZÁLEZ M, VERNON-CARTER E J, ALVAREZ-RAMIREZ J, et al. Effects of dry heat treatment temperature on the structure of wheat flour and starch in vitro digestibility of bread[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 166: 1439-1447.
- [21] LIANG Z L, CHEN X, LUO J W, et al. Addition of amino acids to modulate structural, physicochemical, and digestive properties of corn starch-amino acid complexes under hydrothermal treatment[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 160: 741-749.
- [22] PRIMO-MARTÍN C, VAN NIEUWENHUIJZEN N H, HAMER R J, et al. Crystallinity changes in wheat starch during the bread-making process: Starch crystallinity in the bread crust[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 45(2): 219-226.
- [23] CHEN Y, XIONG X Y, GAO Q Y. Digestibility and physicochemical properties of starch-galactomannan complexes by heat-moisture treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 853-862. 完
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。