

老化处理对玉米中淀粉含量及其糊化与消化特性的影响

张明丹, 王敏, 陈光选, 彭丹丹, 刘亚楠, 刘娜

(河南工业大学生物工程学院, 河南郑州 450001)

摘要: 通过对玉米进行老化处理, 模拟老化后的生理状态, 研究其淀粉含量、淀粉酶活性、淀粉糊化特性及消化性变化规律对人工老化处理的响应, 以期对玉米淀粉应用及玉米合理储藏提供理论参考。以郑单 958、伟科 702、浚单 29 为材料, 采用高温高湿(42 °C、100% RH) 人工老化的方法, 分析玉米淀粉含量、总淀粉酶活性、 α -淀粉酶活性、淀粉去分支酶活性、淀粉糊化特性及消化性与老化时间的相关性。结果表明: 玉米总淀粉含量、支链淀粉含量、快速消化淀粉含量、总淀粉酶、 α -淀粉酶及淀粉去分支酶活性与老化时间呈显著负相关 ($p < 0.05$), 总淀粉及支链淀粉含量下降率幅度分别为 3.98%~7.07%、4.20%~6.37%, 酶活下降率幅度 40.47%~55.71%; 直链淀粉含量、慢消化淀粉、抗性淀粉含量及峰值时间与老化时间呈显著正相关 ($p < 0.05$), 直链淀粉含量增加率幅度为 13.92%~20.89%, 峰值时间增加范围为 0.47 min~0.66 min; 淀粉的峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、崩解值、消减值与老化时间呈显著负相关 ($p < 0.05$), 对照组及老化处理 8 d, 郑单 958 淀粉峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、崩解值、消减值均高于伟科 702 及浚单 29。

关键词: 淀粉; 人工老化; 酶活; 糊化特性; 消化性

文章编号: 1673-9078(2021)02-129-137

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.2.0759

Effect of Aging Treatment on Starch Content, Gelatinization and Digestibility of Corn

ZHANG Ming-dan, WANG Min, CHEN Guang-xuan, PENG Dan-dan, LIU Ya-nan, LIU Na

(School of Biological Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to provide theoretical reference for the application of corn starch and the reasonable storage of corn, the effects of aging on starch content, amylase activity, starch gelatinization characteristics and Starch digestibility of corn seeds with artificial aging treatment under the environment of high temperature and high humidity were explored. The correlation between starch content, total amylase activity, α -amylase activity, starch debranching enzyme activity, starch gelatinization characteristics, starch digestibility of corn seeds and artificial aging under the environment of high temperature and high humidity(42 °C, 100% RH) was analyzed using Zheng Dan 958, Wei Ke 702 and Xun Dan 29 as materials. The results showed that there was significant inverse correlation between the corn starch content, amylopectin content, ready digestible starch, total amylase, alpha amylase, starch branching enzyme activity and artificial aging ($p < 0.05$), the decrease rate of total starch content and amylopectin content were 3.98%~7.07% and 4.20%~6.37%, respectively, and the decrease rate of enzyme activity was 40.47%~55.71%. The artificial aging was significant positive correlation with amylose content, Slowly Digestible Starch, Resistant Starch, peak time ($p < 0.05$), the increase rate of amylose content was 13.92%~20.89%, and the increase range of peak time was 0.47 min~0.66 min.

引文格式:

张明丹,王敏,陈光选,等.老化处理对玉米中淀粉含量及其糊化与消化特性的影响[J].现代食品科技,2020,37(2):129-137

ZHANG Ming-dan, WANG Min, CHEN Guang-xuan, et al. Effect of aging treatment on starch content, gelatinization and digestibility of corn [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 37(2): 129-137

收稿日期: 2020-08-14

基金项目: 河南工业大学谷物资源转化与利用省级重点实验室开放课题 (PL2018009); 中国工程科技发展战略河南研究院战略咨询研究项目 (2020HENZT13); 中原院士基金 (192101510004)

作者简介: 张明丹 (1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全

通讯作者: 刘娜 (1978-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品微生物资源利用

However, it decreased the starch peak viscosity, trough viscosity, breakdown value, final viscosity, setback viscosity ($p < 0.05$), the peak viscosity, trough viscosity, final viscosity, disintegration value and reduction value of Zheng Dan 958 starch were all higher than those of Wei Ke 702 and Xun Dan 29 at 0 and 8 days of artificial aging.

Key words: starch; artificial aging; enzyme activity; gelatinization characteristics; digestibility

玉米胚部约占玉米籽粒的三分之一, 故玉米较其它粮食具有更强的生命活动及更高的呼吸强度, 储藏期间稳定性差^[1,2]。随着储藏时间延长, 玉米中淀粉会发生量变及结构变化, 从而影响其商业价值^[3], 玉米淀粉是玉米籽粒的主要组成部分(约占籽粒重量的75%左右), 也是决定玉米品质的重要因素之一^[4]。玉米淀粉是人类主要的食物来源以及重要的工业原料, 约占世界淀粉市场总量的80%以上, 在食品、农业饲料、石油、医用等多个行业中均有应用^[5]。玉米储藏不当会造成巨大经济损失, 因此, 玉米的耐储性研究较为迫切。

耐储性研究主要为自然老化法和人工加速老化法, 由于自然老化需较长时间, 为便于研究老化机理, Rajjou^[6]等提出人工加速老化的方法。Ellis^[7]等认为, 在-13℃~80℃进行老化处理, 其老化规律一致, 因此, 人工老化处理方法已成为研究耐储性的通用方法。随老化时间的延长, 玉米发芽指标、超氧化物歧化酶、过氧化物酶及过氧化氢酶随之降低, 而浸出液可溶性糖质量分数及相对电导率总体升高^[8-11]。商品淀粉进行高温高湿处理, 使淀粉膨胀度及消化性降低, 淀粉颗粒中心出现凹坑, 颗粒结晶程度增加, 淀粉透明度降低^[12-14]。本文供试材料选用玉米籽粒, 从玉米籽粒(玉米淀粉来源)为材料分析淀粉糊化及消化性质的变化。目前关于玉米籽粒的淀粉含量、淀粉相关酶活性、淀粉糊化特性及淀粉消化性变化研究较少。本研究采用高温(42℃)、高湿(100% RH)的人工老化处理方法, 通过对3个玉米品种进行处理, 模拟老化后的生理状态, 研究其淀粉含量、淀粉酶活性(总淀粉酶、 α -淀粉酶、淀粉去分支酶)、淀粉糊化特性及淀粉消化性的变化规律对人工老化处理的响应, 以期为玉米淀粉的应用及玉米的合理储藏提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

材料: 郑单 958 由河南秋乐种业有限公司提供; 伟科 702 由河南金苑种业有限公司提供; 浚单 29 由鹤壁农科院提供。

主要试剂: EDTA, 郑州银丰化学试剂有限公司; β -巯基乙醇、MES, 上海麦克林生化科技有限公司;

3,5-二硝基水杨酸, 国药集团化学试剂有限公司; 30℃~60℃沸程石油醚, 天津市天力化学试剂有限公司; 以上试剂均为国产分析纯。直链淀粉标准品、支链淀粉标准品、麦芽糖标准品, 北京索莱宝生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

HWS 型智能恒温恒湿箱, 宁波江南仪器厂; RVA-TecMaster 快速粘度仪, 波通瑞华科学仪器有限公司; Tecan 多功能酶标仪, 瑞士 Tecan 有限公司。

1.3 试验方法及测定指标

1.3.1 样品处理

将三个供试品系玉米用纱网袋封装, 每袋 500 g, 每天放入高温(42℃)、高湿(100% RH)环境中1袋, 共计7d, 第8d时将玉米取出放在阴凉室温环境下晾2d, 以未经老化玉米做为对照(CK)。

1.3.2 淀粉含量的测定

淀粉含量的检测方法参照张越^[15]的方法, 采用酸水解-斐林试剂滴定法, 略有改动(石油醚代替乙醚以除去脂肪)。

称取约 20 g 玉米粒, 湿法提取玉米淀粉^[16], 所得玉米淀粉用于直链淀粉、支链淀粉含量及淀粉糊化及消化性的测定。直链淀粉、支链淀粉含量采用双波长分光光度法^[17]。

1.3.3 淀粉酶的测定

采用 DNS 比色法。淀粉酶活性及 α -淀粉酶活性参照李雯^[18]的测定方法。淀粉去分支酶活性测定参照胡育峰^[19]的方法, 酶活定义为在 30℃下每 min 水解支链淀粉产生 1 μ mol 还原糖(麦芽糖)的酶量为 1 个酶活单位(U)。在 520 nm 测得麦芽糖标准曲线为 $y = 0.4617x - 0.0097$, $R^2 = 0.9974$ 。

1.3.4 淀粉糊化特性的测定

采用《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定快速黏度仪法》GB/T 24853-2010 测定玉米淀粉的糊化特性。

1.3.5 淀粉体外消化性的测定

淀粉消化性测定参照 Englyst^[20]提出的体外模拟酶水解法, 具体做法参考张斌^[21]的方法。

1.4 试验数据统计及分析

所有实验均重复测定 3 次，结果取平均值。结果采用 SAS 9.2 进行差异性显著分析，SPSS 25 进行皮尔逊相关性分析，Origin 8.5 进行数据处理及绘图。

2 结果与分析

2.1 储藏期间淀粉含量及淀粉酶活性的变化

三个供试品系淀粉总含量均随老化时间的增加呈下降趋势且差异达显著性水平 ($p < 0.05$) (表 1)，这与马平安研究结果一致^[8]。三种玉米老化处理至第 8 d，郑单 958、伟科 702 及浚单 29 淀粉含量较对照组下降率分别为 7.07%、5.73%、3.98%。由表 1 可知三种玉米淀粉含量以较稳定的速率下降，表明高温高湿储藏环境使玉米淀粉含量降低，我国 90% 淀粉生产行业以玉米作为原料，玉米淀粉的生产在玉米加工行业中占举足轻重的地位，因此玉米在储藏过程中淀粉含量的下降会对淀粉的生产产生负面影响。

表 1 老化处理过程中不同品种玉米的淀粉含量

Table 1 Starch content of different maize varieties during aging

| 老化天数/d | 淀粉含量/% | | |
|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 郑单 958 | 伟科 702 | 浚单 29 |
| 0 | 73.56±0.11 ^a | 73.12±0.43 ^a | 72.69±0.24 ^a |
| 1 | 73.12±0.14 ^b | 72.91±0.57 ^b | 72.16±0.20 ^b |
| 2 | 71.10±0.20 ^c | 72.16±0.19 ^c | 72.14±0.21 ^b |
| 3 | 71.01±0.31 ^c | 72.13±0.20 ^c | 71.84±0.16 ^c |
| 4 | 69.60±0.16 ^d | 71.62±0.25 ^d | 71.69±0.24 ^d |
| 5 | 69.56±0.35 ^d | 71.01±0.38 ^e | 71.42±0.29 ^e |
| 6 | 69.22±0.37 ^e | 70.30±0.22 ^f | 71.01±0.21 ^f |
| 7 | 69.12±0.24 ^e | 69.80±0.14 ^g | 70.20±0.32 ^g |
| 8 | 68.36±0.11 ^f | 68.93±0.25 ^h | 69.80±0.14 ^h |

注：不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。

测得支链淀粉和直链淀粉的最大吸收波长为 550 nm 和 585 nm，按照双波长的等吸收点波长法作图可以确定支链淀粉的检测波长为 550 nm 和 715 nm，直链淀粉的检测波长为 464 nm 和 585 nm。直链淀粉测定的标准曲线为 $y = 7.4407x - 0.0179$ ，其 $R^2 = 0.999$ 。支链淀粉测定的标准曲线为 $y = 2.0561x - 0.0225$ ，其 $R^2 = 0.9991$ 。根据所得标准曲线测得玉米样品直链及支链淀粉含量如图 1。

由图 1a 可以看出，整个老化储藏过程中三个供试品系玉米的直链淀粉 (amylose, AM) 含量总体呈上升趋势。老化处理过程中，伟科 702 直链淀粉含量均

低于浚单 29 及郑单 958。经老化处理后：伟科 702、郑单 958 及浚单 29 直链淀粉较对照组增加率分别为 20.89%、13.92%、16.41%。表明玉米在高温高湿储藏环境中会产生直链淀粉含量增加的现象，赵佳^[22]等的研究也证明玉米淀粉经高温高湿处理，直链淀粉含量增加。一般情况下，直链淀粉含量越高的淀粉其抗酶解能力越强，由文中实验结果可以看出，高温高湿处理后随着玉米直链淀粉含量的增加，其消化产物的量也逐渐降低。

由图 1b 可以看出，经人工老化处理，三种玉米支链淀粉 (amylopectin, AP) 含量总体呈下降趋势，伟科 702 支链淀粉下降率及直链淀粉增加率均为三种玉米品种最高，说明伟科 702 淀粉结构较其余两个供试品系在高温高湿环境中易变化，结构稳定性对高温高湿耐受性较差。人工老化储藏过程中，三种供试品系在老化第 2 d 时支链淀粉含量均有不同幅度的增长，Lin^[23]等认为这种现象可能是由于高度支化支链淀粉在淀粉去分支酶 (starch debranching enzyme, DBE) 的作用下向聚合度低的方向转移，短链支链淀粉含量增加。

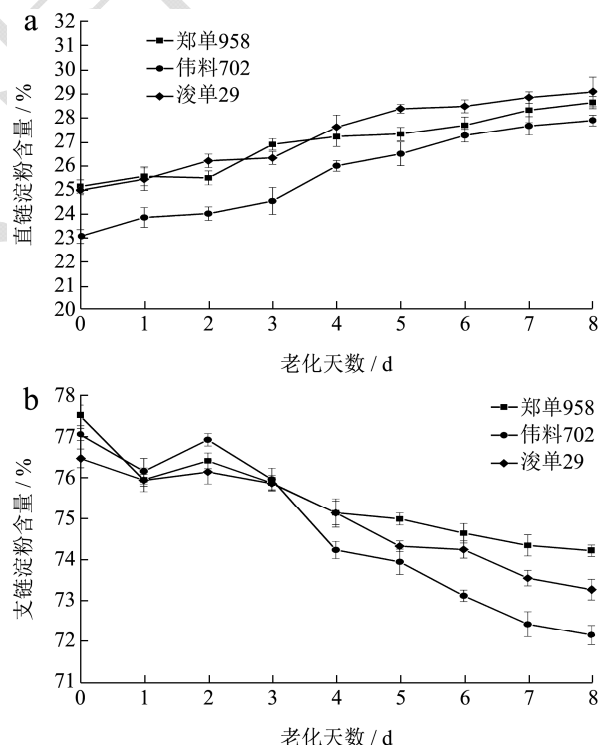


图 1 老化期间直链淀粉及支链淀粉含量变化趋势图

Fig.1 Trend chart of amylose and amylopectin content changes during aging

玉米淀粉的直链淀粉及支链淀粉比例是决定玉米淀粉用途的重要因素，直链淀粉及支链淀粉含量与淀粉粘性相关，支链淀粉含量越高，淀粉粘性越大^[24]，因此玉米淀粉粘性随着老化时间的延长而降低，其适

口感也随之降低。玉米经人工老化储藏后,直链淀粉含量增加,玉米淀粉老化速度加快,食用品质降低^[25]。

2.2 淀粉酶活性的变化

在储藏过程中,对玉米淀粉起降解作用的淀粉水解酶类主要有总淀粉酶, α -淀粉酶,DBE,玉米籽粒中淀粉酶活性变化见图2。

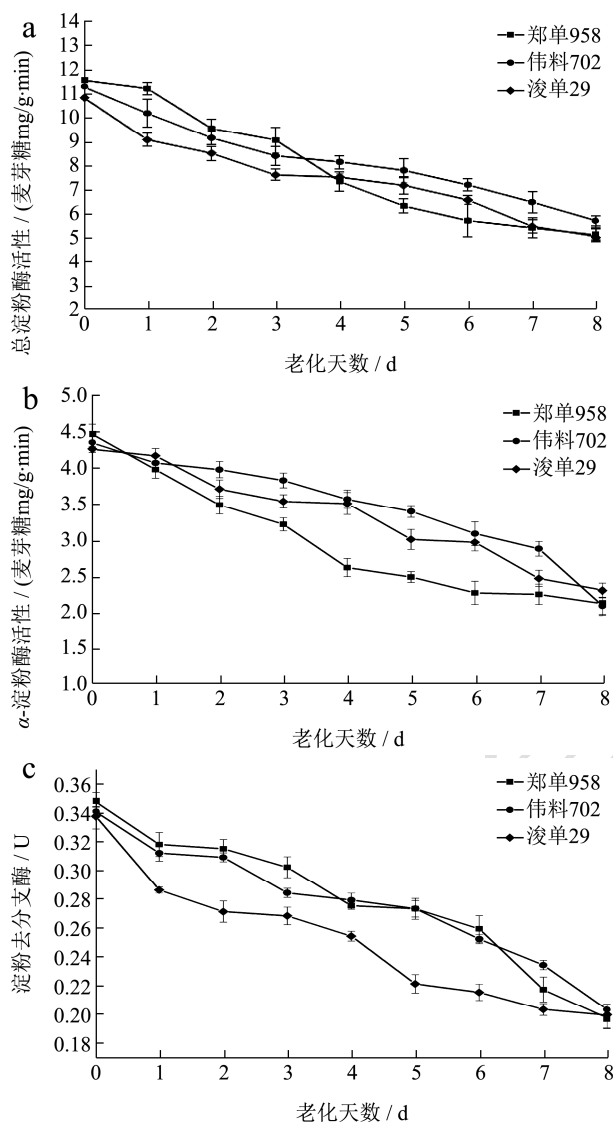


图2 老化期间淀粉酶活性变化趋势图

Fig.2 Trend chart of amylase activity during aging

由图2a、b、c可以看出,在高温高湿人工老化条件下,三个供试品系玉米总淀粉酶、 α -淀粉酶及DBE活性均随老化天数的延长而呈显著下降趋势($p<0.05$)。CK组:种间总淀粉酶、DBE与 α -淀粉酶活性均表现出显著性差异($p<0.05$),郑单958三种酶活性均为供试品系中最高,伟科702次之,浚单29为最低。老化处理至第8d三个供试品系酶活均有不同程度的下降,同品种间比较,DBE活性下降幅度最大,可能由于不同的酶活对湿热环境敏感性存在差异。

结果表明,高温高湿老化使玉米总淀粉酶活性、 α -淀粉酶活性及DBE活性下降显著,下降幅度范围为40%~56%,这与Walters^[26]的研究结果一致。Ball^[27]等构建Glucan trimming模型,认为DBE可以专一裂解支链淀粉中的 α -1,6糖苷键。随着老化时间延长,DBE作用于支链淀粉,支链淀粉侧链断裂,断裂部分为直链结构,使直链淀粉含量增加。由图2c可知,郑单958 DBE活性至老化第4d出现极显著降低,同时郑单958直链淀粉含量增加速率显著下降。伟科702及浚单29至老化第5d直链淀粉含量增加速率减慢,两者直链淀粉含量0~5d的增加速率显著大于其5~8d的增加速率($p<0.01$)。

总淀粉酶和 α -淀粉酶与玉米储藏期间总淀粉含量的变化有关,这两者主要负责淀粉水解,使淀粉水解为还原糖。温雪瓶^[28]等研究也发现玉米粉置于37℃环境储藏28d,其 α -淀粉酶活性下降81.58%,淀粉含量下降趋势稳定,可能由于其储藏时间长于本实验或所用材料处理方式不同,所以其 α -淀粉酶活下降率高于本实验结果。郑单958、伟科702及浚单29在人工老化处理期间总淀粉酶活性、 α -淀粉酶活性下降显著,而其淀粉含量以较稳定速率降低,说明在人工老化处理期间玉米中总淀粉酶及 α -淀粉酶已充分发挥其作用。高温高湿条件加速 α -淀粉酶、DBE活性下降的速率^[29],随 α -淀粉酶活性的下降,籽粒的生命力也随之降低,从而导致玉米发芽率降低,从而影响玉米经济价值^[8]。

2.3 储藏期间玉米淀粉糊化特性的变化

淀粉的糊化特性是影响淀粉加工的一项重要指标,高温高湿的储藏环境使玉米籽粒中淀粉发生量变及结构变化,从而影响淀粉的糊化特性。郑单958、伟科702及浚单29淀粉糊化均呈双峰结构。该老化过程中不同品系玉米的淀粉糊化特性及相关性分析结果如表2、表3。

由表2可以看出,老化处理前后对比三个供试品系PV、TV、FV、BD、SB均降低,PT、PTP有不同程度的增加($p<0.05$)。未老化处理组中,郑单958 PV、TV、FV、BD、SB均高于伟科702及浚单29,与对照组中郑单958支链淀粉含量高于伟科702及浚单29相一致。结果表明,PV、FV与直链淀粉含量成反比,这与侯汉学^[30]等使用RVA测定不同直链淀粉含量玉米淀粉的糊化特性研究结果一致。Tester^[31]等研究表明支链淀粉引起淀粉颗粒膨胀和糊化,而直链淀粉抑制淀粉的膨胀。因此,随玉米淀粉中直链淀粉含量的增加,淀粉越难糊化。直链淀粉含量影响淀粉的糊化特

性,主要是由于玉米淀粉中直支比影响淀粉的结晶结构;直链淀粉主要分布在淀粉颗粒表面,与支链淀粉缠绕贯穿至结晶区和无定形区,直链淀粉于支链淀粉有“束缚”作用,直链淀粉含量增加,“束缚”作用随之增大,支链淀粉不能充分舒展,抑制淀粉的膨化及糊化,黏度随之降低;直链淀粉易与脂质形成复合物,抑制淀粉膨胀及糊化^[32]。

由表3可知:人工老化对玉米淀粉糊化特性影响显著,老化时间与PV、BD、FV、SB显著正相关,与PT显著负相关。随老化处理时间延长,造成玉米淀粉糊化难度增加及淀粉黏度的降低,高温高湿处理使淀粉颗粒结构致密,颗粒糊化难度增加,直链淀粉-

直链淀粉,支链淀粉-直链淀粉之间的作用增强,糊化后淀粉不易酶解,导致淀粉的消化率降低^[29],从而影响玉米淀粉感官、食用品质及商业用途。

2.4 储藏期间玉米淀粉体外消化性的变化

根据在人体内消化速度,可将淀粉分为快速消化淀粉(rapidly digestible starch, RDS)、慢消化淀粉(slowly digestible starch, SDS)和抗性淀粉(resistant starch, RS)^[20],三种玉米的直链淀粉与支链淀粉含量随人工老化处理时间的延长发生改变,从而影响玉米淀粉的消化性,结果如表4所示。

表2 老化处理过程中不同品种玉米的淀粉糊化特性

Table 2 Starch gelatinization characteristics of different maize varieties during aging treatment

| 玉米品种 | 老化天数/d | PV/cp | TV/cp | BD/cp | FV/cp | SB/cp | PT/min | PTP/°C |
|--------|--------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 郑单 958 | 0 | 3230±10 ^a | 1796±16 ^b | 1434±8 ^a | 3498±18 ^a | 1702±13 ^a | 4.40±0.03 ^f | 77.05±1.2 ^b |
| | 1 | 3061±18 ^c | 1769±12 ^{cd} | 1288±8 ^b | 3353±22 ^c | 1604±5 ^c | 4.46±0.03 ^f | 77.10±1.1 ^{ab} |
| | 2 | 3088±12 ^b | 1830±7 ^a | 1258±9 ^c | 3455±15 ^b | 1625±8 ^b | 4.67±0.04 ^e | 77.05±1.3 ^b |
| | 3 | 2892±15 ^d | 1824±13 ^a | 1068±7 ^d | 3271±13 ^d | 1447±11 ^d | 4.73±0.03 ^{cd} | 77.10±1.3 ^{ab} |
| | 4 | 2859±9 ^e | 1794±7 ^b | 1065±14 ^d | 3215±19 ^e | 1421±8 ^e | 4.76±0.02 ^d | 77.15±1.5 ^a |
| | 5 | 2832±11 ^f | 1783±16 ^{bc} | 1049±6 ^d | 3134±21 ^f | 1351±10 ^f | 4.80±0.04 ^{cd} | 77.10±1.0 ^{ab} |
| | 6 | 2785±19 ^g | 1755±8 ^{de} | 1030±15 ^e | 3106±16 ^f | 1345±7 ^f | 4.86±0.07 ^{bc} | 77.05±1.4 ^b |
| | 7 | 2766±14 ^h | 1749±11 ^{ef} | 1017±8 ^f | 3056±25 ^g | 1307±6 ^g | 4.93±0.03 ^b | 77.10±1.4 ^{ab} |
| | 8 | 2736±13 ⁱ | 1734±15 ^f | 1002±7 ^g | 2986±17 ^h | 1252±9 ^h | 5.06±0.04 ^a | 77.15±1.0 ^a |
| 伟科 702 | 0 | 2961±14 ^a | 1688±9 ^e | 1273±9 ^a | 3383±14 ^a | 1695±15 ^a | 4.46±0.05 ^e | 77.15±1.2 ^b |
| | 1 | 2880±11 ^c | 1630±5 ^g | 1250±7 ^b | 2919±12 ^g | 1289±6 ^f | 4.60±0.01 ^d | 77.25±1.2 ^a |
| | 2 | 2959±16 ^b | 1858±12 ^a | 1101±11 ^c | 3336±13 ^b | 1478±10 ^b | 4.46±0.01 ^e | 77.20±1.3 ^{ab} |
| | 3 | 2832±21 ^d | 1748±7 ^b | 1084±16 ^d | 3123±16 ^c | 1375±9 ^c | 4.69±0.03 ^{cd} | 77.19±1.1 ^{ab} |
| | 4 | 2788±14 ^e | 1728±8 ^c | 1060±5 ^e | 3046±10 ^d | 1318±7 ^d | 4.73±0.02 ^c | 77.20±1.3 ^{ab} |
| | 5 | 2761±15 ^f | 1712±12 ^d | 1049±8 ^e | 3016±13 ^e | 1304±11 ^e | 4.73±0.02 ^c | 77.19±1.1 ^{ab} |
| | 6 | 2720±11 ^g | 1697±6 ^e | 1023±14 ^f | 2995±16 ^f | 1298±9 ^{ef} | 4.80±0.07 ^{bc} | 77.19±1.2 ^{ab} |
| | 7 | 2657±16 ^h | 1645±10 ^f | 1012±13 ^f | 2918±22 ^g | 1265±12 ^g | 4.86±0.02 ^{ab} | 77.21±1.4 ^{ab} |
| | 8 | 2611±19 ⁱ | 1612±7 ^h | 999±5 ^g | 2861±16 ^h | 1249±8 ^h | 4.93±0.06 ^a | 77.21±1.0 ^{ab} |
| 浚单 29 | 0 | 3124±12 ^a | 1784±5 ^b | 1340±5 ^a | 3417±14 ^a | 1633±13 ^a | 4.46±0.02 ^e | 77.10±1.0 ^{ab} |
| | 1 | 2899±19 ^c | 1749±10 ^c | 1150±17 ^b | 3247±10 ^c | 1498±6 ^b | 4.66±0.01 ^d | 77.10±1.2 ^{ab} |
| | 2 | 3002±13 ^b | 1899±9 ^a | 1103±4 ^c | 3406±17 ^a | 1507±14 ^b | 4.66±0.04 ^d | 77.05±1.1 ^b |
| | 3 | 2892±13 ^c | 1891±7 ^a | 1101±9 ^c | 3307±19 ^b | 1416±9 ^c | 4.73±0.03 ^{cd} | 77.15±1.3 ^a |
| | 4 | 2782±17 ^d | 1783±12 ^b | 1099±7 ^c | 3189±20 ^d | 1406±10 ^d | 4.73±0.01 ^c | 77.15±1.4 ^a |
| | 5 | 2752±3 ^e | 1780±8 ^b | 1072±6 ^d | 3123±16 ^e | 1343±13 ^c | 4.80±0.04 ^{bc} | 77.15±1.2 ^a |
| | 6 | 2700±4 ^f | 1758±6 ^c | 1042±12 ^e | 3076±11 ^f | 1318±7 ^f | 4.80±0.05 ^{bc} | 77.10±0.8 ^{ab} |
| | 7 | 2638±11 ^g | 1747±9 ^c | 991±4 ^f | 3024±11 ^g | 1277±9 ^g | 4.93±0.01 ^a | 77.05±1.0 ^b |
| | 8 | 2619±10 ^h | 1714±7 ^d | 905±9 ^g | 2950±12 ^h | 1236±4 ^h | 4.93±0.08 ^a | 77.15±1.2 ^a |

注: PV: 峰值黏度; TV: 低谷黏度; FV: 最终黏度; BD: 崩解值; SB: 回复值; PT: 峰值时间; PTP: 糊化温度; 不同小写字母表示差异显著 ($p<0.05$)。

表 3 老化处理时间与玉米淀粉糊化参数相关性分析

Table 3 Correlation analysis between aging treatment time and gelatinization parameters of corn starch

| 玉米品种 | 老化天数/d | PV | TV | BD | FV | SB | PT | PTP |
|--------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|--------|
| 郑单 958 | 老化天数/d | 1 | | | | | | |
| | PV | -0.945** | 1 | | | | | |
| | TV | -0.691* | 0.581 | 1 | | | | |
| | BD | -0.900** | 0.985** | 0.433 | 1 | | | |
| | FV | -0.967** | 0.968** | 0.749* | 0.913** | 1 | | |
| | SB | -0.968** | 0.988** | 0.635 | 0.960** | 0.987** | 1 | |
| | PT | 0.974** | -0.931** | -0.533 | -0.917** | -0.913** | -0.943** | 1 |
| | PTP | 0.467 | -0.555 | -0.346 | -0.544 | -0.563 | -0.556 | 0.480 |
| 伟科 702 | 老化天数 | 1 | | | | | | |
| | PV | -0.965** | 1 | | | | | |
| | TV | -0.380 | 0.587 | 1 | | | | |
| | BD | -0.911** | 0.801** | -0.014 | 1 | | | |
| | FV | -0.715* | 0.834** | 0.707* | 0.507 | 1 | | |
| | SB | -0.735* | 0.780* | 0.399 | 0.669* | 0.930** | 1 | |
| | PT | 0.941** | -0.992** | -0.581 | -0.795* | -0.857** | -0.812** | 1 |
| | PTP | 0.174 | -0.252 | -0.314 | -0.079 | -0.677* | -0.715* | 0.281 |
| 浚单 29 | 老化天数 | 1 | | | | | | |
| | PV | -0.953** | 1 | | | | | |
| | TV | -0.486 | 0.576 | 1 | | | | |
| | BD | -0.909** | 0.902** | 0.305 | 1 | | | |
| | FV | -0.936** | 0.972** | 0.729* | 0.840** | 1 | | |
| | SB | -0.977** | 0.979** | 0.447 | 0.943** | 0.938** | 1 | |
| | PT | 0.948** | -0.958** | -0.400 | -0.965** | -0.905** | -0.980** | 1 |
| | PTP | 0.053 | -0.084 | -0.086 | -0.074 | -0.094 | -0.079 | -0.001 |

注: **: 在 0.01 级别 (双侧), 相关性显著。*: 在 0.05 级别 (双侧), 相关性显著。

表 4 老化处理过程中不同品种玉米的消化特性

Table 4 Digestion characteristics of different maize varieties during aging treatment

| 玉米品种 | 老化天数/d | RDS/% | SDS/% | RS/% |
|--------|--------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| 郑单 958 | 0 | 91.25±1.6 ^a | 7.06±0.3 ^d | 1.69±0.9 ^f |
| | 1 | 89.04±2.3 ^b | 7.51±0.9 ^d | 3.45±0.6 ^e |
| | 2 | 89.25±1.9 ^b | 7.58±1.2 ^d | 3.17±1.3 ^e |
| | 3 | 87.92±0.4 ^b | 8.24±1.0 ^c | 3.84±0.4 ^e |
| | 4 | 85.86±1.9 ^c | 8.76±0.7 ^c | 5.38±0.7 ^d |
| | 5 | 83.67±0.7 ^d | 8.92±0.6 ^{bc} | 7.41±1.3 ^c |
| | 6 | 81.61±2.5 ^e | 9.55±1.4 ^{ab} | 8.84±0.7 ^b |
| | 7 | 80.44±1.3 ^e | 9.65±0.5 ^{ab} | 9.51±1.1 ^{ab} |
| 伟科 702 | 8 | 80.13±1.8 ^e | 10.07±0.9 ^a | 9.80±0.8 ^a |
| | 0 | 90.03±1.8 ^a | 6.90±1.2 ^e | 3.07±0.7 ^g |
| | 1 | 89.13±1.6 ^{ab} | 7.09±1.4 ^e | 3.78±1.4 ^f |
| | 2 | 89.73±0.7 ^a | 7.22±0.6 ^e | 3.05±0.6 ^g |
| | 3 | 86.57±1.5 ^{bc} | 8.03±1.7 ^d | 5.40±0.2 ^e |

转下页

| 接上页 | | | | |
|-------|---|-------------------------|------------------------|------------------------|
| | 4 | 86.08±2.8 ^c | 8.44±1.5 ^{cd} | 5.48±0.1 ^e |
| | 5 | 84.93±1.3 ^{cd} | 8.67±0.9 ^{bc} | 6.40±1.3 ^d |
| | 6 | 82.62±1.2 ^{de} | 9.07±0.4 ^{ab} | 8.31±0.9 ^c |
| | 7 | 80.45±2.7 ^{ef} | 9.31±1.4 ^a | 10.24±0.5 ^b |
| | 8 | 78.11±1.1 ^f | 9.55±0.6 ^a | 12.34±0.7 ^a |
| 浚单 29 | | | | |
| | 0 | 90.17±2.3 ^a | 7.00±1.4 ^d | 2.83±1.2 ^{fg} |
| | 1 | 89.67±1.6 ^{ab} | 7.26±0.8 ^{cd} | 3.07±0.9 ^f |
| | 2 | 89.93±1.4 ^{ab} | 7.39±1.3 ^{cd} | 2.68±0.7 ^g |
| | 3 | 87.22±2.5 ^{bc} | 8.33±1.7 ^{bc} | 4.45±0.5 ^d |
| | 4 | 85.27±0.7 ^{cd} | 8.71±1.5 ^b | 6.02±1.2 ^c |
| | 5 | 83.02±0.9 ^{de} | 8.94±1.2 ^{ab} | 8.04±1.3 ^c |
| | 6 | 82.56±2.1 ^{de} | 9.05±0.6 ^{ab} | 8.39±0.8 ^c |
| | 7 | 80.72±1.7 ^{ef} | 9.46±1.2 ^{ab} | 9.82±0.4 ^b |
| | 8 | 78.91±1.9 ^f | 9.94±0.4 ^a | 11.15±1.0 ^a |

注: 不同小写字母表示差异显著 ($p<0.05$)。

从表 4 可看出, 人工老化处理使玉米淀粉的 SDS 和 RS 含量增加, 老化至第 8 d 三个供试品系玉米淀粉的 SDS 和 RS 的含量达到最大值。对照组中 RDS 含量较高, 老化处理后淀粉中 RDS 含量显著降低, 伟科 702 的 RDS 含量减少了 11.92%, 为三种玉米中 RDS 减少最多的品种, 与伟科 702 其直链淀粉及支链淀粉含量变化为三种玉米中最高者相呼应, 说明支链淀粉及直链淀粉含量变化对玉米淀粉的消化性有影响, RS 含量的增加伴随着直链淀粉含量的提高, 普遍认为, SDS 主要由支链淀粉老化形成, RS 由直链淀粉老化形成^[33], RS 较 SDS 难消化的原因可能是与支链淀粉相比, 直链淀粉易与油脂等化合物形成复合物, 导致其更难于被消化。

3 结论

3.1 42 °C、100%RH 的条件下, 玉米籽粒经人工老化处理 8 d: 总淀粉含量及支链淀粉含量下降率幅度分别为 3.98%~7.07%、4.20%~6.37%, 直链淀粉含量增加率幅度为 13.92%~20.89% ($p<0.05$); 总淀粉酶、 α -淀粉酶及 DBE 活性呈下降趋势 ($p<0.05$), 下降率幅度为 40.47%~55.71%, 同品种比较三种酶活降低幅度, DBE 活性下降幅度最大; 其淀粉 PV、TV、FV、BD、SB 均降低($p<0.05$), 降低幅度分别为 11.82%~16.17%、3.45%~4.50%、13.67%~15.43%、21.52%~32.46%、24.31%~26.44%, PT 及 PTP 分别增加 0.47 min~0.66 min、0.05 °C~0.1 °C; 玉米籽粒淀粉的消化性降低, RDS 含量下降了 11.12~11.92 个百分点。

3.2 淀粉含量、支链淀粉含量、总淀粉酶、 α -淀粉酶、DBE 活性、RDS 及 PV、FV、BD、SB 与老化处理时

间呈负相关, 直链淀粉含量、PT、SDS、RS 与老化处理时间呈正相关。玉米经高温高湿人工老化处理后总淀粉含量及支链淀粉含量减少, 直链淀粉含量增加, 淀粉糊化黏度下降, 淀粉消化率降低, 不利于玉米淀粉的生产加工及人体消化利用, 降低了其食用品质。

参考文献

- [1] 王若兰, 马良, 梁竣祺. 高温储藏玉米品质变化研究[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(1): 98-101
WANG Ruo-lan, MA Liang, LIANG Jun-qi. Study on changes in quality of high-temperature stored maize [J]. Cereals, Oils and Foodstuffs Science and Technology, 2015, 23(1): 98-101
- [2] Panyasak A, Tumwason S, Chotipuntu P. Effect of moisture content and storage time on sweet corn waste silage quality [J]. Walailak Journal of Science & Technology, 2015, 12(3): 237-243
- [3] 马先红, 张文露, 张铭鉴. 玉米淀粉的研究现状[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(2): 9-11
MA Xian-hong, ZHANG Wen-lu, ZHANG Ming-jian. Research status of corn starch [J]. Grain and Oil, 2019, 32(2): 9-11
- [4] Halting D M, Liang Y, Jachmich S, et al. Strike point splitting in the heat and particle flux profiles compared with the edge magnetic topology in a n=2 resonant magnetic perturbation field at JET [J]. Nuclear Fusion, 2012, 52(5): 54009-54017
- [5] Wrigley C W, Corke H, Seetharaman K, et al. Encyclopedia of Food Grains [M]. 2nd ed. USA: Academic Press, 2016: 194-200

- [6] Rajjou L, Lovigny Y, Groot S P C, et al. Proteome-wide characterization of seed aging in *Arabidopsis*: a comparison between artificial and natural aging protocols [J]. *Plant Physiology*, 2008, 148(1): 620-641
- [7] Ellis R H, Hong T D, Roberts E H. A low-moisture-content limit to logarithmic relations between seed moisture content and longevity [J]. *Annals of Botany*, 1988, 61(4): 405-408
- [8] 马平安.人工老化对玉米种子活力影响[D].郑州:河南农业大学,2010
MA Ping-an. Effect of artificial aging on seed vigor of maize [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010
- [9] 陈婧,李建平,李荣.人工老化处理对糯玉米种子生理生化特性的影响[J].西北农业学报,2016,25(6):857-862
CHEN Jing, LI Jian-ping, LI Rong. Effects of artificial aging treatment on physiological and biochemical characteristics of waxy corn seeds [J]. *Acta Agriculturae Northwest China*, 2016, 25(6): 857-862
- [10] 渠云芳,马金虎,肖璐杰,等.高温老化对两个玉米品种种子活力发芽指标影响的研究[J].农艺科学,2006,22(2):156-159
QU Yun-fang, MA Jing-hu, XIAO Lu-jie, et al. Effect of high temperature aging on seed vigor and germination index of two maize varieties [J]. *Agronomy Science*, 2006, 22(2): 156-159
- [11] 祝煜中,夏黎明,竺思仪,等.人工老化的甜玉米种子活力、生理特性和遗传多样性的变化[J].华南农业大学学报,2018,39(1):25-30
ZHU Yu-zhong, XIA Li-ming, ZHU Si-yi, et al. Changes in seed vigor, physiological characteristics and genetic diversity of artificially aged sweet maize [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2018, 39(1): 25-30
- [12] 高群玉,武俊超,李素玲.湿热处理对不同直链含量的玉米淀粉性质的影响[J].华南理工大学学报,2011,39(9):1-6
GAO Qun-yu, WU Jun-chao, LI Su-ling. Effects of humid heat treatment on the properties of corn starch with different straight-chain contents [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2011, 39(9): 1-6
- [13] 马宏伟.湿热处理对普通玉米淀粉特性的影响[J].食品安全导刊,2018,18(102):129
MA Hong-wei. Effects of heat and humidity treatment on the properties of common corn starch [J]. *Food Safety Guide*, 2018, 18(102): 129
- [14] 高群玉,叶莹,王琳.湿热处理对不同晶型淀粉理化性质及消化性的影响[J].现代食品科技,2015,31(3):60-65
GAO Qun-yu, YE Ying, WANG Lin. Effects of heat and humidity treatment on physicochemical properties and digestibility of starch with different crystal type [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 31(3): 60-65
- [15] 张越,付莉.酸水解-斐林试剂滴定法测定大米淀粉含量的研究[J].食品工业科技,2017,38(20):256-259
ZHANG Yue, FU Li. Study on the determination of rice starch content by acid hydrolyzation-pheline reagent titration method [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(20): 256-259
- [16] 陆学中,曾凡莲,张德榜,等.湿法提取玉米淀粉的工艺优化[J].粮食与饲料工业,2017,11(9):41-46
LU Xue-zhong, ZENG Fan-lian, ZHANG De-bang, et al. Technology optimization of corn starch extraction by wet method [J]. *The Grain and Feed Industry*, 2017, 11(9): 41-46
- [17] 张升晖,覃海兵,洪雁.蕨根淀粉理化性质研究[J].食品科学,2008,29(9):115-117
ZHANG Sheng-hui, QIN Hai-bing, HONG Yan. Study on physicochemical properties of fern root starch [J]. *Food Science*, 2008, 29(9): 115-117
- [18] 李雯,邵远志,陈维信.淀粉酶活性测定方法的改进[J].植物生理学报,2005,41(5):655-656
LI Wen, SHAO Yuan-zhi, CHEN Wei-xin. Improvement of amylase activity determination method [J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 2005, 41(5): 655-656
- [19] 胡育峰,文迪,张军杰.不同玉米骨干自交系种子萌发时淀粉分解酶类活性动态变化[J].四川农业大学学报,2013,31(2):127-130
HU Yu-feng, WEN Di, ZHANG Jun-jie. Dynamic changes in the activity of starch decomposition enzymes during seed germination of different maize backbone inbred lines [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2013, 31(2): 127-130
- [20] Englyst H N, Kingman S M, Cummings J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1992, 46: 33S-50S
- [21] 张斌,罗发兴,黄强,等.不同直链含量玉米淀粉结晶结构及其消化性研究[J].食品与发酵工业,2010,8(17):26-30
ZHANG Bin, LUO Fa-xing, HUANG Qiang, et al. Study on crystalline structure and digestibility of corn starch with different straight-chain contents [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2010, 8(17): 26-30
- [22] 赵佳,杜双奎,周丽卿.湿热处理对普通玉米淀粉特性的影响[J].农业机械,2011,20(14):127-130
ZHAO Jia, DU Shuang-kui, ZHOU Li-qing. Effects of humid heat treatment on the properties of common corn starch [J].

- Agricultural Machinery, 2011, 20(14): 127-130
- [23] Lin J H, Singh H, Cio J Y, et al. Genotype diversity in structure of amylopectin of waxy rice and its influence on gelatinization properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(2): 1858-1864
- [24] 王欣宇.玉米储藏期间品质变化浅论[J].现代畜牧科技, 2018,4(34):37
WANG Xin-yu. A brief discussion on the quality change of corn during storage [J]. Modern Animal Husbandry Technology, 2008, 4(34): 37
- [25] 范雪荣,潘鹏.淀粉种类与结构对其上浆性能的影响[J].棉纺织技术,2018,46(11):7-11
FAN Xue-rong, PAN Peng. Effect of starch type and structure on sizing performance [J]. Cotton Textile Technology, 2008, 46(11): 7-11
- [26] Walters, Christina. Understanding the mechanisms and kinetics of seed aging [J]. Seed Research, 1998, 8(2): 223-244
- [27] Ball S, Guan HP, James M, et al. From glycogen to amylopectin: a model for the biogenesis of the plant starch granule [J]. Cell, 1996, 86(3): 349-352
- [28] 温雪瓶,马浩然,严俊波,等.谷物粉贮藏过程中主要成分的变化规律及其相关性分析[J].粮食与油脂,2016,29(1):49-52
WEN Xue-ping, MA Hao-ran, YAN Jun-bo, et al. Variation rule and correlation analysis of main components in grain flour during storage [J]. Grain and Oil, 2016, 29(1): 49-52
- [29] 畅鹏飞,修琳,郑明珠,等.高温高湿贮藏对玉米淀粉合成关键酶的影响[J].中国粮油学报,2015,30(11):45-49
CHANG Peng-fei, XIU Lin, ZHENG Ming-zhu, et al. Effects of high temperature and high humidity storage on key enzymes of corn starch synthesis [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2015, 30(11): 45-49
- [30] 侯汉学,董海洲,宋晓庆,等.不同品种玉米淀粉的理化性质及相关性研究[J].中国粮油学报,2009,24(1):67-71
HOU Han-xue, DONG Hai-zhou, SONG Xiao-qing, et al. Study on physicochemical properties and correlation of different corn starch varieties [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2009, 24(1): 67-71
- [31] Tester R F, Morrison W R. Swelling and gelatinization of cereal starches I. effects of amylopectin, amylose, and lipids [J]. Cereal Chemistry, 1990, 67(6): 551-557
- [32] 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 Qiang, WANG Chan, LUO Fa-xing, et al. Thermodynamic properties and digestibility of corn starch [J]. Journal of South China University of Technology, 2011, 39(9): 7-11
- [33] Shi M M, Gao Q Y. Physicochemical properties, structure and *in vitro* digestion of resistant starch from waxy rice starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 84(3): 1151-1157

(上接第 267 页)

- [35] Anne L, Le Bret Bénédicte, Isabelle L, et al. How muscle structure and composition influence meat and flesh quality [J]. Scientific World Journal, 2016, 2016: 1-14
- [36] 丰永红,李海鹏,张松山,等.牛肉肌纤维类型差异及成熟过程中组织蛋白酶活性研究[J].农业机械学报,2020,51(7): 355-364
FENG Yong-hong, LI Hai-peng, ZHANG Song-shan, et al. Study on the difference of beef muscle fiber types and cathepsin activity during maturation [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 355-364
- [37] Lomiwes D, Farouk M M, Frost D A, et al. Small heat shock proteins and toughness in intermediate pH beef [J]. Meat Science, 2013, 95(3): 472-479
- [38] 王复龙,卢桂松,王娜,等.南阳牛与延边牛牛肉感官品质和加工特性比较研究[J].食品科学,2013,34(23):62-66
WANG Fu-long, LU Gui-song, WANG Na, et al. Comparative study on sensory quality and processing characteristics of Nanyang beef and Yanbian beef [J]. Food Science, 2013, 34(23): 62-66
- [39] 赵改名,李佳麒,祝超智,等.云岭牛不同部位肉的品质特性分析[J].现代食品科技,2020,36(3):22-28
ZHAO Gai-ming, LI Jia-qi, ZHU Chao-zhi, et al. Analysis of meat quality characteristics of different parts of Yunling beef [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(3): 22-28
- [40] 周长旭,靳红果,辛营营,等.蛋白质质量浓度对鸡蛋热诱导凝胶特性的影响[J].食品科学,2012,33(9):118-121
ZHOU Chang-xu, JIN Hong-guo, XIN Ying-ying, et al. Effect of protein concentration on egg-induced heat-induced gel properties [J]. Food Science, 2012, 33(9): 118-121