

类胡萝卜素含量对谷物蒸煮品质的影响

赵欣, 梁克红*, 朱宏, 王靖
(农业农村部食物与营养发展研究所 北京 100081)

摘要 类胡萝卜素是谷物中最重要的营养物质,对人体具有重要的健康作用。目前人们对类胡萝卜素与蒸煮品质相关性的了解较为有限。本文综述谷物中类胡萝卜素的组成和分布、类胡萝卜素与蒸煮品质的关系以及类胡萝卜素的吸收利用和健康效应进行了综述,提出谷物类胡萝卜素研究中存在的问题,以期为其高效利用提供参考。

关键词 谷物; 类胡萝卜素; 蒸煮品质; 合成分解; 吸收利用

文章编号 1009-7848(2022)09-0398-08 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.09.040

类胡萝卜素是具有长共轭多烯链的 C40 类异戊二烯,分为胡萝卜素和叶黄素两类^[1]。类胡萝卜素具有重要的营养价值, β -胡萝卜素、 α -胡萝卜素和 β -隐黄素是动物体内合成维生素 A 的前体物质,缺乏维生素 A 可导致夜盲症、干眼症、角膜溃疡等^[2]。玉米黄质、叶黄素等叶黄素类物质,可防止年龄相关的黄斑退化^[3]。此外,类胡萝卜素在调节免疫系统、生长因子和细胞内信号通路(缝隙连接通讯),调节细胞分化、细胞周期和凋亡、光保护抗肿瘤等方面发挥作用,降低患慢性病和某些类型癌症的风险等方面具有重要作用^[4-5]。可预防退行性眼损伤,如夜盲、干眼症、角膜溃疡和病变。然而,人体自身无法合成类胡萝卜素,必须通过食用含有类胡萝卜素的果蔬、粮食等食物进行补充。谷物是世界大部分人口的主食,为人体提供了大部分能量^[6]。虽然谷物中的类胡萝卜素含量低于大多数水果和蔬菜,但是作为主食的谷物目前仍是日常补充类胡萝卜素的主要方式。蒸煮品质是评价谷物食用品质的一个重要指标。类胡萝卜素含量直接影响谷物的外观品质。前期研究发现类胡萝卜素含量与谷物蒸煮品质具有一定的相关性^[7]。了解谷物中类胡萝卜素含量的组成与分布,研究类胡萝卜素与蒸煮品质的关系,对日常饮食中类胡萝卜素的摄入、谷物的加工育种均具有重要的意

义。本文综述谷物中类胡萝卜素含量与分布,类胡萝卜素与谷物蒸煮品质的关系,谷物中类胡萝卜素的转化与损失、吸收代谢及健康效应,旨在为谷物的食用及加工利用提供一定的理论参考。

1 谷物中的类胡萝卜素

谷物(包括小麦、玉米、水稻、高粱等)中的类胡萝卜素主要由叶黄素组成,叶黄素含量最高,其次是玉米黄质,此外还有少量的 β -隐黄素、 α -和 β -胡萝卜素,占比范围为 3%至 5%^[8]。通常黄色谷物中的胡萝卜素含量较高,在传统小麦中类胡萝卜素的总含量为 1.178~3.345 mg/kg(表 1),叶黄素含量在 0.22~12.64 mg/kg 之间,玉米黄质含量在 0.038~0.369 mg/kg 之间,不同颜色的小麦类胡萝卜素含量差异显著。袁园园等^[9]研究表明,紫粒小麦和黄色小麦的类胡萝卜素含量高于蓝粒小麦。玉米类胡萝卜素含量为 9.55~62.96 mg/kg(表 1),叶黄素含量在 3.5~35.0 mg/kg 之间,玉米黄质含量在 18.5~26.95 mg/kg 之间,红色玉米色素主要由花色苷、类胡萝卜素组成,黄色玉米色素主要由类胡萝卜素组成,黑色、紫色玉米色素主要由花色苷组成^[10]。高粱类胡萝卜素含量为 3.82~19.50 mg/kg^[11-12](表 1),而普通白色的稻米中几乎不含有类胡萝卜素。小米黄色素含量变幅较大,黄小米黄色素含量 5.40~19.55 mg/kg,绿小米黄色素含量 10.14~16.44 mg/kg,白小米黄色素含量较低,变幅为 1.10~2.49 mg/kg^[13]。本研究团队对不同品种小米中的类胡萝卜素含量进行测定,其中叶黄素含量为 17.18~27.95 mg/kg,玉米黄质含量为 3.27~5.29

收稿日期: 2021-09-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31801605);
中央级公益性科研院所基本科研业务费项目
(1610422021005)

作者简介: 赵欣(1993—),女,硕士

通信作者: 梁克红 E-mail: liangkehong@caas.cn

mg/kg。此外,在燕麦及大麦中也含有一定量的类胡萝卜素。

类胡萝卜素在籽粒中的定位和分布也因谷类而异。玉米籽粒中,超过 70%的类胡萝卜素位于玻璃质胚乳,其余的分布在粉质胚乳、胚芽和麸皮部分^[14],不同颜色的玉米类胡萝卜素具有相似的分佈^[10]。高粱中类胡萝卜素在胚乳和果皮中积累的比例也较高^[15-16]。大麦、小麦和燕麦的胚芽类胡萝卜素含量分别比其全麦的总类胡萝卜素含量高

4.0,3.5 倍和 3.3 倍,其类胡萝卜素主要集中在胚芽中^[17],而胚乳和麸皮成分中的含量相对较少。生糙米中,类胡萝卜素包括叶黄素、玉米黄质,胡萝卜素和/或番茄红素在麸皮和外胚乳中积累,而含有核心胚乳的碾磨部分通常不含类胡萝卜素^[18]。玉米的叶黄素主要分布在胚乳和糊粉层中,小麦、大麦和燕麦的叶黄素分布在糊粉层和胚芽中。小麦的玉米黄质集中在胚芽部分^[8],玉米则集中在胚乳中^[19]。

表 1 谷物中的类胡萝卜素含量

Table 1 Carotenoids in cereals

| 种类 | 叶黄素含量/mg·kg ⁻¹ | 玉米黄质含量/mg·kg ⁻¹ | 类胡萝卜素总含量/mg·kg ⁻¹ | 参考文献 |
|----|---------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------|
| 小麦 | 0.22~12.64 | 0.038~0.369 | 1.178~3.345 | [20],[21] |
| 玉米 | 3.5~35.0 | 18.5~26.95 | 9.55~62.96 | [9] |
| 水稻 | 0~0.06 | - | 0.2~10 | [22] |
| 高粱 | 0.01~0.06 | - | 3.82~19.50 | [15],[23],[24] |
| 小米 | - | - | 1.10~19.55 | [25] |
| 燕麦 | - | - | 1.75~1.85 | [17] |
| 大麦 | - | - | 2.25~4.25 | |

2 类胡萝卜素与谷物蒸煮品质的关系

不同谷物具有不同的蒸煮特性,谷物的蒸煮品质一般受到直链淀粉含量、支链淀粉含量、蛋白质含量等因素的影响,而支链淀粉与总淀粉的比率、粗淀粉含量对蒸煮食用综合评分影响较小^[26]。

与普通稻米相比,深色稻米的蒸煮性较差,难以消化吸收^[27],这说明谷物的色泽也是影响谷物蒸煮品质的一个重要因素。谷物的色泽通常由类胡萝卜素、花青素等色素产生,颜色是衡量谷物外观品质的重要因素,决定谷物的商品价值,也是谷物品质育种的重要指标。与其它颜色相比,黄色谷物通常具有较好的蒸煮特性。小米米色与蒸煮后米饭的香味、色泽、适口性等呈显著正相关,米色越黄,米饭香味越浓,适口性越好^[25]。在小麦面条制作中加入类胡萝卜素泥,可以显著提高面条中的类胡萝卜素含量,使其硬度(27.06%)、弹性(79.78%)和内聚性(0.74%)降低,蒸煮品质较优^[28]。有研究发现,类胡萝卜素含量与全麦粉黄度呈极显著正相关,与全麦粉白度呈极显著负相关。Ren 等^[29]研究表明类胡萝卜素含量与高峰黏度、低谷黏度、稀懈值、最终黏度、容重、形成时间呈极显著负相关。张晓等^[30]研究表明淀粉糊化参数中,

峰值黏度、低谷黏度、稀懈值、最终黏度和峰值与小麦粉及鲜面片黄度值 b 呈负相关。湿面筋色泽与全麦粒类胡萝卜素含量呈正相关^[31]。杨成元等^[32]研究表明小米色度越黄其滋气味、黏弹性、适口性越好。王玉文等^[33]研究表明,小米色泽越黄,米色的评分越高,其适口性越好;米色与米饭的香味、色泽、适口性呈极显著正相关,米色与米饭的香味、色泽、适口性有极显著正相关,相关系数分别为 0.630,0.824,0.6965,米色越黄,米饭的香味、色泽和适口性越好,色泽与香味的相关系数高达 0.9250。可见,谷物类胡萝卜素含量与谷物蒸煮食用品质可能存在一定的相关性。本研究团队对 9 个品种的小米中的类胡萝卜素含量与蒸煮品质(直链淀粉和胶稠度)进行相关性分析^[7],结果与已有报道^[34]一致,叶黄素、玉米黄质、总类胡萝卜素含量与胶稠度呈显著正相关($P < 0.05$)(表 2)。蒸煮品质通常包括直链淀粉、胶稠度、糊化特性等指标,是决定其市场接受度和加工特性的重要因素。直链淀粉含量影响谷物的食味品质,直链淀粉含量低的软米食味品质优于直链淀粉含量高的硬米。直链淀粉含量的改变影响淀粉的晶体结构,使淀粉糊化品质发生变化,最终导致稻米蒸煮食味

品质的差异。胶稠度反映糊化的淀粉粒冷却后复原的趋向,是直链淀粉与支链淀粉两类分子综合作用的结果,胶长越长,米饭越软,蒸煮性越好^[34]。蒸煮食味品质好的稻米一般峰值黏度大、崩解值大、最终胶黏度小、消减值小,起始糊化温度低^[35]。对不同米色小米与糯玉米籽粒的研究表明类胡萝卜素含量与淀粉含量呈显著负相关。部分有色谷物中虽含有较高含量的类胡萝卜素,但低于其花色苷含量,表明高花色苷和色素含量与粗淀粉呈正相关,较高含量的淀粉使有色谷物蒸煮性较差^[36]。此外,在木薯中发现,总类胡萝卜素含量与淀粉糊化温度、峰值时间、回生值、峰面积呈显著负相关,与淀粉含量呈显著负相关^[37]。

蒸煮品质是一个复杂的综合性状,直链淀粉含量、胶稠度和糊化温度三者之间是关联的。谷物中淀粉的合成对蒸煮品质的网络调控很好地解释了3个品质指标的相关性^[38]。有研究表明, β 胡萝

卜素含量影响谷物中淀粉含量。*Ven1*是编码 β -胡萝卜素羟化酶3(HYD3,一种调节淀粉体包膜类胡萝卜素组成的酶)的基因。*Ven1*主要在总冠籽粒中心的淀粉型胚乳细胞中表达,使 β -紫罗兰酮环 α - β -胡萝卜素,产生叶黄素(如叶黄素、玉米黄质)。*Ven1*编码的缺失使非极性类胡萝卜素,如植物烯、番茄红素、 α -和 β -胡萝卜素的累积水平显著提高,而HYD3下游的叶黄素、玉米黄质等极性类胡萝卜素的水平降低。高水平的 β -胡萝卜素似乎可以阻止淀粉质体膜的分解,并影响干燥胚乳细胞中脂质的数量和组成。*Ven1*高表达,使非极性类胡萝卜素含量降低,淀粉体膜形态规则且易降解,从而有利于蛋白体及细胞质在淀粉粒表面的浓缩,形成致密的蛋白质网格结构,这是硬质胚乳形成的重要基础,可能是导致谷物淀粉含量较高的原因^[39]。

表2 Pearson 相关性

Table 2 Pearson correlation coefficient

| | 直链淀粉 | 胶稠度 | 叶黄素 | 玉米黄质 | 总类胡萝卜素 |
|--------|------|--------|--------|--------|--------|
| 直链淀粉/% | 1 | -0.160 | -0.540 | -0.205 | -0.504 |
| 胶稠度/mm | | | 0.827* | 0.898* | 0.861* |

注:“*”代表差异显著。

3 谷物中类胡萝卜素的合成及分解

植物中,类胡萝卜素的合成主要存在于质体中。目前类胡萝卜素的合成途径较为明确,包括缩合、脱氢、环化、羟基化及环氧化5个环节。相比于类胡萝卜素的生物合成,关于其酶促降解的研究报道较少,相关调控机理尚未解析。类胡萝卜素通过酶促降解可以转化成小分子致香物质以及一些香味物质的前体物^[40]。类胡萝卜素降解有3条途径:① β -胡萝卜素羟化酶途径(BCH途径),是 β -胡萝卜素在 β -胡萝卜素羟化酶的作用下经一系列反应最终氧化生成ABA的过程^[41];②脂氧合酶降解途径(LOX途径),LOX通过特异性地作用于含顺,顺-1,4-异戊二烯结构的不饱和脂肪酸,使氧分子插入,生成氢过氧化物脂肪酸后共氧化引起类胡萝卜素的降解^[42];③双加氧酶裂解途径(CCD途径),CCDs是一种非血红素加氧酶^[43],可催化裂解类胡萝卜素不同位置的双键,形成一系列脱辅酶类胡萝卜素,多为挥发性萜类化合物,参

与香气和风味的形成。CCDs家族有9个成员(CCD1、4、7、8和NCED2、3、5、6、9),其中NCED2、3、5、6、9参与植物激素ABA的合成,CCD7、8参与调节侧枝的生产和发育,CCD1、4参与风味物质和挥发性物质的形成^[44]。

谷物中参与类胡萝卜素合成调控的基因包括*ZmLCYB*、*ZmLCYE*、*SiPSY1*、*SiCCD1a*等,这些基因往往通过调控类胡萝卜素的合成降解来影响谷物颜色形成。*SiPSY1*基因对类胡萝卜素具有降解作用,是白米米色形成的主要原因;*SiHYD*的表达促使 β -胡萝卜素大量转化为玉米黄质,是谷物玉米黄质积累的主要原因^[13]。Bai等^[45]认为*ZmLCYB*和*ZmLCYE*转录本的相对积累与最初番茄红素环化产物高度相关,即LYCE/LYCB两种环化酶表达丰度的相对强弱决定底物转化为 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素的比例,进而决定由 α -胡萝卜素生成叶黄素和 β -胡萝卜素生成玉米黄质、新黄质等产物在类胡萝卜素总量中所占比例。*SiLCYB*与

降解基因 *SiHYD* 和 *SiCCD1* 共同作用,通过影响 β -胡萝卜素和总类胡萝卜素在籽粒中的积累,进而影响米色的形成^[46]。*PSY1* 和 *LCYE* 对甜玉米中类胡萝卜素的合成有重要影响^[47]。*lcyE* 和 *zep1* 基因可以影响类胡萝卜素的组成,被发现与色度计的值有关。

4 类胡萝卜素的吸收利用

类胡萝卜素与一系列生物功能有关,这些功能包括抗氧化活性,调节解毒酶,增强免疫系统,上调细胞间通讯,诱导细胞凋亡和调节基因表达。在人体中类胡萝卜素只有溶解在水相中才能在胃肠道消化并被吸收利用。类胡萝卜素的生物利用度非常低, β -胡萝卜素的生物利用度为4%~14%,叶黄素酯的相对利用度为18.55%^[48]。谷物中类胡萝卜素的生物利用度受各种因素的限制,如:类胡萝卜素种类和分子间结构、类胡萝卜素所在基质、类胡萝卜素的异构化等。研究表明,类胡萝卜素和醇溶蛋白(如玉米醇溶蛋白)的关联可改变这些非维生素A源(pVA)类胡萝卜素的稳定性和生物可利用性^[49]。不同类胡萝卜素间的竞争可能影响pVA类胡萝卜素的生物利用率。不同浓度的叶黄素对 β -胡萝卜素的吸收有一定的抑制或促进作用。二价矿物质的存在,特别是镁和钙,限制了蔬菜、水果中膳食脂肪的摄入,从而直接影响植物来源的类胡萝卜素的生物利用度,而对谷物的影响较小。

蒸煮后可以提高类胡萝卜素的生物利用度,粥中的类胡萝卜素具有较高的胶束化率(40%~63%),来自植物材料(例如菠菜)的色素的溶解性较低,可通过微流态化^[50]、煮沸^[51]或在试验餐中加入脂肪来增强^[52]。这可能是因为一些处理方法破坏细胞壁,促进类胡萝卜素的释放和吸收,热处理将一些天然 β -胡萝卜素反式异构体转化为顺式构型^[53]。不同谷物的结合可提高谷物中类胡萝卜素的生物利用度,与玉米(45%~47%)相比,高粱(63%~81%)的类胡萝卜素生物利用率普遍较高,谷物的混合及挤压可提高类胡萝卜素的生物利用率^[54-55]。作为经常食用的食物,富含叶黄素的饼干、松饼和面包有可能提高叶黄素的摄入量,且饼干和松饼的叶黄素生物利用率高于面包^[56]。向消化

混合物中添加油,提高了叶黄素在叶黄素-叶黄素(蕨类植物)中的生物可利用性,与叶黄素补充剂或菠菜相比,蛋黄中叶黄素的生物利用度更高^[52]。在一份关于玉米面包制品的报告中,面包的叶黄素生物利用率高达85%^[57]。在某些情况下,根据血浆反应,补充剂中的类胡萝卜素比全食品中的类胡萝卜素具有更高的生物利用度,同时由于生物分子之间的相互作用,口服高水平的单一类胡萝卜素成分可明显改变其它类胡萝卜素的生物利用度^[58]。

5 问题与展望

类胡萝卜素是一种重要的植物色素,目前并没有统一的膳食推荐量。基于其在人体中的重要作用,受到越来越多的关注。谷物是我国主要的粮食作物,在饮食结构中占据重要地位^[42-43]。随着人们对食品品质及营养需求的提高,谷物的蒸煮品质及健康功效广受重视。今后需要开展的研究包括以下几个方面:

- 1) 研究谷物中类胡萝卜素含量与蒸煮品质的相关性,为谷物育种及提高谷物商业价值提供理论支撑。
- 2) 制定谷物类胡萝卜素含量测定国家标准,加强产品质量监管。
- 3) 开发谷物中类胡萝卜素的新型加工和贮藏技术,提高其生物利用率。
- 4) 研究、评估食品中类胡萝卜素在人类健康中发挥的重要作用。

参 考 文 献

- [1] 郑梦嫒,李文韵,刘雨薇.类胡萝卜素肠道吸收及生物利用度研究进展[J].食品工业科技,2021,42(15):1-17.
ZHENG M M, LI W Y, LIU Y W. Research progress on intestinal absorption and bioavailability of carotenoids[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(15): 1-17.
- [2] CARPENTIER S, KNAUS M, SUH M. Associations between lutein, zeaxanthin, and age-related macular degeneration: An overview [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2009, 49(4): 313-326.

- [3] 李大婧, 庞慧丽, 刘春泉. 叶黄素和玉米黄质对眼睛的保护作用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(9): 1-4.
LI D J, PANG H L, LIU C Q. Research progress on the protective effects of lutein and zeaxanthin on eyes[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(9): 1-4.
- [4] NISHINO H, MURAKOSHI M, TOKUDA H, et al. Cancer prevention by carotenoids [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2009, 483(2): 165-168.
- [5] SANINI R K, KEUM Y S. Carotenoid extraction methods: A review of recent developments[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 90-103.
- [6] 李建玲. 谷物在我国运动营养食品中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(21): 5559-5564.
LI J L. Application of cereals in sports nutrition food in China[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(21): 5550-5564.
- [7] 赵欣, 梁克红, 朱宏, 等. 不同米色小米营养品质与蒸煮品质研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 298-303.
ZHAO X, LIANG K H, ZHU H, et al. Nutritional quality evaluation and analysis on the cooking quality of foxtail millet with different color[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 298-303.
- [8] PANFILI G, FRATIANNI A, IRANO M. Improved normal-phase highperformance liquid chromatography procedure for the determination of carotenoids in cereals[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(21): 6373-6377.
- [9] 袁园园, 徐晓琳, 李将, 等. 紫、蓝粒小麦籽粒营养成分分析与鉴定[J]. 农业科技通讯, 2018(6): 111-113.
YUAN Y Y, XU X L, LI J, et al. Analysis and identification of nutrient components in purple and blue wheat grains[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2018(6): 111-113.
- [10] 崔丽娜, 高荣岐, 孙爱清, 等. 不同基因型玉米籽粒类胡萝卜素与花色苷色素积累规律[J]. 作物学报, 2010, 36(5): 818-825.
CUI L N, GAO R Q, SUN A Q, et al. Regularity of carotenoids and anthocyanins accumulation in various genotypes of maize kernel[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(5): 818-825.
- [11] PAZNOCHT L, KOTIKOVA Z, SULC M, et al. Free and esterified carotenoids in pigmented wheat, tritordeum and barley grains [J]. Food Chemistry, 2017, 240: 670-678.
- [12] PIXLEY K, PALACIOS N, BABU R et al. Biofortification of maize with provitamin A carotenoids: Carotenoids and human health[M]. Tanumihardjo S A, ed. Totowa, NJ, USA: Humana Press Inc, 2013: 271-292.
- [13] 张耀元. 类胡萝卜素代谢相关基因表达模式与小米米色形成的关系[D]. 太谷: 山西农业大学, 2017.
ZHANG Y Y. Relationships between the expression patterns of genes associated with carotenoid metabolism and the formation of millet color [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2017.
- [14] BLESSIN C W, BRECHER J D, DIMLER R J. Carotenoids of corn and sorghum. 5. distribution of xanthophylls and carotenes in hand-dissected and dry-milled fractions of yellow dent corn[J]. Cereal Chemistry, 1963, 40(5): 582-586.
- [15] KEAN E G, EJETA G, HAMAKER B R, et al. Characterization of carotenoid pigments in mature and developing kernels of selected yellow-endosperm sorghum varieties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(7): 2619-2626.
- [16] DE MORAIS CARDOSO L, MONTINI T A, PINHERIO S S, et al. Effects of processing with dry heat and wet heat on the antioxidant profile of sorghum[J]. Food Chemistry, 2014, 152: 210-217.
- [17] NDOLO V U, BETA T. Distribution of carotenoids in endosperm, germ, and aleurone fractions of cereal grain kernels[J]. Food Chemistry, 2013, 139(1): 663-671.
- [18] LAMBERTS L, DELCOUR J A. Carotenoids in raw and parboiled Brown and milled rice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(4): 11914-11919.
- [19] KESN E G, EJETA G, HAMAKER B R, et al. Characterization of carotenoid pigments in mature and developing kernels of selected yellow-endosperm sorghum varieties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(7): 2619-2626.
- [20] ABDEL-AAL E S M, YOUNG J C, RABALSKI I, et al. Identification and quantification of seed carotenoids in selected wheat species[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(3): 787-794.

- [21] SHEWRY P R, HEY S. Do 'ancient' wheat species differ from modern bread wheat in their contents of bioactive components?[J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 65: 236-243.
- [22] KIM J K, LEE S Y, CHU S M, et al. Variation and correlation analysis of flavonoids and carotenoids in Korean pigmented rice (*Oryza sativa* L.) cultivars [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(24): 12804-12809.
- [23] FERNANDEZ M G S, KAPARN L, SOULEY S, et al. Collection and characterization of yellow endosperm sorghum from West Africa for biofortification[J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2009, 56(7): 991-1000.
- [24] 宋幼良, 吴殿星, 钱国壬, 等. 高叶黄素含量水稻突变体的选育及其特征特性[J]. *中国稻米*, 2013, 19(2): 69-70.
SONG Y L, WU D X, QIAN G R. Breeding and characteristics of rice mutants with high lutein content[J]. *China Rice*, 2013, 19(2): 69-70.
- [25] 杨延兵, 管延安, 秦岭, 等. 不同地区谷子小米黄色素含量与外观品质研究[J]. *中国粮油学报*, 2012, 27(1): 14-19.
YANG Y B, GUAN Y A, QIN L, et al. The studies on yellow pigment content and appearance quality of millet from different regions[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2012, 27(1): 14-19.
- [26] 魏常敏, 宋万友, 周文伟, 等. 鲜食糯玉米蒸煮品质综合评分和品质性状相关分析[J]. *湖南农业科学*, 2020, 9: 79-81.
WEI C M, SONG W Y, ZHOU W W, et al. Correlation analysis between cooking comprehensive score and quality traits of fresh waxy corn[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2020, 9: 79-81.
- [27] 马晓娟. 关于稻米的蒸煮及食味评价的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2005.
MA X J. Study on rice-cooking and rice eating-test [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2005.
- [28] PRERANA S, ANUPAMA D. Influence of carrot puree incorporation on quality characteristics of instant noodles[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2020, 43(3): e13270.
- [29] REN D Q, WU Y Y, ZHOU J, et al. Correlation between carotenoids content and several quality traits of wheat varieties[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2015, 16(9): 1883-1890, 1977.
- [30] 张晓, 田纪春, 朱冬梅. 小麦 RIL 群体中小麦粉及面片色泽与主要品质性状的相关分析[J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(6): 1-6.
ZHANG X, TIAN J C, ZHU D M. Correlation between quality traits and color of flour and dough sheet in RIL populations[J]. *Journal of The Chinese Cereals and Oils Association*, 2009, 24(6): 1-6.
- [31] 方震, 杨紫薇. 硬粒小麦类胡萝卜素的研究[J]. *粮食与油脂*, 1996(3): 14-16.
FANG Z, YANG Z W. Study on durum wheat carotenoids[J]. *Cereals & Oils*, 1996(3): 14-16.
- [32] 杨成元, 侯东辉, 陈丽红, 等. 山西十种小米理化指标及蒸煮品质研究[J]. *东北农业科学*, 2020, 45(3): 25-29, 40.
YANG C Y, HOU D H, CHEN L H, et al. Research on physical and chemical indexes and cooking quality of ten kinds of millet in Shanxi[J]. *Journal of Northeast Agricultural Science*, 2020, 45(3): 25-29, 40.
- [33] 王玉文, 李会霞, 田岗, 等. 小米外观品质及淀粉 RVA 谱特征与米饭适口性的关系[J]. *山西农业科学*, 2008, 36(7): 34-39.
WANG Y W, LI H X, TIAN G, et al. Relationship between cooked millet Palatability and both visual quality and RVA Profile Character of starch[J]. *Shanxi Agricultural Science*, 2008, 36(7): 34-39.
- [34] 赵海云, 陈继富, 刘金香, 等. 晋谷 21 号米质与外界因素关系的研究[J]. *杂粮作物*, 2003, 23(5): 276-278.
ZHAO H Y, CHEN J F, LIU J X, et al. Relationship between external quality of a millet hybrid 'Jingu 21'[J]. *Rain Fed Crop*, 2003, 23(5): 276-278.
- [35] 周中凯, 张岩, 陈晓姗, 等. 5 种小麦淀粉的结构与性质的研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2013, 4: 23-26.
ZHOU Z K, ZHANG Y, CHEN X S, et al. Study on structure and properties of five kinds of wheat starch[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2013, 4: 23-26.
- [36] 张海艳. 糯玉米籽粒色素积累规律与营养特性的关系[J]. *华北农学报*, 2015, 30(4): 101-104.
ZHANG H Y. Regularity of pigment accumulation and the and nutritional character in correlation between pigment[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(4): 101-104.
- [37] ATWIJUKIRE E, HAWUMBA J F, NUWAMANYA

- E. Starch quality traits of improved provitamin A cassava (*Manihot esculenta* Crantz) [J]. *Heliyon*, 2019, 5(2): e01215.
- [38] 田志喜. 淀粉合成对稻米蒸煮品质影响的研究[D]. 北京: 中国科学院遗传与发育生物学研究所, 2007.
- TIAN Z X. Study on the effect of starch synthesis on cooking quality of rice[D]. Beijing: Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [39] WANG H H, HUANG Y C, WU Y R. Carotenoids modulate kernel texture in maize by influencing amyloplast envelope integrity[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5346.
- [40] SEO M, PEETERS A J, KOIWAI H. The Arabidopsis aldehyde oxidase 3 (AAO3) gene product catalyzes the final step in abscisic acid biosynthesis in leaves[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, 97(23): 12908–12913.
- [41] ENZELL C R. Biodegradation of carotenoids an important route to aroma compounds[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1985, 57(5): 693–700.
- [42] TAKEMURA M, MAOKA T, MISAWA N. Biosynthetic routes of hydroxylated carotenoids (xanthophylls) in *Marchantia polymorpha*, and production of novel and rare xanthophylls through pathway engineering in *Escherichia coli* [J]. *Planta*, 2015, 241(3): 699–710.
- [43] BOUVIER F, ISNER J C, CAMARA B. Oxidative tailoring of carotenoids: A prospect towards novel functions in plants [J]. *Trends in Plant Science*, 2005, 10(4): 187–194.
- [44] AULDRIDGE M E, MCCARTY D R, KLEE H J. Plant carotenoid cleavage oxygenases and their apocarotenoid products[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2006, 9(3): 315–321.
- [45] BAI L, KIM E H, DELLAPENNA D, et al. Novel lycopene epsilon cyclase activities in maize revealed through perturbation of carotenoid biosynthesis [J]. *The Plant Journal*, 2009, 59(4): 588–599.
- [46] 翟胜男, 郭军, 刘成, 等. 小麦类胡萝卜素合成途径关键基因 *Lcy* 功能分析[J]. *作物学报*, 2020, 46(10): 1485–1495.
- ZHAI S N, GUO J, LIU C, et al. Functional analysis of *Lcy* gene involved in the carotenoid synthesis in common wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(10): 1485–1495.
- [47] 冯发强, 王国华, 王青峰, 等. 甜玉米类胡萝卜素合成关键基因 *PSY1*、*LCYE* 和 *CrtRB1* 的功能分析[J]. *华南农业大学学报*, 2015, 36(5): 36–42.
- FENG F Q, WANG G H, WANG Q F, et al. Functional analysis of the key carotenoid biosynthetic genes *PSY1*, *LCYE* and *CrtRB1* in sweet corn [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2015, 36(5): 36–42.
- [48] 惠伯棣, 张凌霄, 张艳. 叶黄素酯在体内的相对生物利用度评价[J]. *食品科学*, 2009, 30(3): 253–256.
- HUI B D, ZHANG L X, ZHANG Y. Relative bioavailability assessment of lutein esters *in vivo* [J]. *Food Science*, 2009, 30(3): 253–256.
- [49] FERRUZZI M G, KRUGER J, TAYLOR J R N. Insights from *in vitro* exploration of factors influencing iron, zinc and provitamin A carotenoid bioaccessibility and intestinal absorption from cereals [J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 96(2): 103126.
- [50] CHA K H, LEE J Y, SONG D G, et al. Effect of microfluidization on *in vitro* micellization and intestinal cell uptake of lutein from *Chlorella vulgaris* [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(16): 8670–8674.
- [51] O'SULLIVAN L, RYAN L, AHERNE S A, et al. Cellular transport of lutein is greater from uncooked rather than cooked spinach irrespective of whether it is fresh, frozen, or canned [J]. *Nutrition Research*, 2008, 28(8): 532–538.
- [52] GHUNG H Y, RASMUSSEN H M, JOHNSON E J. Lutein bioavailability is higher from lutein-enriched eggs than from supplements and spinach in men [J]. *Journal of Nutrition*, 2004, 134(8): 1887–1893.
- [53] KEAN E G, HAMAKER B R, FERRUZZI M G. Carotenoid bioaccessibility from whole grain and degermed maize meal products [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2008, 56(21): 9918.
- [54] KEAN E G, BORDENAVE N, FERRUZZI M G. Carotenoid bioaccessibility from whole grain and decorticated yellow endosperm sorghum porridge [J]. *Journal of Cereal Science*, 2011, 54(3): 450–459.
- [55] NDIAYE C, MARTINE M M, HAMAKER B R, et al. Effect of edible plant materials on provitamin A stability and bioaccessibility from extruded whole pearl millet (*P. typhoides*) composite blends [J].

- LWT—Food Science and Technology, 2020, 123: 109109.
- [56] READ A, WRIGHT A, ABDEL-AAL E S M. In vitro bioaccessibility and monolayer uptake of lutein from wholegrain baked foods [J]. Food Chemistry, 2015, 174: 263–269.
- [57] KEAN E G, HAMAKER B R, FERRUZZI M G. Carotenoid bioaccessibility from whole grain and degermed maize meal products[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56 (21): 9918–9926.
- [58] CLEVIDENCE B, PAETAU I, SMITH J C. Bioavailability of carotenoids from vegetables [J]. Hortscience A Publication of the American Society for Horticultural Science, 2000, 35(4): 585–588.

Effects of Carotenoid Content on Cooking Quality of Grain

Zhao Xin, Liang Kehong*, Zhu Hong, Wang Jing

(*Institute of Food and Nutrition Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081*)

Abstract Carotenoids are the most important nutrients in cereals and play an important role in human health. In this paper, the content of carotenoids in millet and cooking indexes were determined. The correlation between carotenoids content and cooking quality was found and summarized. In addition, the synthesis and distribution of carotenoids in grains, the absorption and utilization of carotenoids and their health effects were introduced. The problems in the research of carotenoids in grains were put forward, In order to provide reference for the efficient utilization of carotenoids in cereals.

Keywords cereals; carotenoids; cooking quality; synthetic decomposition; absorption and utilization