

玉米品质的形成及其调控

韦小了^{1*}, 何腾兵^{1,2#}

¹贵州大学农学院, 贵州 贵阳

²贵州大学新农村发展研究院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年6月28日; 录用日期: 2022年7月22日; 发布日期: 2022年7月29日

摘要

随着人们生活水平的提高和膳食结构的改变, 玉米的用途发生了重大变化。人们对玉米的认识更加深入, 即由产量型向质量型转变, 玉米品质变得越来越重要, 玉米籽粒营养品质主要包括淀粉、蛋白、赖氨酸及粗油脂四大指标, 玉米品质受基因型和环境的共同作用, 而栽培手段措施具有一定的调控作用。本文通过阐述玉米籽粒品质的形成以及形成过程的调控措施, 总结出了几种调控玉米品质形成的措施并对玉米品质研究中需要研究的问题进行展望。

关键词

玉米, 品质形成, 淀粉, 蛋白质, 调控

The Formation and Regulation of Maize Quality

Xiaoliao Wei^{1*}, Tengbing He^{1,2#}

¹College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Institute of New Rural Development, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Jun. 28th, 2022; accepted: Jul. 22nd, 2022; published: Jul. 29th, 2022

Abstract

With the improvement of people's living standard and the change of dietary structure, the use of corn has changed significantly. With the deepening of people's understanding of corn, people have shifted from focusing on corn yield to focusing on corn quality, corn quality becomes more and

*第一作者。

#通讯作者。

more important, corn grain nutritional quality mainly includes starch, protein, lysine and crude oil four indicators, corn quality influenced by genotype and environment combination, and means of cultivation measures has certain regulation effect. In this paper, by describing the formation of maize grain quality and the control measures of the formation process, several measures to control the formation of maize quality are summarized, and the problems that need to be studied in the research of maize quality are prospected.

Keywords

Maize, Quality Formation, Starch, Protein, Regulate and Control

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 玉米对人类的重要性

玉米作为粮食、经济和饲料作物, 是世界最主要的谷类作物之一[1]。2001 年以来, 玉米已成为世界上产量最高的作物, 总产超过水稻和小麦, 在保障世界粮食安全上占据首要位置[2] [3] [4]。我国的玉米播种面积及总产量仅次于美国, 居世界第二位。玉米是我国主要的粮食作物, 目前是仅次于水稻的第二大粮食作物[5]。研究者常把人均占有玉米的数量视为衡量一个国家或地区畜牧业发展和人民生活水平的重要标志之一[6] [7]。目前我国人均占有玉米数量仅为 100 kg 左右, 远低于一些畜牧业发达国家人均占有 400 kg 的水平。预计到 2020 年, 我国对玉米籽粒的需求量将达到 2.2 亿吨, 而我国耕地面积正以 $2.67 \times 10^5 \text{ hm}^2/\text{年}$ 的速度减少[8], 玉米种植面积不可能有较大幅度增加, 因此提高玉米单产水平是确保我国粮食安全的必然选择[5]。然而近年来, 随着人们生活水平的提高和膳食结构的改变, 玉米的用途发生了重大变化。人们对玉米的认识更加深入, 即由产量型向质量型转变, 玉米品质变得越来越重要[9]。有研究表明甜玉米粒中的糖含量决定了甜玉米的质量[10], 品种、气候和收获时间等对谷粒的含糖量有着显著影响, 同时玉米食用质量与糖分较高、淀粉含量较低且香气增加的甜玉米基因型的嫩度直接相关[11], 目前很少有文献针对玉米品质的形成及其调控手段进行深入的研究, 本文从玉米的形成到品质的调控进行全面的论述并对其进行展望, 为玉米品质的研究提供一定的理论基础。

2. 玉米品质的形成

2.1. 玉米籽粒的发育及组成

玉米籽粒发育的一般规律: 受精卵的形成—受精卵发育成胚—胚珠发育成种子—子房壁发育成果皮—子房发育成果实。玉米籽粒是产量和品质的重要载体, 同时也是植物生长和繁殖所必需的贮藏器官。成熟的玉米籽粒主要由胚乳、胚和果皮(种皮)构成, 它们分别约占整个种子的 83%、11%和 6% [12]。成熟的玉米籽粒包括三个部分: 胚、胚乳和果皮, 它们分别从受精卵、受精极核和母体珠被发育而成[13]。胚乳提供胚胎发生和幼苗发芽所必需的营养和信号, 占成熟时籽粒质量的 85%, 具有重要的农学重要性。成熟的玉米胚乳主要是 70%~75%的淀粉, 8%~10%的蛋白质, 其中约 70%被归类为贮藏蛋白[14]。玉米胚乳由四种不同的细胞类型组成: 糊粉层(AL)、中央淀粉胚乳(CSE)、胚胎周围区域(ESR)和基底胚乳转移层(BETL) [15]。BETL 位于胚乳的基部, 与母体的花梗组织直接接触, 它包含两到三层细胞, 主要功能是将营养从母体组织输送到胚乳和胚胎中[16]淀粉作为玉米籽粒的主要贮藏物质, 约占籽粒干重的

75%。玉米的营养品质中, 蛋白质和各种氨基酸、脂肪、淀粉等物质是人类营养和维持生命活动不可缺少的物质。玉米产量形成过程也是品质形成过程, 玉米营养品质主要是指淀粉含量、蛋白质含量(包括组分和赖氨酸)和油分含量等[17], 因此, 评价玉米籽粒的营养品质, 应主要考虑籽粒中蛋白质、脂肪、淀粉、赖氨酸等营养成分的含量和质量[18]。

2.2. 淀粉

淀粉积累决定了谷物产量, 其淀粉结构决定了籽粒品质[19], 淀粉占籽粒重量的 70%左右, 占胚乳重量的 90%左右, 是玉米的主要组成部分, 对籽粒重量和品质起决定作用[20] [21]。在玉米籽粒发育过程中, 叶片通过碳水化合物(主要以蔗糖形式, 来源有两种: 光合产物和淀粉分解产物)经韧皮部长距离运输至籽粒, 在穗柄处先转化为单糖(果糖和葡萄糖), 由单糖转化为籽粒储存的淀粉、蛋白质和油脂, 其中蔗糖作为光合的主要产物, 承担对碳氮的运输作用[22]。

2.3. 蛋白质

蛋白含量在玉米籽粒中占比 10%左右[23], 是玉米籽粒中含量第二高的成分, 与籽粒淀粉形成相似, 籽粒蛋白形成也是由光合产物经分解成单糖进行再合成蛋白贮存于籽粒中。

2.4. 赖氨酸

赖氨酸是人体不能合成的一种必需氨基酸, 在谷物食品中含量非常低, 在玉米中占比 0.4%左右[24], 在加工过程表现出不稳定性, 极易被破坏, 在以谷物为主食的人群中极易发生赖氨酸缺乏症状, 影响对食物中蛋白的吸收利用, 影响神经系统, 降低免疫力, 影响生长发育, 因此被称为第一限制氨基酸[25]。玉米作为中国人谷物食物, 在玉米产量日益提升的现今, 赖氨酸含量越来越受到人们的重视, 密度、施氮量作为提高产量的栽培措施, 对赖氨酸含量的影响也备受关注。

2.5. 油脂

玉米籽粒粗油脂在籽粒中占比在 4%左右, 部分高油品种可达 6%或者更高[26], 与籽粒淀粉合成方式相似, 籽粒油脂形成也是由光合产物经分解成单糖进行再合成并贮存于籽粒中[27]。油脂在未来育种研究中将成为除蛋白质和赖氨酸以外又一个重要的品质, 类似于赖氨酸, 玉米油脂中所含的维生素 F 能够增强肌肉, 加强心血管活动[28]。

2.6. 玉米品质的形成

玉米产量形成过程也是品质形成过程, 玉米营养品质主要是指淀粉含量、蛋白质含量(包括组分和赖氨酸)和油分含量等。张智猛等对[29]氮水互作对玉米产量和淀粉, 蛋白质, 脂肪等品质的影响。王艳芳对玉米发育期间蔗糖、游离氨基酸、可溶性蛋白等进行研究[30], 高荣岐等[31]报道了高产夏玉米籽粒可溶性糖、淀粉和蛋白质以及 18 种氨基酸的积累过程。王忠孝等[32]对不同类型玉米的品质形成进行了报道。不同密度下, 蛋白质积累用直线或 Logistic 曲线描述, 脂肪 Logistic, 淀粉用高次曲线或 Logistic 曲线[33]。马富裕等在新疆对玉米掖单 X12 号的研究表明, 适当推迟收获期可以改善玉米的品质。刘开昌等[34]对高油高花粉玉米品质形成和几种酶活力的关系进行研究。高炳德[35]认为, 籽粒粗蛋白质、粗脂肪、淀粉含量与授粉后天数之间的关系用倒数方程 $Y = (A + Bt)/t$ 拟合效果很好。成熟时, 吨粮田籽粒粗脂肪、粗蛋白质、还原糖、水溶性糖含量比一般高产(7.6~12.4 T/hm)高。Doehlert 和 Lambert [36]指出, 多数基因型的胚乳干重在 1 ODPP 到 40DPP 几乎是直线增加。玉米醇溶蛋白含量约占总蛋白的 5%。胚乳干重与籽粒总干重显著相关。胚淀粉含量与胚乳淀粉含量相关。成熟籽粒的淀粉与蔗糖含量及未成熟籽

粒的腺昔二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(ADPG)活性有关, 而 ADPG 活性与蔗糖含量有关。当淀粉及酶活性都以基础籽粒表示时, 未成熟籽粒中 ADPG, 蔗糖合成酶(SS), 山梨糖醇脱氢酶(SDH), 尿苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(UDPG)及磷酸葡萄糖酸变位酶(PGM)活性都与成熟籽粒淀粉含量有关。未成熟籽粒中的氨基酸含量及转化酶(INVER) PGM, 磷酸葡萄糖酸异构酶(PGI), 焦磷酸 1,6-二磷酸果糖转移酶(PFP)及醛缩 ALDO 活性与成熟籽粒中蛋白质水平的关系最紧密, 而这些酶活性与氨基酸含量有关。与脂肪含量有关的主要因素是胚干重, 离体胚中的苹果酸脱氢酶(MDH)活性与胚脂肪有关。成熟胚乳干重和胚乳脂肪含量之间呈显著负相关。Cecilia [37]指出, 影响玉米产量和品质的玉米性质是相互关联的。硬度与蛋白质、容重和籽粒密度显著相关($r > 0.6$)。油分与籽粒密度和淀粉含量相关($r > 0.5$), 而与容量和硬度相关程度较小($r > 0.4$)。根据蛋白质、油分和容量来预测不易测定的因素:硬度和籽粒密度($R^2 = 0.8, 0.7$)。

综上所述, 淀粉、蛋白质、赖氨酸、油脂等的含量和比例会影响玉米的品质。

3. 玉米品质调控

玉米产量与品质的形成受遗传因素、环境条件(气候、土壤等)和栽培措施等的共同影响。在玉米增产因素中, 以肥料、种植密度和水分调控为主的栽培管理措施的贡献份额约为 40%, 品种遗传改良占 60% [38]。李建奇等通过对不同类型玉米品种间籽粒品质, 产量差异的研究, 表明品种的遗传特性是造成不同类型玉米品种间品质差异的主要原因, 不同类型玉米品种的粗蛋白, 粗脂肪, 粗淀粉, 赖氨酸含量, 籽粒容重及其产量差异达显著水平[39]。此外, 唐亚娥等结合地域特点, 对铜川市近 5 年来的玉米进行了调查与分析, 结果表明不同品种玉米及其不同的种植地域对其主要品质有较大影响[40]。

3.1. 环境条件调控

国内外大量研究结果表明, 气候、土壤因素是影响作物籽粒品质和产量的重要因素, 矿质营养对作物籽粒产量、品质变化有显著作用[41], 气候因素在玉米田间种植过程、生长条件和籽粒发育中起着重要作用, 进而影响最终籽粒产量和品质[42]。

3.1.1. 水分条件与玉米品质

环境对玉米生长的影响和对土壤污染的响应主要体现在玉米的数量变化上[43]。气候因子和基因型在玉米田间种植过程、生长条件和籽粒发育中起着重要作用, 进而影响籽粒产量和品质。水分条件不仅与玉米产量密切相关, 而且在某种程度上影响了玉米品质。到目前为止, 多数研究认为干旱条件下玉米蛋白质含量较高, 潮湿的条件下玉米子粒蛋白质含量较低[33]。环境条件, 尤其是温度、光周期、日照时数、太阳辐射和降水等气候因子对玉米生长和物候响应有显著影响[44]。H. J. Harder 等[45]认为, 灌浆期水分胁迫抑制了穗子粒发育, 使子粒体积变小, 使玉米外观品质下降。水分胁迫虽使子粒中的 N 含量从 1.7% (CK)提高到 1.8%~1.9%, 但使单位面积 N 的总产量降低。

3.1.2. 环境条件调控

地理条件是土壤、气候条件的综合指标。根据作物的适宜分布原理[46], 不同地理条件下不同品种玉米产量和品质的差异, 实际上是玉米的适应性差异。因此, 地理条件对玉米产量和品质的研究为玉米高产优质的分区种植提供了科学依据。从玉米高产优质高效生产的观点出发, 玉米的分区种植和品种的适宜性种植区划可能是玉米高产再高产, 优质高效的重要途径之一。土壤类型差异是决定栽培在不同地区的玉米具有化学成分差异的原因之一。不同土壤类型对玉米干物质积累变化及分布影响较大[47], 不同土壤类型对玉米干物质积累变化及分布影响较大: 1) 砂姜黑土玉米干物质积累较多, 且向雌穗, 子粒中转运效率也高。2) 砂姜黑土玉米整个根系在土壤中分布较均, 下扎较深, 深层根量较多; 而潮土玉米整个

根系主要集中分布于 0~20 cm 土层, 下扎较浅, 深层根量较少。3) 砂姜黑土玉米单产较高, 较潮土玉米增产 23.55%。黄勇等人采用池栽的方式研究了粘土, 壤土, 沙土 3 种质地土壤对高油玉米产量和品质的影响, 结果表明: 3 种质地土壤高油玉米子粒干物质积累动态在灌浆过程中基本相似, 而在吐丝 35 d 后差异明显。壤土质地的玉米子粒油分和蛋白质含量较粘土和沙土分别提高 8.92% 和 10.23%, 而粘土上玉米子粒产量最高, 达 176.5 g/穗, 较壤土和沙土分别提高 16.77% 和 52.63%: 油分, 蛋白质, 淀粉与子粒产量表现趋势相同, 表现为粘土壤土沙土, 高油玉米适宜在粘土上种植[48]。

3.1.3. 地理纬度调控

地理纬度是生态环境条件的一个综合指标, 它同样影响着玉米的产量和品质。傅绍清[49]用甲酯化—气相色谱法测定中国 20 个省(区)的 608 份玉米品种子粒的脂肪酸含量。统计结果表明, 6 种主要脂肪酸含量平均亚油酸为 46.67, 油酸为 34.1800, 棕榈酸为 15.0200, 硬脂酸为 2.2500, 亚麻酸为 1.31, 花生酸为 0.3300, 不饱和脂肪酸之和为 82.1600。用聚类分析方法对脂肪酸做分区统计后指出, 我国玉米亚油酸和不饱和脂肪酸含量北方高于南方, 油酸、饱和脂肪酸含量北方低于南方[33]。

3.2. 栽培管理措施

3.2.1. 播种时间与品质

在其它条件相同前提下, 播种时间影响玉米品质。陈爱等研究表明[50]镇麦 168 的穗数随播期的推迟而下降, 推迟播期可显著提高镇麦 168 籽粒蛋白质和湿面筋含量以及改善面团流变学特性。而张林等研究[51]则表明随播期的不断推迟, 过渡性物质积累丰度(可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量)呈下降趋势, 贮藏性物质(粗蛋白质和粗脂肪)含量呈“S”型上升趋势, 说明适时早播有利于子粒早期的品质形成; 而晚播会造成子粒品质下降。[52]播种期没有明显改变糯玉米灌浆期间籽粒中主要品质成分的变化趋势, 但对主要品质成分的含量影响很大。早播糯玉米灌浆期籽粒中可溶性蛋白、粗蛋白、脂肪、淀粉的平均含量分别比晚播的高 0.87 mg/g 和 2.68、1.0、4.96 个百分点。

3.2.2. 施肥与玉米品质

施肥是现代农业高产优质的保证。氮、磷、钾作为植物营养三要素, 需要量较大, 土壤自身肥力状况常常不能满足植物正常生长发育的需要, 必须通过施用肥料予以补充。玉米的合理施肥不仅能提高产量和经济效益, 并且能改良玉米的粒品质, 提高其营养价值。Welth [53]认为, 施用适量营养元素可以提高了粒品质。张石宝等[54]研究认为, 随着施氮量的提高, 叶面积指数增大, 叶片衰老延缓, 花后保持有更大的叶面积持续期和光合势, 有利于干物质的生产。磷肥能明显改善玉米了粒的品质[55]。促进了粒蛋白质积累及增加了粒蛋白质含量。增施磷肥对蛋白质的合成有一定的促进作用, 且随着施磷量的增大, 粒中蛋白质含量明显提高, 尤其是赖氨酸和色氨酸的含量明显提高。不同培肥措施对耕层土壤均有一定的培肥作用, 无论是有机质含量, 还是速效养分含量都有所提高。刘恩科等[56]报道, 长期不同施肥制度对土壤养分影响大小次序为速效磷 > 全磷 > 全氮 > 碱解氮 > 速效钾 > 有机质, NPKM 处理的土壤养分增加量大于其它处理: 各处理对玉米产量的影响为: NPKM > NPK > NP > PK > NK > N > CK; 长期施 NPKM 和 NPK 肥提高了玉米籽粒中蛋白质、氨基酸总量和必需氨基酸的含量, 同时还提高了籽粒中的粗脂肪和粗灰分含量; 长期施 N, NK 肥, 籽粒中淀粉和粗脂肪的含量降低, 虽然提高了蛋白质含量, 但因产量低, 其单位面积蛋白质产量也较低; 长期施 PK 肥, 降低了籽粒中蛋白质、氨基酸、淀粉和可溶性糖的含量, 同时降低了籽粒醇溶蛋白、谷蛋白和赖氨酸的含量。

3.2.3. 种植密度与玉米品质

种植密度对玉米籽粒营养成分含量的影响较为复杂, 目前研究较少。王晓梅等研究表明种植密度与

玉米淀粉含量呈正相关, 但与粗蛋白和粗脂肪含量呈负相关[57]。NurEldein [58]研究结果表明在 45,000~75,000 株/hm² 范围内, 玉米籽粒粗淀粉和粗蛋白随着种植密度的增加表现为先升高后降低的趋势, 而粗脂肪含量先降低后升高。李洪等人研究表明在一定种植密度范围内, 高油玉米籽粒粗脂肪随密度增加而增加, 但超过这一密度时, 籽粒粗脂肪开始降低[59]。王鹏文等研究发现在种植密度为 50,000~80,000 株/hm² 的范围内, 玉米籽粒粗蛋白质、粗脂肪和淀粉含量均与种植密度呈负相关, 超出这一范围, 粗蛋白、粗脂肪和淀粉与种植密度呈正相关[60]。有研究表明, 玉米品种郑单 18 的籽粒粗蛋白和粗脂肪含量随着种植密度的增加逐渐减少, 而淀粉含量增加, 哲单 14 的籽粒粗蛋白含量增加, 淀粉含量减少; 中单 9409 的籽粒粗脂肪含量减少, 粗蛋白和淀粉含量呈不规律变化[61]。随着种植密度的增加, 玉米籽粒粗蛋白、粗脂肪和淀粉含量表现为先降低后略有升高[62]。张新等人研究表明郑单 21 号籽粒蛋白质含量随着种植密度的增加逐渐降低, 粗脂肪含量表现为先升高后降低再升高的趋势, 淀粉含量表现为先升高后降低[63]。

3.2.4. 灌溉时间与玉米品质

灌溉对玉米品质的影响是通过与其它措施, 如施肥等相互作用而表现出来的。在灌溉条件下配合施肥, 可使玉米子粒蛋白质含量提高[64]。邵国庆研究不同灌水条件下, 控释尿素与常规尿素用量对玉米氮利用及产量和品质的影响, 同一氮水平下, 灌浆水提高了玉米地上部干物质量, 叶面积指数和籽粒产量, 降低了玉米地上部吸氮量, 花后籽粒吸氮量和花前转移氮量, 籽粒蛋白质含量和产量也显著降低[65]。S. Braunworth 等[66]评价不同水分供应对甜玉米产量和品质的影响, 他们指出, 充分灌溉可使甜玉米获得高的产量和好的商品品质。然而, K. R. Kniep 等[67]指出, 灌溉提高了子粒的破碎敏感性并提高了 O₂ 玉米的子粒密度。然而, K. R. Kniep 等[67]进一步研究后指出, 灌溉虽提高了普通玉米和 O₂ 玉米的产量, 但使它们的蛋白质含量降低, 赖氨酸在普通玉米蛋白质中的比例提高, 在 O₂ 玉米中赖氨酸在蛋白质中的比例降低。在灌溉对玉米化学成分影响研究上, 前苏联作物栽培研究所曾做过大量工作, 他们的共同结论是, 不同类型玉米在灌溉条件下均使子粒蛋白质含量下降, 但甜玉米例外。

3.2.5. 植物生长调节剂与玉米品质

① 油菜素内酯(Brassinosteroids, BR)是大约 40 年前从芸萘属植物花粉中分离得到的一类植物类固醇激素。早期研究表明, BR 调控多种植物的各种生理和发育过程, 如细胞伸长、叶片扩张、光形态发生、花发育、雄性不育、气孔发育和抗逆性等, 在发育过程中发挥关键作用[68]-[73]。王世明[74]研究发现, ABA 和 EBR 处理能提高葡萄果实还原糖含量, 加速葡萄成熟, 并提高葡萄果实及葡萄酒中醋类、醇类等香气物质的种类和含量。郑豪亮等[75]研究表明, 元宝枫叶面喷施激动素和 2,4-表油菜素内酯可以提高叶绿素含量, 增强光合作用, 促进光合产物的积累和翅果中蔗糖的分解转化, 有利于翅果的生长发育以及品质产量的提高。郭巨先等[76]研究发现, 喷施 EBR 能影响菜蓼生长和营养指标, 喷施低浓度(0.01~0.05 mg/L) EBR 可提高菜心的蔓长和蔓粗, 以及 Vc、叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白、全氮、全磷和全钾含量, 降低纤维素含量; 而喷施高浓度(0.14~0.17 mg/L) EBR 可增加菜蓼全氮、全磷和全钾的含量。外源喷施 BR 通过影响水稻籽粒淀粉后峰值豁度、崩解值、回复值等特性, 进而调控杂交水稻的籽粒品质[77]。

② 细胞分裂素(CTK)是从玉米或其他植物中分离或人工合成的植物激素。CTK 最明显的生理作用包括: 促进细胞分裂和调控其分化, 延缓蛋白质和叶绿素的降解, 延迟衰老。Ba110WetZ 等[78]发现, 外源喷施 CTK 可促进小麦籽粒发育, 提高耐热性, 缓解了高温胁迫对小麦产量和品质影响。杨航等[79]研究表明, 配施磷素与 6-BA 处理显著影响了青藏高原高寒草地野生老芒麦的生长特性, 提高了粗蛋白含量。Zheng 等[80]研究表明, 喷施含有茉莉酸甲酯(MeJA)、6-BA 和激动素的改良促花剂能有效地促进水

稻雄性不育系的开花和结实, 有助于减少杂交水稻育种相关的劳动力需求, 提高产量和效率。

③ 赤霉素 GA 是一类非常重要的植物激素, 参与许多植物生长发育的多个生物学过程。GA 最突出的作用是加速细胞的伸长, 对细胞的分裂也有促进作用。刘超等[81]研究表明, 外源 GA3 可以显著提高烤烟株高和节距和烟株的干物质量。外源 GA3 能够使烟草 GAI1 基因表达量明显下降, 提高钾氯比和糖碱比, 提高烟草品质。冀冰聪等[82]研究表明, 喷施 GA: 加速桑椹的成熟, 提高桑椹产量, 改善果实品质。董明辉等[83]研究则相反, 外源 GA 处理显著降低了水稻千粒重、整精米率、胶稠度、粗蛋白含量, 增加了籽粒至白度、直链淀粉含量。

3.2.6. 收获时间与玉米品质

玉米生长后期植株各器官继续发生着质和量的变化, 营养物质不断积累, 光合产物主要流向果实, 籽粒不断得到充实[84]。吕淑果[85]研究得出, 掖单 13 秸秆收获后青贮, 收获期在 9 月 20 日或适当提前; 中单 9409 最适收获期为 9 月 20 日; 科青 1 号、东陵白和科多 8 号适宜收获期为 9 月 20 日左右或适当提前。玉米用作饲料随着籽粒含量及秸秆的组成的变化而变化, 籽粒的可消化性高达整个干物质的 50% 左右, 所以玉米饲料的营养价值、蛋白质的利用、消化率和潜在的采食量对收获期的影响非常大[86]。于明礼[87]认为单位面积上玉米籽实和秸秆粗蛋白的最大产量, 是确定了玉米最适宜收获时期的关键因素, 国内外一般认为青饲玉米的干物质含量在 25%~50% 较为合适, 玉米籽粒蜡熟期为最适收获期。玉米随成熟度的提高, 茎秆粗纤维含量和木质化程度都增加, 但对于整株玉米, 纤维素和木质素含量通常是下降的。收割期过早会影响到整株青贮的纤维含量。过高的中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维影响了总的可利用能, 降低饲料消化率, 但蛋白质和矿物元素比较丰富。美国 80 年代育成的多叶型玉米产量达 113,882 kg/hm², 收获时玉米秸秆保持绿色, 而其粗纤维含量低, 但粗蛋白、粗脂肪含量比较高, 因而有较大的饲用价值[88]。张永平[89]认为青贮玉米的最适收获期在乳熟期和蜡熟期之间, 此时秸秆含水量在 60%~70% 之间(即干物质含量在 30%~40% 之间), 此期秸秆和籽粒的营养质量高, 木质素含量低, 适口性好, 特别利于家畜的消化吸收。综上所述, 可通过筛选品种、改变环境因子及栽培措施等途径对玉米品质进行调控, 从而获得更优质的玉米。

综上所述, 同一品种的玉米可以通过改变环境条件、栽培管理措施等手段来提高玉米品质的形成。

4. 研究展望

目前, 关于玉米籽粒品质研究多集中于环境条件或栽培措施对品质性状的影响, 其中在氮磷钾肥的影响方面最多结果也多矛盾, 还有待进一步研究, 还缺乏环境因素的互作分析, 对籽粒形成过程中酶活性和基因表达等方面的研究较少。随着分子生物学的发展, 玉米基因组和蛋白质组的研究日益深入, 玉米籽粒的代谢组研究已经开始, 如 Harrigan 等[90]分析了田间灌水和干旱条件下玉米籽粒发育过程代谢物变化。今后有必要加强环境条件或栽培措施对相应酶活性、代谢物或基因表达的研究, 从分子水平阐述玉米品质形成与调控的机理, 特别是主要环境条件影响了哪些微效基因的表达进而涉及哪些代谢途径对玉米品质产生了影响, 为作物品质生理奠定基础, 同时揭示玉米品质形成的地域差异, 找出适合各地生产的玉米类型, 以指导玉米高产优质高效生产。

基金项目

贵州省畜禽污染控制与资源化利用技术工程实验室(黔发改高技术[2017]950 号)。

参考文献

- [1] Wetzstein, M. (2014) Dynamic and Stochastic Resource Economics: Essays on Biodiversity, Invasive Species, Joint

- Systems, and Regulation. *American Journal of Agricultural Economics*, **97**, 659-661. <https://doi.org/10.1093/ajae/aau100>
- [2] Troyer, A.F. (2006) Adaptedness and Heterosis in Corn and Mule Hybrids. *Crop Science*, **46**, 528-543. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0065>
- [3] Dai, D., Ma, Z. and Song, R. (2021) Maize Kernel Development. *Molecular Breeding*, **41**, Article No. 2. <https://doi.org/10.1007/s11032-020-01195-9>
- [4] Shiferaw, B., Prasanna, B.M., Hellin, J., *et al.* (2011) Crops That Feed the World 6. Past Successes and Future Challenges to the Role Played by Maize in Global Food Security. *Food Security*, **3**, 307-327. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0140-5>
- [5] 邵书静. 品种、氮肥和种植密度对玉米产量与品质的影响[D]: [博士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [6] 佟屏亚. 刍议中国发展玉米生产的科技导向[J]. 玉米科学, 2003(1): 94-97.
- [7] 薛吉全, 马国胜, 路海东. 重视饲用玉米发展促进农业结构调整[J]. 玉米科学, 2004(S2): 122-124.
- [8] 朱红波, 张安录. 中国耕地压力指数时空规律分析[J]. 资源科学, 2007(2): 104-108.
- [9] 田纪春, 张忠义. 高蛋白和低蛋白小麦品种的氮素吸收和运转分配差异的研究[J]. 作物学报, 1994, 20(1): 76-83.
- [10] Szymanek, M., Tana, W. and Kassar, F.H. (2015) Kernel Carbohydrates Concentration in Sugary-1, Sugary Enhanced and Shrunken Sweet Corn Kernels. *Agriculture & Agricultural Science Procedia*, **7**, 260-264. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.12.044>
- [11] Tas, T. and Mutlu, A. (2021) Morpho-Physiological Effects of Environmental Stress on Yield and Quality of Sweet Corn Varieties (*Zea mays* L.). *PeerJ*, **9**, e12613. <https://doi.org/10.7717/peerj.12613>
- [12] 魏一鸣. 玉米籽粒发育调控基因 ZmNPF7.9 和 ZmAPP1 的克隆与功能分析[D]: [博士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [13] Li, Q. and Wu, Y. (2020) The Encyclopedia of Maize Kernel Gene Expression. *Journal of Integrative Plant Biology*, **62**, 879-881. <https://doi.org/10.1111/jipb.12869>
- [14] Wu, Y. and Messing, J. (2014) Proteome Balancing of the Maize Seed for Higher Nutritional Value. *Frontiers in Plant Science*, **5**, Article No. 240. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00240>
- [15] Doll, N.M., Depege-Fargeix, N., Rogowsky, P.M., *et al.* (2017) Signaling in Early Maize Kernel Development. *Molecular Plant*, **10**, 375-388. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2017.01.008>
- [16] Offler, C.E. and Patrick, J.W. (2020) Transfer Cells: What Regulates the Development of Their Intricate Wall Labyrinths? *The New Phytologist*, **228**, 427-444. <https://doi.org/10.1111/nph.16707>
- [17] 李明. 寒地高产玉米产量及品质形成与调控规律研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2002.
- [18] 赵福成. 甜玉米籽粒品质的基因型差异及其对环境的响应[D]: [博士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [19] 陆大雷, 闫发宝, 陆卫平. 糯玉米灌浆结实期籽粒淀粉理化特性变化[J]. 中国农业科学, 2011, 44(23): 4793-800.
- [20] 王龙飞. 灌浆结实期干旱胁迫程度影响糯玉米产量和品质形成的生理机制[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [21] 张智猛, 戴良香, 胡昌浩, 等. 氮素对玉米淀粉累积及相关酶活性的影响[J]. 作物学报, 2005(7): 956-62.
- [22] 任晓东. 玉米蔗糖代谢关键基因灌浆期动态表达及其调控的初步研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2014.
- [23] 张晓林. 玉米籽粒主要性状的相关性研究及淀粉含量 QTL 精细定位[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- [24] 黄元新, 鲁力. 赖氨酸对机体健康促进作用的研究进展[J]. 广西医学, 2008(7): 1031-3.
- [25] 孙海燕, 茹振钢, 杨靖, 等. 小麦抗赖氨酸+苏氨酸胁迫的基因型筛选与评价[C]//中国作物学会 50 周年庆祝会暨 2011 年学术年会. 2011: 32.
- [26] 宋秀芳. 玉米籽粒油分 QTL 定位及相关性状的分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [27] 马雪情. 牡丹油脂品质形成机理的研究[D]: [硕士学位论文]. 洛阳: 河南科技大学, 2015.
- [28] 王鹤滨. 饱和脂肪酸——维生素 F[J]. 科学养生, 2011(2): 24.
- [29] 张智猛. 氮水互作对不同玉米产量品质形成生理特性的影响[D]: [博士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2002.
- [30] 王艳芳, 崔震海, 张立军, 等. 玉米籽粒灌浆期可溶性糖含量变化与可溶性蛋白积累关系的研究[J]. 辽宁化工,

- 2006, 35(1): 9-10, 12.
- [31] 高荣岐. 长豇豆胚和胚乳的发育及营养物质积累[J]. 植物学报: 英文版, 1992, 34(4): 271-277, 327-329.
- [32] 王忠孝, 杜成贵. 不同类型玉米籽粒灌浆过程中主要品质成分的变化规律(简报) [J]. 植物生理学报, 1990(1): 30-33.
- [33] 王鹏文. 栽培措施和生态环境条件对玉米产量和品质的影响研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 1996.
- [34] 刘开昌, 胡昌浩, 董树亭, 等. 高油玉米需磷特性及磷素对籽粒营养品质的影响[J]. 作物学报, 2001, 27(2): 267-272.
- [35] 高炳德, 李江遐, 周燕辉, 等. 内蒙古平原灌区公顷产量 13.7t-15.9t 不同品种春玉米氮、磷、钾吸收规律研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2000(S1): 62-71.
- [36] Dorsey-Redding, C., Hurburgh, C.R., Johnson, L.A., *et al.* (1991) Relationships among Maize Quality Factors. *Cereal Chemistry*, **68**, 602-605.
- [37] Alexander, K.P., Peterson, E.D., Facc, C.B.G., *et al.* (1998) Potential Impact of Evidence-Based Medicine in Acute Coronary Syndromes: Insights from GUSTO-IIb. *Journal of the American College of Cardiology*, **32**, 2023-2030. [https://doi.org/10.1016/S0735-1097\(98\)00466-5](https://doi.org/10.1016/S0735-1097(98)00466-5)
- [38] 吴永常, 马忠玉. 我国玉米品种改良在增产中的贡献分析[J]. 作物学报, 1998, 24(5): 595.
- [39] 李建奇. 不同类型品种对春玉米产量、品质的影响[J]. 种子, 2006, 25(12): 58-60.
- [40] 唐亚娥. 地域及品种对玉米品质的影响[J]. 粮食加工, 2018, 43(1): 61-64.
- [41] 李金洪, 李伯航. 矿质营养对玉米籽粒营养品质的影响[J]. 玉米科学, 1995(3): 54-58.
- [42] Baloch, N. 我国主产区玉米籽粒产量与主要品质性状的空间分布特征及影响因素[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [43] Chapman, S.C., Edmeades, *et al.* (1999) Selection Improves Drought Tolerance in Tropical Maize Populations: II. Direct and Correlated. *Crop Science*, **39**, 1315. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3951315x>
- [44] Yang, H.S., Dobermann, A., Lindquist, J.L., *et al.* (2004) Hybrid-Maize—A Maize Simulation Model That Combines Two Crop Modeling Approaches. *Field Crops Research*, **87**, 131-154. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.10.003>
- [45] Harder, H.J., Carlson, R.E. and Shaw, R.H. (1982) Yield, Yield Components, and Nutrient Content of Corn Grain as Influenced by Post-Silking Moisture Stress. *Agronomy Journal*, **74**, 275-278. <https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400020005x>
- [46] 韩湘玲, 刘巽浩, 高亮之, 等. 中国农作物种植制度气候区划[J]. 耕作与栽培, 1986(Z1).
- [47] 杨青华, 高尔明, 马新明, 等. 不同土壤类型对玉米干物质积累动态及其分布的影响[J]. 玉米科学, 2000, 8(1): 3.
- [48] 黄勇, 杨青华, 李渤海, 等. 不同质地土壤对高油玉米产量和品质的影响[J]. 玉米科学, 2006, 14(2): 127-129.
- [49] 傅绍清, 胡述楫, 胡人卫, 等. 我国玉米籽粒脂肪酸含量研究[J]. 作物学报, 1992, 18(3): 222.
- [50] 陈爱大, 蔡金华, 温明星, 等. 播期和种植密度对镇麦 168 籽粒产量与品质的调控效应[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(1): 9-13.
- [51] 张林, 杨洋, 罗友明, 等. 播期对春大豆种子品质形成及产量的影响[J]. 作物杂志, 2015, (2): 118-123.
- [52] 冯颖竹, 陈惠阳, 余士元, 等. 播种期对南方秋播糯玉米主要品质成分的影响[J]. 中国农业气象, 2006, 27(2): 142-146.
- [53] Welch, L.F. (1969) Effect of N, P, and K on the Percent and Yield of Oil in Corn1. *Agronomy Journal*, **61**, 890-891. <https://doi.org/10.2134/agronj1969.00021962006100060017x>
- [54] 张石宝, 李树云, 胡虹, 等. 氮对冬玉米干物质生产及生理特性的影响[J]. 广西植物, 2002, 22(6): 543-546, 552.
- [55] 王德权, 马忠明, 杨蕊菊, 等. 水肥耦合条件下间作小麦光合特性的响应[J]. 中国农学通报, 2009, 25(15): 215-218.
- [56] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期不同施肥制度对玉米产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(5): 711-716.
- [57] 王晓梅, 崔坤, 宋利润. 不同密度与玉米生长发育及品质相关性的研究[J]. 吉林农业科学, 2006, 31(3): 3-6.
- [58] Nur Eldein, A.A. (2006) Effects of Cultivar, Plant Population and Nitrogen on Growth and Grain Yield of Maize (*Zea mays* L.).
- [59] 李洪, 李育才. 种植密度与高油玉米子粒含油率的相关性研究[J]. 山西农业科学, 2008, 36(5): 33-34.

- [60] 王鹏文, 戴俊英, 等. 玉米种植密度对产量和品质的影响[J]. 玉米科学, 1996, 4(4): 43-46.
- [61] 马兴林, 关义新, 逢焕成, 等. 种植密度对 3 个玉米杂交种产量及品质的影响[J]. 玉米科学, 2005, 13(3): 84-86.
- [62] 刘霞李, 王庆成, 刘开昌. 种植密度对不同粒型玉米品种子粒灌浆进程、产量及品质的影响[J]. 玉米科学, 2007, 15(6): 75-78.
- [63] 张新, 王振华, 张前进, 等. 种植密度对郑单 21 玉米产量及品质的影响[J]. 玉米科学, 2007, 15(z1): 104-106.
- [64] Voznesenskaya, E.V., Franceschi, V.R., Pyankov, V.I., *et al.* (1999) Anatomy, Chloroplast Structure and Compartmentation of Enzymes Relative to Photosynthetic Mechanisms in Leaves and Cotyledons of Species in the Tribe Salsoleae (Chenopodiaceae). *Journal of Experimental Botany*, **50**, 1779-1795. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.341.1779>
- [65] 邵国庆, 李增嘉, 宁堂原, 等. 灌溉和尿素类型对玉米氮素利用及产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(11): 3672-3678.
- [66] 李会民, 等. 亏水灌溉对甜玉米产量及品质的影响[J]. 国外农学-杂粮作物, 1988(2).
- [67] Kniep, K.R. and Mason, S.C. (1989) Kernel Breakage and Density of Normal and Opaque-2 Maize Grain as Influenced by Irrigation and Nitrogen. *Crop Science*, **29**, 158-163. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900010035x>
- [68] Fahad, S., Bajwa, A.A., Nazir, U., *et al.* (2017) Crop Production under Drought and Heat Stress: Plant Responses and Management Options. *Frontiers in Plant Science*, **8**, Article No. 1147. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>
- [69] Zandalinas, S.I., Mittler, R., Balfagón, D., *et al.* (2018) Plant Adaptations to the Combination of Drought and High Temperatures. *Physiologia Plantarum*, **162**, 2-12. <https://doi.org/10.1111/ppl.12540>
- [70] Guerreiro, S.B., Dawson, R.J., Kilsby, C., *et al.* (2018) Future Heat-Waves, Droughts and Floods in 571 European Cities. *Environmental Research Letters*, **13**, Article ID: 034009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaad3>
- [71] Lecomte, D. (2013) U.S. Weather Highlights 2012: Heat, Drought, and Sandy. *Weatherwise*, **66**, 12-16, 8-9. <https://doi.org/10.1080/00431672.2013.781839>
- [72] Wang, L., Liao, S., Huang, S., *et al.* (2018) Increasing Concurrent Drought and Heat during the Summer Maize Season in Huang-Huai-Hai Plain, China. *International Journal of Climatology*, **38**, 3177-3190. <https://doi.org/10.1002/joc.5492>
- [73] Bitá, C.E. and Gerats, T. (2013) Plant Tolerance to High Temperature in a Changing Environment: Scientific Fundamentals and Production of Heat Stress-Tolerant Crops. *Frontiers in Plant Science*, **4**, Article No. 273. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00273>
- [74] NONE. 外源激素 ABA 和 EBR 处理有助于葡萄果实品质提升[J]. 中国果业信息, 2020, 37(2): 52-53.
- [75] 郑豪亮, 张晨晨, 张博勇, 等. 外源激动素与 2,4-表油菜素内酯对元宝枫叶片和翅果碳水化合物代谢的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(3): 100-105.
- [76] 温静涛. 表油菜素内酯对菜心硝酸盐积累及产量和品质的影响[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南农业大学, 2008.
- [77] 田晓雅. 油菜素甾醇(BRs)对杂交水稻籽粒充实过程及产量、品质的生理效应研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [78] Banowitz, G.M., Ammar, K. and Chen, D.D. (2010) Postanthesis Temperatures Influence Cytokinin Accumulation and Wheat Kernel Weight. *Plant Cell & Environment*, **22**, 309-316. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00411.x>
- [79] 杨航, 祁娟, 李玉英, 等. 外源激素与磷素配施对老芒麦生长特性及营养品质的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(4): 1015-1023.
- [80] Zheng, L., Zhang, S., Xue, F., *et al.* (2020) Improving the Efficiency of Hybrid Combination Preparation in Rice Breeding by a Modified Flowering Stimulant. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, **13**, 36-40. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201303.5632>
- [81] 刘超, 叶红朝, 武云杰, 等. 外源 GA3 和 IAA 对烤烟内源激素调控效应和常规化学成分的影响[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(8): 153-160.
- [82] 冀冰聪, 卢宝云, 焦文骁, 等. 影响桑椹成熟期及果实品质的因素分析[J]. 北方蚕业, 2018, 39(4): 19-26.
- [83] 董明辉, 刘晓斌, 陆春泉, 等. 外源 ABA 和 GA 对水稻不同粒位籽粒主要米质性状的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(5): 899-906.
- [84] 蔡晓妍, 章建新, 崔淑华, 等. 氮磷肥对复播青贮玉米产量和饲用营养品质的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2004, 27(2): 33-35.
- [85] 吕淑果. 玉米饲用栽培的物质生产特性及营养品质研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2003.
- [86] 陈有荃. 提高秸秆饲料营养价值的方法[J]. 畜牧市场, 2005(8): 91-93.
- [87] 于明礼. 收获期和氮肥运筹对不同类型饲用玉米产量及品质特性的影响[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大

- 学, 2009.
- [88] 张永平, 刘景辉, 焦立新, 等. 栽培措施对粮饲兼用型玉米粗蛋白积累的影响[J]. 西北农业学报, 2008, 17(2): 90-94, 100.
- [89] 张永平, 刘景辉, 焦立新, 等. 栽培措施对粮饲兼用型玉米粗纤维积累的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(2): 198-201.
- [90] Harrigan, G.G., *et al.* (2007) Metabolite Analyses of Grain from Maize Hybrids Grown in the United States under Drought and Watered Conditions during the 2002 Field Season. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, **55**, 6169-6176. <https://doi.org/10.1021/jf070493s>