玉米籽粒发芽过程中不同部位类胡萝卜素合成动态及抗氧化活性

包怡红[1]，罗浩[1]，何伟伟[2]，汪雨茜[1]，周芷亦[1]，李大婧[2]
（1.东北林业大学林学院，黑龙江哈尔滨 150040）
（2.江苏省农业科学院农产品加工研究所，江苏南京 210014）

摘要： 本研究以黄玉米种子为原料，研究其在发芽过程中种胚、胚芽和胚根中总类胡萝卜素、叶黄素和玉米黄质的合成动态以及抗氧化活性。结果表明：玉米籽粒的发芽率随着发芽时间的延长而增加，在 12~36 h 间是玉米籽粒的出芽时间。玉米籽粒发芽过程中种胚、胚根和胚芽的鲜重呈现上升趋势，且种胚鲜重>胚芽鲜重>胚根鲜重。随着发芽时间的增加，种胚和胚根的总类胡萝卜素积累量增加，而胚芽中的总类胡萝卜素积在 36~48 h 和 60~72 h 增加极为显著。种胚、胚根和胚芽中主要类胡萝卜素物质以叶黄素为主，胚芽的总类胡萝卜素含量明显高于胚根和种胚。玉米籽粒发芽 72 h 时总类胡萝卜素含量为发芽前的 6.19 倍。同时，胚芽和种胚中的抗氧化活性随着发芽时间的增加而升高，最高分别达到了 8.01 μmol TEAC/g 和 8.51 μmol TEAC/g，胚根则相反。故发芽可以显著提高玉米籽粒中不同部位的类胡萝卜素含量及胚芽的抗氧化活性。

关键词： 玉米籽粒；发芽；不同部位；类胡萝卜素
文章篇号： 1673-9078(2020)06-40-45 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.6.1099

The Synthesis Dynamics of Carotenoids and Antioxidant Activity in Different Parts of Maize Kernel during Germination

BAO Yi-hong[1], LUO Hao[1], HE Wei-wei[2], WANG Yu-xi[1], ZHOU Zhi-yi[1], LI Da-jing[2]
(1.College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)
(2.Institute of Agro-product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Yellow maize kernels were used as the raw materials in this study. The synthesis dynamics of total carotenoids, lutein and zeaxanthin as well as the antioxidant activity in embryos, germs and radicles were investigated during germination. The results showed that the germination rate of corn kernels increased with the germination time, and the germination time of corn kernels was between the 12th and 36th h. During germination, the fresh weight of embryo, radicle and germ showed an upward trend, following the decreasing order of the embryo, followed by embryo>germ>radicle. With the increase of germination time, the total carotenoids accumulated in the embryo and radicle increased, whilst the total carotenoid accumulation in the germ increased significantly at 36 th~48 th h and 60 th~72 th h. The main carotenoid in the embryo, radicle and germ was lutein, and the total carotenoid content in the germ was significantly higher than those in the radicle and embryo. The total carotenoid content of corn kernels after germination for 72 h was 6.19 times that before germination. At the same time, the antioxidant activity in germ and embryo increased with the germination time, with the highest reaching 8.01 μmol TEAC/g and 8.51 μmol TEAC/g, respectively. However, an opposite trend was for the radicle. Therefore, germination can significantly increase the carotenoid content in different parts of the maize kernels and the antioxidant activity of the germ.

Key words: maize kernels; germination; different parts; carotenoids

引文格式：

包怡红,罗浩,何伟伟,等.玉米籽粒发芽过程中不同部位类胡萝卜素合成动态及抗氧化活性[J].现代食品科技,2020,36(6):40-45

BAO Yi-hong, LUO Hao, HE Wei-wei, et al. The synthesis dynamics of carotenoids and antioxidant activity in different parts of maize kernel during germination [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(6): 40-45

收稿日期：2019-11-11

基金项目：国家自然科学基金面上项目（31771984）；国家自然科学基金青年科学基金项目（31901710）；江苏省自然科学基金资助项目（BK20180305）

作者简介：包怡红（1970-），女，博士，教授，研究方向：食品生物技术与功能食品

通讯作者：李大婧（1976-），女，博士，研究员，研究方向：果蔬加工与功能化利用

玉米(*Zea mays* L.)是我国重要的经济粮食作物，产量仅次于水稻和小麦。玉米所含营养全面，并具有一定的保健功能[1]。玉米常被加工成各种形式的产品食用，包括玉米饼和玉米粥等，而未加工的玉米主要用于动物营养[2]。玉米籽粒含有丰富的蛋白质、脂肪、维生素和类胡萝卜素。类胡萝卜素是玉米籽粒中重要的营养素和天然色素。它们可作为抗氧化剂，提高人体免疫力，维持人体的健康生命活动，减少人类和动物的癌症发生[2]。自然界中已鉴定出 600 多种类胡萝卜素，通常在黄玉米粒中的主要类胡萝卜素是叶黄素、玉米黄质、*β*-隐黄质和 *β*-胡萝卜素[3-5]。叶黄素是分布在水果和蔬菜中最广泛的类胡萝卜素之一，但是玉米黄质在大多数食物中含量较少，而玉米籽粒中含量较多[6]。此外，研究发现叶黄素和玉米黄质是人眼视网膜的主要黄斑色素，它们可以防止光诱导的视网膜损伤和年龄相关的黄斑变性[7]，但是人体不能自身合成叶黄素和玉米黄质。所以，大力开发玉米中的营养成分-叶黄素等类胡萝卜素，为玉米种植、色素生产等行业带来高额的产品附加值以及巨大的商机。

发芽是一种简单、廉价的加工技术手段，可以提高谷物的营养品质和生物活性化合物的含量[8]。这些生物活性化合物可以从头合成或在发芽期间转化[9]。在发芽期间，种子内源酶被激活，植物体内的一些化合物如蛋白质和碳水化合物被水解成小分子，同时合成某些新的化合物[10]。最近的研究表明，萌发过程可以在发芽的种子和芽中积累各种活性化合物，如维生素，*γ*-氨基丁酸和多酚[11]，还可以提高抗氧化物质和类胡萝卜素的水平[10]。同时，通过发芽处理，还可以降低制品粘稠度，改善制品复水性和冲调性，形成特殊的风味，明显地刺激食欲[12]。Helland[13]等人将发芽 2 d 的玉米粉应用到粥类食品的加工中，改善了制品的碳水化合物的组成，增加了糖类的含量，减小了制品的体积，大大的增加了食物能量密度。

目前对发芽玉米籽粒中活性成分变化主要集中在整体籽粒上，对发芽前后玉米籽粒不同部位类胡萝卜素含量变化少见报道。通过种子萌发开发富含类胡萝卜素的玉米籽粒的方法最近受到越来越多的关注[14]。因此，利用发芽玉米籽粒开发功能性食品是一种创新方法。本试验以苏玉 29 玉米籽粒为原料，对发芽后玉米种胚，胚芽和胚根中总类胡萝卜素，叶黄素及玉米黄质的动态含量及抗氧化活性进行研究，探究不同部位总类胡萝卜素、叶黄素及玉米黄质含量的变化趋势，为发芽后玉米籽粒不同部位的加工应用提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

黄玉米（苏玉 29），江苏省农业科学院试验田提供；叶黄素、玉米黄质和 *β*-胡萝卜素标准品购于美国 Sigma 公司；色谱级甲醇、甲基叔丁基醚(methyl tert-butylether，MTBE)，购于美国 Tedia 公司；2,2-偶氮二(2-甲基丙基咪)二盐酸盐（DPPH），购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司；分析纯正己烷、丙酮、甲苯、无水乙醇、无水硫酸钠、氢氧化钾等，购于国药集团化学试剂有限公司。

安捷伦 1200 高效液相色谱仪，美国安捷伦科技有限公司；BS224S 电子分析天平，北京赛多利斯科学仪器公司；FD-1A-50 型冷冻干燥机，北京博医康实验仪器有限公司；RE52CS 旋转蒸发器和 B-220、恒温水浴锅，上海亚荣生化仪器厂；SHZ-D（III）循环水式真空泵，上海东玺制冷仪器设备有限公司；D10 氮气吹扫仪，杭州奥盛仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 发芽实验设计

筛选除杂后，选择成熟饱满、大小均一的玉米籽粒。用 0.5%的次氯酸钠溶液消毒 15 min 后，用蒸馏水清洗数次至 pH 中性。将消毒后的玉米籽粒常温下用蒸馏水浸泡 24 h（每浸泡 7 h 断水 1 h，连续浸泡 3 次）。将浸泡后的玉米籽粒放入垫有双层滤纸的培养皿（*Φ*9 cm）中，每皿 25 g 左右，于 25 ℃恒温培养箱中黑暗发芽，每隔 5 h 喷洒一次蒸馏水，保持湿润。从 0 h 起每隔 12 h 取样一次，直至第 72 h（由于 72 h 后胚芽开始发育成秧苗，所以只取到 72 h），将胚乳、胚根和胚芽分类、洗净，测定其长度以及鲜重。同时将样品放入-80 ℃冰箱备用。

1.2.2 发芽率的测定

用游标卡尺测量芽长，并根据国际种子测试协会的下列公式测定发芽率。

$$发芽率/\%=\frac{正常发芽种子数量}{种子总数}\times 100\%$$

1.2.3 总类胡萝卜素测定

将样品冷冻干燥后研磨粉碎，过 60 目筛，制得干样品粉末。准确称取 1.0 g 干样品粉末于磨口锥形瓶中，加入 10 mL 正己烷-乙醇-丙酮-甲苯（10:6:7:7，*V/V*）混合萃取液，于暗处静置 4 h 后加入 1 mL 40%氢氧化钾-甲醇溶液，摇匀后置于暗处 25 ℃皂化 20 h。

将皂化液转入分液漏斗后加入 10 mL 正己烷，震荡摇匀后加入 12 mL 10%硫酸钠溶液，收集上层溶液。重复 2 次，混合上层溶液，旋转蒸发，加入 2 mL 正己烷溶解后氮气吹干，最后用 1 mL 色谱级甲醇溶解。将提取液用甲醇稀释一定倍数，在紫外-可见光分光光度计在 450 nm 处测定其吸光度，根据标准曲线计算总类胡萝卜素含量。标准曲线以β-胡萝卜素作为参考。

1.2.4 叶黄素和玉米黄质含量的测定

1.2.4.1 样品的制备

将 1.2.2 中的皂化液 6000 r/min 离心 10 min，取上清液于新的 50 mL 离心管中，加入 10 mL 正己烷，震荡摇匀，再加入 15 mL 10%硫酸钠溶液，充分摇匀后 6000 r/min 离心 10 min。收集上层溶液至试管中，氮气吹干，用 1 mL 色谱级甲醇复溶，经 0.22 μm 的有机滤膜过滤后转入棕色液相小瓶，待测定分析。

1.2.4.2 叶黄素和玉米黄质含量的测定

用高效液相色谱测定不同部位中叶黄素和玉米黄质的含量。色谱条件为 YMC-C30（4.6 nm×250 nm，5 μm）色谱柱，柱温为 25 ℃，进样量为 20 μL，检测器为二极管阵列检测器（Diode array detector，DAD），波长为 450 nm。流动相 A 相为：水:MTBE:甲醇=5:25:75（*V:V:V*），B 相为：水:MTBE:甲醇=5:85:10（*V:V:V*）。线性梯度洗脱，流速为 0.6 mL/min。

表 1 梯度洗脱程序

Table 1 Gradient elution program

时间/min	A 相/%	B 相/%
0~4.5	95	5
4.5~12.5	80	20
12.5~18	50	50
18~25	25	75
25~30	5	95

1.3 发芽过程中玉米籽粒不同部位 DPPH 自由基清除能力测定

通过测定玉米籽粒萌发过程中不同部位对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 DPPH 自由基的清除能力，以测定其抗氧化活性，测定方法参考 Müller[15]的方法，并加以改进。准确称取 1.0 g 不同部位的粉末，用 85%甲醇（含 0.5%甲酸）超声提取 3 次，提取溶剂体积分别为 10、10、5 mL，每次提取条件为室温下超声 20 min，5000 r/min 离心 10 min，合并 3 次提取上清液待测。用 85%甲醇（含 0.5%甲酸）溶液配置浓度为 0.2 mM DPPH·溶液，取 1 mL 待测液，空白管加入 1 mL 85%甲醇液，最后加入 1 mL DPPH·溶液，在室温避光静置 30 min，在 517 nm 处测定吸光值变化。结果以水溶性维生素 E（Trolox）等价值（μmol TEAC/g）表示。

1.4 实验数据处理

实验数据使用 SPSS 20.0 软件统计分析，每个实验重复三次分别计算结果，数据表示为方差±标准偏差，用 Duncan 多重比较测试的方差分析（ANOVA）进行分析。显著性差异在各组内比较。图表采用 OriginPro 8.5 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 玉米发芽率的动态变化

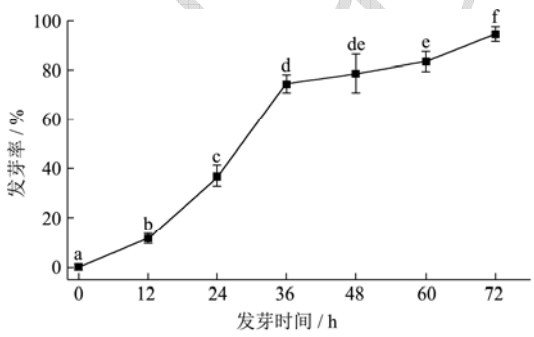


图 1 玉米发芽过程中发芽率的变化动态

Fig.1 Dynamic changes of germination rate during germination

注：不同小写字母之间表示各组之间差异显著（p<0.05）。

随着发芽时间的延长，玉米籽粒发芽率随之增加（图 1）。发芽第 12 h 时，玉米籽粒露出黄芽，发芽率为 11.60%。发芽至 36 h 时，发芽率激增至 74.37%，随后发芽率缓慢上升，在 72 h 时达到了 94.66%。12~36 h 间是玉米籽粒的出芽时间。

2.2 玉米发芽过程中胚根和胚芽的长度变化

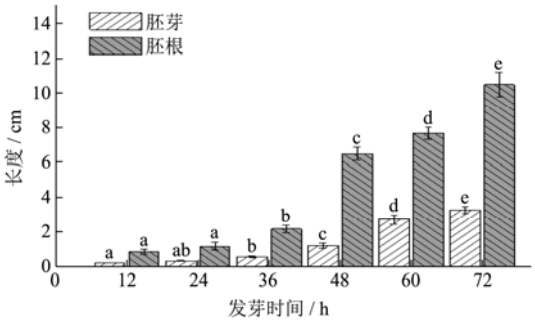


图 2 玉米发芽过程中胚根、胚芽长度的变化动态

Fig.2 Dynamics of radicle length and germ length during germination

注：不同小写字母分别表示胚芽、胚根长度差异显著（p<0.05）。

玉米发芽过程中胚根、胚芽的长度变化见图 2。

从图 2 可以看出，玉米发芽过程中胚芽长度在 0~36 h 平稳增长，在 48~60 h 和 60~72 h 间显著增长，在 72 h 时达到了 3.80 cm。胚根的长度在 0~36 h 和 48~60 h 内平稳增长，但 36~48 h 和 60~72 h 间增幅较大，在发芽 72 h 时其芽长达到了 10.5 cm。

2.3 玉米发芽过程中不同部位鲜重的变化

玉米芽生长过程中不同部位的鲜重变化见图 3。从图3可以看出，玉米发芽过程中种胚的鲜重在24~36 h 和 60~72 h 范围内增加幅度较大，存在显著差异（p<0.05）。发芽期间 0~48 h 胚根、胚芽的鲜重增长平稳，48~72 h 增加幅度较大，存在显著差异（p<0.05）。0~72 h 之间种胚、胚根和胚芽的鲜重最大值分别为：10.96、2.35、2.47 g/10 粒。且在同一发芽时间，三个发芽部位中种胚鲜重最大，其次是胚芽、胚根。

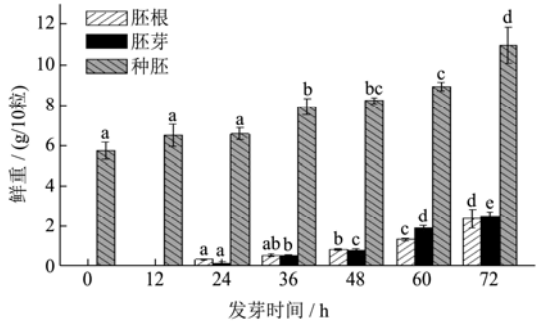


图 3 玉米发芽过程中不同部位鲜重的动态变化

Fig.3 Dynamics of fresh weight changes in different parts during germination

注：不同小写字母分别表示胚芽、胚根、种胚鲜重差异显著（p<0.05）。

2.4 玉米发芽过程中不同部位总类胡萝卜素合成动态

按 1.2.4 总类胡萝卜素含量的测定方法，测定玉米发芽过程中不同部位的总类胡萝卜素含量，结果见图 4。从图 4 中可以看出，种胚和胚根中的总类胡萝卜素含量在发芽过程中增长平稳，胚根中在第 48 h 开始检测到类胡萝卜素。胚根中总类胡萝卜素含量随着发芽时间延长而增加，在 72 h 时达到 2.77 μg/g。胚芽在发芽 36 h 时检测到了类胡萝卜素。胚芽中总类胡萝卜素含量在发芽 36~48 h 和 60~72 h 范围内增加幅度较大，其含量存在显著差异（p<0.05），增加至 72 h 达到最大值 48.12 μg/g。种胚中类胡萝卜素含量随着发芽时间而增加，在 36 h 时出现了降低的趋势，在 48 h 后恢复到了正常水平，随后继续增加，72 h 时达到了 16.03 μg/g，为发芽前的 2.06 倍。玉米籽粒发芽过程中，在 36 h 前种胚中总类胡萝卜素含量最高，其次是胚芽，胚根中最低。但 48 h 后胚芽中的总类胡萝卜素含量最高，其次是种胚，胚根中依然最低。种胚中总类胡萝卜素含量变化范围为：7.78~16.03 μg/g；胚芽中总类胡萝卜素含量变化范围为：0~48.12 μg/g；胚根中总类胡萝卜素含量变化范围为：0~2.77 μg/g。实验测得发芽前玉米籽粒的总类胡萝卜素含量为 7.78 μg/g，可见发芽后胚芽的总类胡萝卜素含量显著提高，为种子中总类胡萝卜素含量的 6.19 倍。

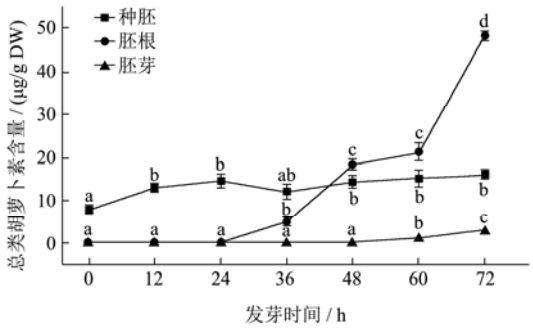


图 4 玉米发芽过程中不同部位总类胡萝卜素合成动态

Fig.4 Synthetic dynamics of total carotenoids in different parts during germination

注：不同小写字母分别表示胚芽、胚根、种胚总类胡萝卜素含量差异（p<0.05）。

2.5 玉米发芽过程中不同部位叶黄素、玉米黄质的合成动态

按 1.2.4.2 叶黄素和玉米黄质含量测定方法，测定玉米籽粒发芽过程中不同部位叶黄素、玉米黄质含量，HPLC 图谱见图 5，结果见图 6 和图 7。

从图 6 可以看出，玉米籽粒发芽过程中，三个部位的叶黄素变化趋势相同。胚芽中叶黄素含量在 36~48 h 和 60~72 h 范围内增幅较大，其含量存在显著性差异（p<0.05）。胚根中在 48 h 时开始检测出叶黄素，随后其含量缓慢增加，在 72 h 时达到 0.93 μg/g。种胚中叶黄素含量随着发芽时间的延长而增加，在 36 h 时出现了降低，而在 48 h 后恢复到了正常水平，随后继续增加，72 h 时达到了 35.08 μg/g。玉米籽粒发芽过程中，在 48 h 前种胚中的叶黄素含量最高，其次是胚芽，胚根中含量最低；但在 48~72 小时胚芽中的叶黄素含量最高，超过了种胚中的含量，同样胚根中含量最低。在发芽过程中，玉米种胚的叶黄素含量变化范围为 3.95~7.19 μg/g；胚芽中的叶黄素含量变化为 0~35.08 μg/g；胚根中的叶黄素含量变化为 0~0.93 μg/g。

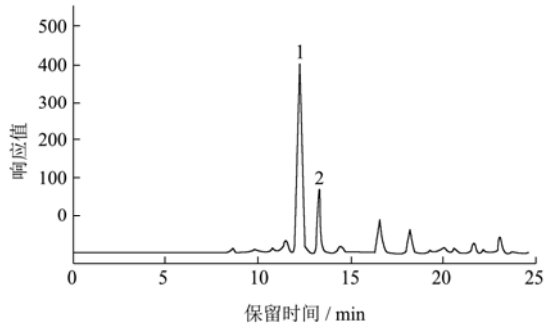


图 5 HPLC 图谱

Fig.5 HPLC result

注：1.叶黄素；2.玉米黄质。

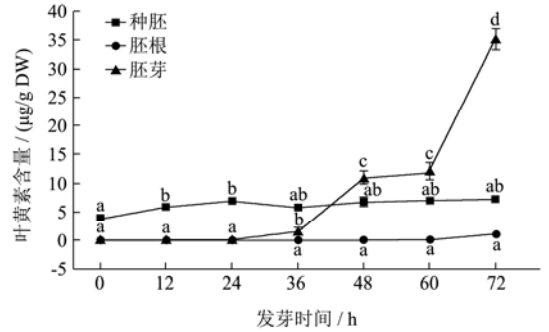


图 6 玉米发芽过程中不同部位叶黄素的合成动态

Fig.6 Synthetic dynamics of lutein in different parts during germination

注：不同小写字母分别表示胚芽、胚根、种胚叶黄素含量差异显著（p<0.05）。

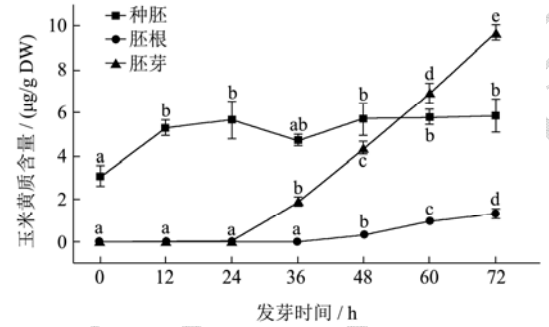


图 7 玉米发芽过程中不同部位玉米黄质的合成动态

Fig.7 Synthetic dynamics of zeaxanthin in different parts during germination

注：不同小写字母分别表示胚芽、胚根、种胚玉米黄质含量差异显著（p<0.05）。

由图 7 可知，胚芽和胚根中的玉米黄质含量分别从 24 h 和 48 h 开始增加，胚芽中玉米黄质含量增加幅度较大，在 72 h 时达到了 9.62 μg/g，其含量存在显著性差异（p<0.05）。而种胚中的玉米黄质在 0~12 h 之间显著增加，12 h 后含量逐渐升高，在 36 h 时出现了减少，而后又恢复到了减少前的水平。胚根中在 48 h 时开始检测到了玉米黄质，随后含量逐渐升高，在 72 h 时达到了 1.33 μg/g。发芽期间种胚玉米黄质含量变化范围为：2.97~5.87 μg/g；胚根中玉米黄质含量变化范围为 0~1.33 μg/g；胚芽中玉米黄质含量变化范围为 0~9.62 μg/g。

2.5 发芽过程中玉米籽粒不同部位 DPPH 自由基清除能力

玉米籽粒发芽过程中不同部位 DPPH 自由基清除能力如图 8 所示。胚芽中的抗氧化活性在发芽 24~72 h 之间呈增加趋势，且存在显著性差异（p<0.05），在 72 h 达到了 8.01 μmol TEAC/g。研究表明：经过发芽处理的玉米胚芽中的抗氧化活性物质含量增加[16]，使抗氧化能力高于未发芽的种胚[17]。而胚根中的抗氧化活性在发芽 24~72 h 呈现出下降的趋势，24 h 最高为 8.51 μmol TEAC/g，72 h 时降低到了 5.81 μmol TEAC/g。种胚中的抗氧化活性随着发芽时间增加总体出现上升趋势，在 72 h 达到了 2.78 μmol TEAC/g，但是在 24~36 h 间出现了下降，可能由于胚芽和胚根的长出，使种胚中具有抗氧化性的物质向胚根和胚芽转移而导致的。

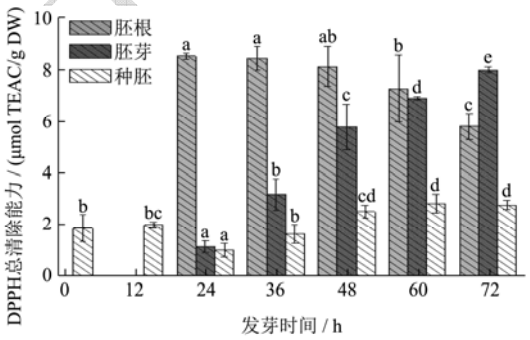


图 8 玉米籽粒发芽过程中不同部位 DPPH 自由基清除能力

Fig.8 DPPH free radical scavenging ability in different parts during germination

注：不同小写字母分别表示胚芽、胚根、种胚 DPPH 自由基清除能力差异显著（p<0.05）。

2.6 发芽过程中不同部位总类胡萝卜素、叶黄素和玉米黄质含量与抗氧化能力相关性分析

表 2 不同部位总类胡萝卜素、叶黄素和玉米黄质含量与抗氧化相关性分析

Table 2 Correlation between total carotenoids, lutein and zeaxanthin content and antioxidant activity in different parts

DPPH 自由基清除能力	总类胡萝卜素	叶黄素	玉米黄质
胚芽	0.896**	0.842**	0.959**
胚根	0.124	0.086	0.167
种胚	0.333	0.325	0.298

注：相关性分析采用 SPSS Pearson 相关性分析，*表示显著相关性(p<0.05)，**表示极显著相关性(p<0.01)。

由表 2 可知，胚芽中的总类胡萝卜素、叶黄素和玉米黄质的含量与胚芽中的 DPPH 自由基清除能力呈现出极显著的相关性（p<0.01）；而种胚和胚根中的总类胡萝卜素、叶黄素和玉米黄质的含量与其 DPPH 自由基清除能力并无相关性，可能由于种胚和胚根中的其他具有抗氧化性的物质含量变化引起，如多酚、超氧化物歧化酶或过氧化物酶等[18]。

3 结论

本文对黄玉米（苏玉 29）籽粒发芽过程中发芽率、不同部位的长度、鲜重变化及总类胡萝卜素含量和主要类胡萝卜素物质叶黄素、玉米黄质合成动态及抗氧化活性进行了研究。实验结果表明，玉米籽粒发芽过程中种胚、胚根和胚芽的鲜重呈现上升趋势，在 72 h 分别达到了 10.96、2.39 和 2.47g/10 粒，且在同一发芽时间，种胚重量大于胚芽和胚根。种胚和胚根的类胡萝卜素积累缓慢增加，而胚芽中的类胡萝卜素积累主要发生在 36~48 h 和 60~72 h。胚芽的总类胡萝卜素含量为 48.12 μg/g，明显高于胚根的 2.77 μg/g 和种胚的 16.03 μg/g。进行比较后证实了：苏玉 29 玉米籽粒各个部位中主要类胡萝卜素以叶黄素为主，玉米籽粒发芽后的总类胡萝卜素含量显著高于发芽前，为发芽前的 6.19 倍。胚芽中的 DPPH 自由基清除能力在 72 h 达到最大值 8.01 μmol TEAC/g。而胚根中的 DPPH 自由基清除能力在 24 h 达到了最大值 8.51 μmol TEAC/g。本文为玉米籽粒深加工中不同部位的选择利用提供理论依据，同时为类胡萝卜素类物质含量高的营养保健产品的研究开发提供参考依据。

参考文献

[1] 刘娟,史晓媛,王庆南,等.玉米发芽过程中碳水化合物代谢变化的研究[J].食品科学,2011,32(11):97-102
LIU Juan, SHI Xiao-yuan, WANG Qing-nan, et al. Preliminary study on carbohydrate metabolism during maize germination [J]. Food Science, 2011, 32(11): 97-102

[2] 蔡同一,赵文娟.玉米深加工及其综合利用[J].食品科学,2000,21(1):6-8
CAI Tong-yi, ZHAO Wen-juan. Deep processing of corn and its comprehensive utilization [J]. Food Science, 2000, 21(1): 6-8

[3] Pechinskii SV, Kuregyan AG. The impact of carotenoids on immunity (review) [J]. Pharmaceutical Chemistry Journal, 2014, 47(10): 509-513

[4] Egesel C O, Wong J C, Lambert R J, et al. Combining ability of maize inbreds for carotenoids and tocopherols [J]. Crop Science, 2003, 43(3): 818-823

[5] Hulshof PJM, Kosmeijer-Schuil T, West CE, et al. Quick screening of maize kernels for provitamin A content[J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2007, 20(8): 655-661

[6] Kurilich AC, Juvik JA. Quantification of carotenoid and tocopherol antioxidants in *Zea mays* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(5): 1948-1955

[7] Pongcharoen S, Warnnissorn P, Lertkajornsin O, et al. Protective effect of silk lutein on ultraviolet B-irradiated human keratinocytes [J]. Biological Research, 2013, 46(1): 39-45

[8] Sommerburg OE, Keunen JEE, Bird AC, et al. Fruits and vegetables that are sources for lutein and zeaxanthin: the macular pigment in human eyes [J]. British Journal of Ophthalmology, 1998, 82(8): 907-910

[9] Singh AK, Rehal J, Kaur A, et al. Enhancement of attributes of cereals by germination and fermentation: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 55(11): 1575-1589

[10] Gan R, Lui W, Wu K, et al. Bioactive compounds and bioactivities of germinated edible seeds and sprouts: an updated review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 59: 1-14

[11] Wu F, Yang N, Touré A, et al. Germinated brown rice and its role in human health [J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2013, 53(5): 451-463

[12] He W W, Wang Y X, Dai Z Q, et al. Effect of UV-B radiation and a supplement of $CaCl_2$ on carotenoid biosynthesis in germinated corn kernels [J]. Food Chemistry,2019, 278: 509-514

[13] 薛云皓,仵红梅,王爱月,等.玉米发芽前后的营养变化[J].河南医学研究,2001,10(1):5-7
XUE Yun-hao, CHU Hong-mei, WANG Ai-yue, et al. The study on nutrient ingredient changes of corn after germination [J]. Henan Medical Research, 2001, 10(1): 5-7

[14] Helland MH, Wicklund T, Narvhus JA. Effect of germination time on alpha-amylase production and viscosity of maize porridge [J]. Food Research International, 2002, 35(2-3): 0-321

（下转第 334 页）