

不同发育时期甘薯类胡萝卜素组分及其含量变化

田佳美^{1,2}, 姚研强^{1,2}, 骆秦湘², 张荣², 韩金玲^{1*}, 王章英^{2*}

(1. 河北科技师范学院农学与生物科技学院, 河北秦皇岛 066000)

(2. 广东省农业科学院作物所, 广东省农作物遗传改良重点实验室 广东广州 510640)

摘要: 为探究甘薯块根发育过程中类胡萝卜素的积累规律, 通过色度仪及超高效液相色谱法检测不同肉色甘薯块根在移栽后 45、75、105、135 及 165 d 的薯肉色特征值和类胡萝卜素组分及含量。结果表明随着薯肉色加深, 橘红肉甘薯 (ORFSP) 中类胡萝卜素总含量远高于其他品种, 高达 $299.07 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。在发育过程中, 类胡萝卜素总量在前期不断积累, 但大部分品种在 165 d 出现明显下降。8 个甘薯品种中共检测到 11 种类胡萝卜素单体, 其中, β -胡萝卜素、紫黄质、新黄质、环氧玉米黄质以及叶黄素在甘薯发育过程中含量较高且较稳定。黄肉甘薯 (YFSP) 中紫黄质、环氧玉米黄质具有较高的占比, 橘黄肉甘薯 (OFSP) 主要积累叶黄素和 β -胡萝卜素, ORFSP 中 β -胡萝卜素含量占类胡萝卜素总量的 81.20%~94.38%, 是甘薯中最主要的类胡萝卜素。甘薯中类胡萝卜素与亮度 (L^*)、色度角 (H^*) 呈负相关, 与红度 (a^*)、色彩饱和度 (C^*) 呈正相关, 新黄质与黄度 (b^*) 呈极显著正相关。综合可得, OFSP 和 ORFSP 类胡萝卜素组分更丰富, ORFSP 类胡萝卜素含量更高, YFSP 中含氧官能团的类胡萝卜素单体在类胡萝卜素中占比较高; 甘薯类胡萝卜素在发育末期出现明显下降。研究结果可为甘薯营养品质研究和品种筛选提供理论基础。

关键词: 甘薯; 发育时期; 颜色特征值; 薯肉色; 类胡萝卜素

文章编号: 1673-9078(2026)4-195-204

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0092

Changes in Carotenoid Composition and Content of Sweet Potatoes at Different Developmental Stages

TIAN Jiamei^{1,2}, YAO Yanqiang^{1,2}, LUO Qinxiang², ZHANG Rong², HAN Jinling^{1*}, WANG Zhangying^{2*}

(1. College of Agriculture and Biotechnology, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066600, China) (2. Crops Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Genetic Improvement of Guangdong Province, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To analyze the accumulation of carotenoids during the development of sweet potato tubers, color characteristic values as well as carotenoid composition and content in sweet potato tubers with different flesh colors on the 45th, 75th, 105th, 135th, and 165th days after transplanting were measured using a chroma meter and ultra-high performance liquid chromatography. The results showed that the total content of carotenoids ($299.07 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) in orange-red-flesh sweet potatoes (ORFSPs) was much

引文格式:

田佳美, 姚研强, 骆秦湘, 等. 不同发育时期甘薯类胡萝卜素组分及其含量变化[J]. 现代食品科技, 2026, 42(4): 195-204.

TIAN Jiamei, YAO Yanqiang, LUO Qinxiang, et al. Changes in carotenoid composition and content of sweet potatoes at different developmental stages [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 195-204.

收稿日期: 2025-01-20; 修回日期: 2025-03-15; 接受日期: 2025-03-26

基金项目: 以农产品为单元的广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目 (早粮 (甘薯、玉米等) 产业技术体系) (2024CXTD07); 国家甘薯产业技术体系鲜食型甘薯品种改良岗 (CARS-10); 广州市科技计划项目 (2023B03J1366); 广东省科技计划项目 (2023B1212060038); 河北省现代农业产业技术体系 (HBCT2023060203)

作者简介: 田佳美 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 甘薯遗传育种研究, E-mail: tianjm92@163.com

通讯作者: 韩金玲 (1975-), 女, 教授, 研究方向: 甘薯栽培与育种的教学与科研工作, E-mail: hanjinlingde@126.com; 共同通讯作者: 王章英 (1978-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 甘薯资源与遗传育种研究, E-mail: wangzhangying@gdaas.cn

higher than those in other varieties. During the developmental process, the total amount of carotenoids accumulated continuously in the early stage, but most varieties showed a significant decrease on the 165th day. A total of 11 types of carotenoid monomers were detected in eight sweet potato varieties. Among them, β -carotene, violaxanthin, neoxanthin, antheraxanthin, and lutein exhibited high content and remained stable throughout the development of sweet potatoes. Yellow-flesh sweet potatoes (YFSPs) exhibited high levels of violaxanthin and antheraxanthin, whereas orange-flesh sweet potatoes (OFSPs) mainly accumulated lutein and β -carotene. The content of β -carotene in ORFSP accounted for 81.20%~94.38% of total carotenoid content, making β -carotene the most important carotenoid in sweet potatoes. Carotenoids in sweet potatoes were negatively correlated with brightness (L^*) and chroma angle (H^*), but positively correlated with redness (a^*) and color saturation (C^*). Neoxanthin was significantly positively correlated with yellowness (b^*). In summary, OFSPs and ORFSPs possess more carotenoids, ORFSPs have higher carotenoid concentrations, and carotenoid monomers containing oxygen functional groups in YFSP account for a relatively high proportion in the carotenoid composition. The results provide a theoretical basis for the study of nutritional quality and variety breeding of sweet potatoes.

Key words: sweet potato; developmental stages; color characteristic value; sweet potato flesh color; carotenoid

类胡萝卜素是一组由异戊二烯骨架组成的脂溶性萜类化合物总称,种类繁多,据报道已发现 800 多种^[1]。其中, β -胡萝卜素具有抗氧化^[2]、抗炎^[3]、提高免疫力^[4,5]等功效,对提高认知功能也有一定作用^[6],同时, β -胡萝卜素是维生素 A 的重要来源,对于胚胎发育、细胞分化以及预防干眼病具有至关重要的作用^[7]。叶黄素是一类含氧类胡萝卜素,能够改善视觉功能^[8]、降低心血管疾病发病风险^[9]等。 α -胡萝卜素可以防治癌症,其效果是 β -胡萝卜素的 10 倍^[10],血清中 α -胡萝卜素浓度高可以降低死亡风险^[11]。以上可见不同种类的类胡萝卜素其功效有所差异,张雪松等^[12]研究发现,用总类胡萝卜素含量评估视黄醇当量会偏高 13% 左右,并认为很有必要将食物中的 α -胡萝卜素与 β -胡萝卜素进行区分。同时,类胡萝卜素的含量、组分和比例决定植物颜色的深浅^[13],Burns 等^[14]发现,甘薯块根颜色主要是由其所含 β -胡萝卜素和其代谢产物含量决定。研究不同肉色甘薯品种类胡萝卜素含量、组分及比例对进行甘薯功能化育种具有重要的理论指导意义。

甘薯块根中类胡萝卜素主要组分为 β -胡萝卜素、叶黄素、玉米黄质、紫黄质、 α -胡萝卜素等,但不同品种各组分差异较大^[15]。这既受遗传因素影响,又受环境因素影响,已有研究表明,光照^[16]、温度^[17]、器官发育^[18,19]等因素均会影响植物类胡萝卜素合成和代谢。陆国权等^[20]发现,甘薯胡萝卜素含量受基因型和试点互作效应影响比较明显;张小明等^[21]发现,在甘薯块根果皮、果肉中部和尾部的 β -胡萝卜素含量在膨大期前期增长速度快,之后开始下降;Ezell 等^[22]发现同一地点的同一甘薯品种早收和晚收其类胡萝卜素含量不同。由此可见,甘薯类胡萝卜素含量受遗传因素和环境因素影响均较大,但当前研究主要集中于收获后甘薯类胡萝卜素含量、生物合成、代谢及其调控等

方面。对甘薯类胡萝卜素组分研究较少,尤其不同发育时期甘薯类胡萝卜素各组分的变化动态鲜有报道。

在当今追求商品价值最大化的背景下,甘薯收获期越来越早,这必定会影响甘薯类胡萝卜素的合成与积累;同时,当今又追求商品功能化和专用化。研究不同发育时期甘薯类胡萝卜素组分及其含量变化特性,可以寻求甘薯早收和营养品质提升相统一,并细分不同甘薯品种的功效特征,培育功能化甘薯新品种。本研究以 8 个不同肉色甘薯品种为材料,利用色度仪和超高效液相色谱探究不同肉色甘薯品种在不同发育时期类胡萝卜素种类、含量以及薯肉颜色变化规律,为甘薯早收、功能化新品种繁育以及生产中进行类胡萝卜素含量和组分调控提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

本试验以 3 种不同肉色的 8 个甘薯品种为材料,分别为黄肉甘薯品种:安娜、玛莎莉、湛薯 12,橘黄肉甘薯品种:广薯 72、广薯 88-70、广薯 87,橘红肉甘薯品种:广薯 79、普薯 32 号。所有品种种苗均由广东省农业科学院甘薯所提供,于 2023 年 9 月 25 日移栽于广东省农业科学院白云试验基地国家种质广州甘薯圃(23°23'N, 113°26'E),每个品种种植 2 行,行长 10 m,行距 110 cm,株距 20 cm,3 次重复,采用完全随机区组设计,管理措施统一按常规田间要求进行。于 2023 年 11 月 9 日进行第一次取样,此后每隔 30 d 进行取样。

甲醇、乙腈、甲基叔丁基醚、2,6-二叔丁基对甲酚、甲酸均为色谱纯,购自德国默克公司;无水乙醇、丙酮均为优级纯,购自广州化学试剂厂;正己烷,购自

国药集团化学试剂有限公司; 13 个类胡萝卜素标准品: 紫黄质 (纯度 $\geq 95\%$)、新黄质 (纯度 $\geq 97\%$)、环氧玉米黄质 (纯度 $\geq 95\%$), 购自瑞士 CaroteNature 公司; 叶黄素 (纯度 $\geq 96\%$)、玉米黄质 (纯度 $\geq 97\%$)、 α -隐黄质 (纯度 $\geq 98\%$)、 ε -胡萝卜素 (纯度 $\geq 98\%$)、 β -隐黄质 (纯度 $\geq 97\%$)、 α -胡萝卜素 (纯度 $\geq 97\%$)、 β -胡萝卜素 (纯度 $\geq 95\%$)、 δ -胡萝卜素 (纯度 $\geq 95\%$)、 γ -胡萝卜素 (纯度 $\geq 96\%$)、番茄红素 (纯度 $\geq 95\%$), 由华南理工大学食品学院郭新波老师课题组提供。

1.2 仪器与设备

M1 Plus A3 Unis 扫描仪, 紫光股份有限公司; Agilent 1260 Infinity II 液相色谱仪, 美国安捷伦公司; MIX-200 多管漩涡振荡器, 上海净信实业发展有限公司; Sorvall ST 16R 离心机, 美国 Thermo Fisher 公司; TX223L 电子天平, 日本岛津公司; Beta 1-8 LSCbasic 冷冻干燥机, 德国 Martin Christ 公司; JP-120S 超声清洗仪, 深圳市洁盟清洗设备有限公司; FS100S 粉碎机, 广州雷迈机械设备有限公司; NDK200-2 氮吹仪, 上海精密仪器仪表有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品采集与预处理

在移栽后 45 (S1 时期)、75 (S2 时期)、105 (S3 时期)、135 (S4 时期) 和 165 d (S5 时期) 进行取样, 安娜和玛莎莉在移栽后第 45 天未有薯块形成, 只有 4 个发育时期的薯块样品。每次每个小区选取有代表性长势一致的植株 3 株, 每株分别取中等大小的鲜薯 2~3 块, 清洗, 擦干。先横切拍照记录薯肉颜色, 并用色度仪测定薯块基部、中部、尖部薯肉颜色特征值, 每个薯块各部位分别测定 3 次, 整个薯块的色价取该薯块 9 个测定值的平均值。将薯块去皮擦丝, 混匀后, 称取 100 g 样品装入纱网袋, 放入冻干机中冷冻干燥 72 h, 磨成粉末制成冻干样, 装入避光密封袋中, 保存于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中, 待测类胡萝卜素组合和含量。

1.3.2 指标测定

1.3.2.1 甘薯薯肉的颜色特征值测定

用色度仪进行测定, 每个甘薯测量三次, 测定 L^* (明亮度), a^* (红绿色, 正值表示偏红, 负值表示偏绿), b^* (黄蓝色, 正值表示偏黄, 负值表示偏蓝), 并根据公式计算 C^* (色彩饱和度, 值越大代表颜色的鲜艳度越高) 和 H^* (色度角)。计算公式如下:

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

(1)

$$H^* = \tan^{-1}(b^*/a^*), a^* > 0, b^* > 0$$

(2)

$$H^* = 180^{\circ} + \tan^{-1}(b^*/a^*), a^* < 0$$

(3)

式中:

C^* ——色彩饱和度;

a^* ——红绿色;

b^* ——黄蓝色;

H^* ——色度角。

1.3.2.2 类胡萝卜素的提取与测定

甘薯冻干样品中类胡萝卜素的提取与检测采用贾瑞雪等^[15]建立的超高效液相色谱分析方法, 样品以乙醇: 丙酮: 正己烷 (1:1:1, $V/V/V$) 为提取溶剂, 提取液氮吹浓缩后由甲基叔丁基醚作为复溶液; 色谱条件: 色谱柱为 YMC Carotenoid C30 (2 mm $\times$ 100 mm, 3 μm); 以甲醇: 乙腈 (1:3, V/V) 加入 0.01% BHT ($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) 和 0.1% 甲酸作为流动相 A 相, 甲基叔丁基醚加入 0.01% BHT 作为流动相 B 相, 梯度洗脱; 流量为 0.8 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 检测波长 450 nm, 柱温 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, 进样量 1 μL , 分析时间 8 min。

1.3.3 数据处理与分析

以上试验指标测定均重复 3 次, 结果用平均值 $\pm$ 标准差表示。用 SPSS 26.0 软件对甘薯类胡萝卜素含量进行单因素方差分析和相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 甘薯发育过程中薯肉颜色特征值

甘薯薯肉颜色是决定消费者选择的重要因素, 也是影响甘薯风味和香气的重要因素之一, 近年来, 颜色亮丽的甘薯广受消费者的喜爱, 因此, 本文先对甘薯薯肉色进行了研究^[23]。如图 1 所示, 甘薯各品种薯肉颜色在发育过程中均出现浅-深-浅-深的颜色变化, 基本以移栽后 75~105 d 的薯肉颜色最深, 其次为移栽后 165 d 的薯肉颜色较深。

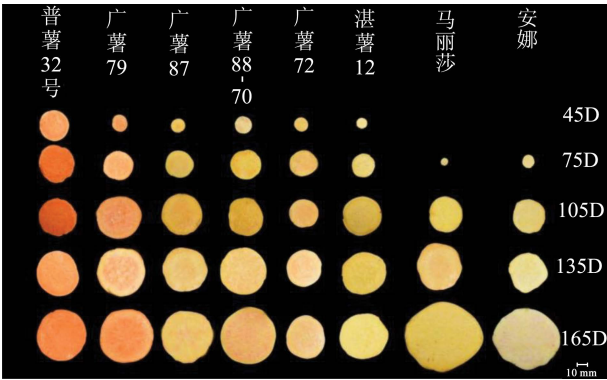


图 1 8 个甘薯品种不同发育时期横切照片

Fig.1 Cross-sectional photos of 8 sweet potato varieties at different developmental stages

如表 1 所示, 不同薯肉色品种 L^* 、 a^* 、 C^* 、 H^* 值差异显著, 随着薯肉色加深, L^* 和 H^* 值降低, a^* 和 C^* 值升高; 各指标值同一系列品种间差异不显著。不同色价指标对发育时期的反应不同, L^* 和 H^* 最大值出现在 S1 或 S2 时期, 之后随着发育时期的推进, 其值越来越小, S5 时期 L^* 和 H^* 的值最小, 即随着发育时期的推进薯肉颜色明亮度下降; 安娜、广薯 72、广薯 88-70、广薯 79、普薯 32 号这 5 个品种 L^* 的最大值和最小值之间差异达显著水平, 相邻时期差异不显著, 而 H^* 值在此 5 个品种中表现出相邻发育时期差异也基本达显著水平, 其他品种中仅在最大值和最小值间差异显著。 a^* 值对发育时期的反应与 L^* 值相反, 基本随着发育时期的推进而增大, S5 时期达最大值, 即随着发育时期的推进, 薯肉颜色越来越偏红, 橘黄色的广薯 72、广薯 88-70、广薯 87 这 3 个品种的 a^* 值在相邻发育时期差异不显著, 间隔 60 d 的两发育时期 a^* 值差异达显著水平, 其他品种仅在最大值和最小值间出现显著差异。 C^* 最大值出现在 S4 或 S5 时期, 橘黄肉品种的 C^* 值在发育时期差异不显著, 另两个薯肉色系品种的 C^* 值在最大值和最小值之间出现显著差异, 这表明随着薯块的发育, 薯肉越来越鲜艳。这与图 1 中甘薯视觉颜色相符合, 颜色越深, L^* 和 H^* 值越低, a^* 和 C^* 值越高, 研究表明, 随着甘薯薯肉色从黄色到橘红色的变化, a^* 、 b^* 、 C^* 值增加, L^* 、 H^* 值降低^[23], 能够为甘薯育种中薯肉色的筛选提供了量化参考指标。

2.2 甘薯品种类胡萝卜素含量变化

如表 2 所示, 在甘薯发育过程中, 随着薯肉色加深, 类胡萝卜素含量增加, 不同薯肉色系间差异达显著水平, 三者类胡萝卜素总含量分别为 4.61~10.18、18.87~68.73、88.88~299.07 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 橘红肉甘薯的类胡萝卜素含量远高于橘黄肉甘薯。类胡萝卜素含量对发育时期的反应在不同品种间表现不同, 安娜的类胡萝卜素含量不受发育时期的影响; 玛莎莉和湛薯 12 的类胡萝卜素含量随发育时期的推进先升高, 在 S4 时期达最高, 之后下降, 不同发育时期差异未达显著水平; 广薯 72 和普薯 32 号类胡萝卜素含量随发育时期的变化与以上 2 个品种相同, 但不同发育时期类胡萝卜素含量出现显著差异, 尤其普薯 32 号在 S5 时期类胡萝卜素含量下降 70.50%。广薯 88-70 和广薯 79 的类胡萝卜素含量以 S2 时期最高, S4 和 S5 时期分别下降 22.19% 和 36.04%、38.63% 和 22.67%; 仅广薯 87 类

胡萝卜素含量随发育时期的推进呈现升高-降低-升高的趋势, 甘薯发育的后期类胡萝卜素含量变化不大, 且相对较高。上述结果说明在甘薯发育的 5 个时期中, 大多数甘薯的类胡萝卜素含量在 S5 时期出现大量流失, 这可能是因为随着发育时期的延长, 甘薯中类胡萝卜素合成途径中下游化合物的合成消耗了类胡萝卜素, 另一方面, 在 S4 到 S5 时期, 甘薯经历了越冬, 已有研究表明, 当温度低于 10 $^{\circ}\text{C}$ 时, 类胡萝卜素的合成会受到抑制^[24], 而在此过程中, 甘薯块根仍在缓慢的生长膨大, 造成了 S5 时期类胡萝卜素含量大幅度下降。

2.3 甘薯类胡萝卜素单体组分及其占比

为更深入的了解类胡萝卜素在甘薯成熟过程中的变化, 对类胡萝卜素的组分及其含量进行了分析, 如表 2 所示, 在 8 个甘薯中共检测到 11 种类胡萝卜素, 黄肉甘薯仅检测出 5 种类胡萝卜素, 其中仅有湛薯 12 中包含叶黄素, 且在 S5 时期消失。橘黄肉甘薯可检测出 10 种类胡萝卜素单体, 玉米黄质等 5 种单体仅在部分时期检测到微量含量, 最高仅为 1.82 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。 δ -胡萝卜素为橘红肉甘薯特有的类胡萝卜素单体, 但在发育过程中含量较少且在部分发育时期存在不稳定性。受发育时期的影响, 甘薯类胡萝卜素的组分及含量呈动态变化, 部分类胡萝卜素单体随发育时期的推进出现或消失; 且在不同薯肉色系甘薯中, 甘薯颜色越浅, 类胡萝卜素组分越少、含量越低, 相同颜色的甘薯品种类胡萝卜素的组成及含量具有相似性。前人对不同薯肉色甘薯类胡萝卜素组分的研究表明甘薯薯肉呈现不同梯度的黄色和橘色是由黄颜色的叶黄素类色素以及橙色的胡萝卜素类色素导致的^[25]。

如图 2 所示, 不同肉色品种间比较, 随着薯肉颜色的加深, β -胡萝卜素占比增加, 紫黄质和环氧黄质占比下降。 β -胡萝卜素在黄肉品种中占比为 12.66%~56.62%, 而在橘红肉品种中占比为 81.20%~94.38%。Yao 等^[26]的研究表明, 橘肉甘薯中总类胡萝卜素含量为 127.37 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, β -胡萝卜素含量 111.99 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, β -胡萝卜素占比为 87.92%。Islam 等^[27]的研究结果也表明, β -胡萝卜素的含量随着薯肉色从白色向橙色的加深而增加。不同发育时期比较, 基本表现出 β -胡萝卜素与紫黄质的占比此长彼退趋势; 新黄质占比随着块根发育时期的推进而降低, 在发育后期表现明显; 其他单体占比随块根发育时期的变化没有表现出规律性变化。

表 1 不同甘薯品种发育过程中薯肉颜色特征值

Table 1 Color characteristic values of different sweet potato varieties during development

品种	发育阶段	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>C</i> *	<i>H</i> *
安娜	S1	—	—	—	—	—
	S2	89.03 ± 0.95 ¹	-1.36 ± 0.81 ¹⁴	23.85 ± 3.02 ⁹⁻¹¹	23.89 ± 3.02 ¹²⁻¹⁴	93.33 ± 1.97 ¹
	S3	86.14 ± 0.25 ¹⁻²	-0.71 ± 0.17 ¹²⁻¹⁴	23.45 ± 1.99 ¹⁰⁻¹²	23.46 ± 1.99 ¹²⁻¹⁴	91.73 ± 0.29 ¹⁻²
	S4	87.59 ± 0.30 ¹⁻²	1.07 ± 0.05 ¹¹⁻¹⁴	29.65 ± 0.98 ³⁻⁷	29.67 ± 0.98 ⁷⁻¹¹	87.92 ± 0.14 ³⁻⁵
	S5	86.89 ± 0.42 ²⁻³	3.18 ± 1.26 ¹⁰⁻¹¹	21.9 ± 1.74 ¹¹⁻¹²	22.15 ± 1.89 ¹³⁻¹⁴	81.85 ± 2.57 ⁵⁻⁶
玛莎莉	S1	—	—	—	—	—
	S2	86.73 ± 1.90 ¹⁻²	-0.86 ± 0.23 ¹³⁻¹⁴	20.14 ± 0.69 ¹²	20.16 ± 0.68 ¹⁴	92.46 ± 0.73 ¹
	S3	86.85 ± 0.88 ¹⁻²	1.19 ± 0.17 ¹¹⁻¹⁴	27.31 ± 0.65 ⁵⁻⁸	27.34 ± 0.65 ⁹⁻¹²	87.51 ± 0.42 ³⁻⁵
	S4	86.10 ± 0.88 ²⁻³	2.57 ± 1.14 ¹¹⁻¹²	30.16 ± 3.49 ²⁻⁷	30.27 ± 3.58 ⁵⁻¹⁰	85.25 ± 1.59 ⁴⁻⁵
	S5	85.30 ± 1.04 ²⁻⁴	1.86 ± 0.95 ¹¹	28.37 ± 3.40 ⁴⁻⁸	28.44 ± 3.42 ⁸⁻¹¹	86.28 ± 1.79 ³⁻⁵
湛薯 12	S1	86.21 ± 1.52 ²⁻³	0.54 ± 0.53 ¹¹⁻¹⁴	25.59 ± 1.15 ⁸⁻¹⁰	25.6 ± 1.16 ¹¹⁻¹³	88.8 ± 1.14 ²⁻³
	S2	87.29 ± 0.21 ¹⁻²	0.8 ± 0.29 ¹¹⁻¹⁴	26.76 ± 0.79 ⁷⁻¹⁰	26.78 ± 0.8 ¹⁰⁻¹²	88.3 ± 0.55 ³⁻⁴
	S3	86.81 ± 0.43 ¹⁻²	1.42 ± 0.51 ¹¹⁻¹³	27.23 ± 2.65 ⁵⁻⁹	27.26 ± 2.68 ⁹⁻¹²	87.06 ± 0.76 ³⁻⁵
	S4	85.27 ± 0.45 ²⁻⁴	2.51 ± 0.73 ¹¹	29.82 ± 3.02 ²⁻⁷	29.93 ± 3.06 ⁶⁻¹⁰	85.23 ± 1.09 ⁴⁻⁵
	S5	85.24 ± 2.67 ²⁻⁴	2.98 ± 0.85 ¹⁰⁻¹¹	32.24 ± 0.50 ¹⁻⁴	32.39 ± 0.47 ⁴⁻⁸	84.72 ± 1.53 ⁵⁻⁶
广薯 72	S1	83.82 ± 1.93 ³⁻⁵	5.26 ± 0.27 ⁹⁻¹⁰	29.48 ± 1.45 ³⁻⁷	29.95 ± 1.40 ⁶⁻¹⁰	79.87 ± 0.91 ⁷⁻⁸
	S2	85.30 ± 1.43 ²⁻⁴	6.98 ± 1.45 ⁸⁻⁹	32.85 ± 3.18 ¹⁻³	33.58 ± 3.41 ³⁻⁷	78.09 ± 1.28 ⁸
	S3	82.50 ± 1.27 ⁵⁻⁷	9.94 ± 1.65 ⁶⁻⁷	30.39 ± 0.54 ¹⁻⁷	31.98 ± 1.02 ⁴⁻⁸	71.93 ± 2.51 ⁹
	S4	81.29 ± 0.85 ⁵⁻⁸	16.38 ± 2.37 ³⁻⁴	29.87 ± 3.35 ²⁻⁷	34.07 ± 4.07 ³⁻⁶	61.32 ± 0.98 ¹²
	S5	82.58 ± 1.56 ⁵⁻⁷	14.78 ± 3.08 ⁴⁻⁵	29.91 ± 0.84 ²⁻⁷	33.44 ± 1.61 ³⁻⁷	63.81 ± 4.67 ¹¹⁻¹²
广薯 88-70	S1	83.80 ± 1.23 ³⁻⁵	6.86 ± 1.04 ⁹⁻¹⁰	30.38 ± 0.53 ³⁻⁷	31.16 ± 0.32 ⁶⁻¹⁰	77.26 ± 2.05 ⁷⁻⁸
	S2	84.64 ± 0.82 ²⁻⁴	6.02 ± 1.80 ⁸⁻⁹	31.68 ± 3.07 ¹⁻³	32.25 ± 3.14 ³⁻⁷	79.25 ± 2.92 ⁸
	S3	83.78 ± 0.60 ⁵⁻⁷	6.76 ± 0.98 ⁶⁻⁷	29.90 ± 2.32 ¹⁻⁷	30.65 ± 2.45 ⁴⁻⁸	77.29 ± 1.07 ⁹
	S4	81.90 ± 0.69 ⁵⁻⁸	9.69 ± 0.43 ³⁻⁴	31.67 ± 1.07 ²⁻⁷	33.12 ± 1.11 ³⁻⁶	72.99 ± 0.55 ¹²⁻¹³
	S5	80.88 ± 0.68 ⁵⁻⁷	13.74 ± 2.29 ⁴⁻⁵	31.04 ± 1.50 ²⁻⁷	33.97 ± 2.29 ³⁻⁷	66.24 ± 2.53 ¹¹⁻¹²
广薯 87	S1	81.04 ± 0.69 ⁶⁻⁸	8.06 ± 0.40 ⁷⁻⁸	33.69 ± 0.48 ¹⁻⁵	34.65 ± 0.55 ³⁻⁵	76.55 ± 0.49 ⁸
	S2	83.30 ± 1.02 ⁴⁻⁶	7.26 ± 0.88 ⁸⁻⁹	34.12 ± 1.50 ¹	34.88 ± 1.28 ³⁻⁴	77.94 ± 1.93 ⁸
	S3	81.40 ± 1.35 ⁵⁻⁸	10.53 ± 2.15 ⁶⁻⁷	31.10 ± 1.72 ¹⁻⁵	32.84 ± 2.05 ⁴⁻⁷	71.37 ± 3.26 ⁹
	S4	83.17 ± 1.74 ⁴⁻⁶	10.06 ± 0.92 ⁶⁻⁷	29.74 ± 2.49 ³⁻⁷	31.39 ± 2.41 ⁴⁻⁹	71.27 ± 1.99 ⁹
	S5	83.07 ± 1.01 ⁴⁻⁶	11.65 ± 2.41 ⁶	28.43 ± 1.45 ⁴⁻⁸	30.75 ± 2.25 ⁴⁻¹⁰	67.86 ± 3.11 ¹⁰
广薯 79	S1	80.35 ± 1.40 ⁷⁻⁹	12.51 ± 0.28 ⁵⁻⁶	26.83 ± 0.76 ⁶⁻¹⁰	29.61 ± 0.77 ⁷⁻¹¹	64.99 ± 0.47 ¹⁰⁻¹¹
	S2	77.97 ± 0.64 ⁹⁻¹⁰	21.18 ± 1.24 ²	26.76 ± 2.73 ⁷⁻¹⁰	34.12 ± 2.90 ³⁻⁶	51.57 ± 1.27 ¹⁴⁻¹⁶
	S3	78.91 ± 1.00 ⁸⁻¹⁰	20.48 ± 0.45 ²	27.94 ± 0.95 ⁵⁻⁸	34.64 ± 1.00 ³⁻⁵	53.74 ± 0.52 ¹⁴
	S4	77.76 ± 1.89 ¹⁰	22.68 ± 2.82 ²	29.89 ± 2.61 ²⁻⁷	37.52 ± 3.75 ²⁻³	52.88 ± 1.27 ¹⁴⁻¹⁵
	S5	74.88 ± 2.16 ¹¹	27.10 ± 2.05 ¹	32.06 ± 1.74 ¹⁻⁴	41.98 ± 2.64 ¹	49.82 ± 0.72 ¹⁵⁻¹⁶
普薯 32 号	S1	78.03 ± 1.72 ⁹⁻¹⁰	17.60 ± 0.14 ³	29.54 ± 1.28 ³⁻⁷	34.38 ± 1.17 ³⁻⁵	59.2 ± 0.87 ¹³
	S2	74.49 ± 2.35 ¹¹	25.25 ± 1.72 ¹	31.11 ± 0.62 ¹⁻⁵	40.07 ± 0.66 ¹⁻²	50.96 ± 2.45 ¹⁴⁻¹⁶
	S3	74.48 ± 0.56 ¹¹	25.79 ± 0.59 ¹	31.16 ± 0.88 ¹⁻⁵	40.45 ± 1.04 ¹⁻²	50.39 ± 0.33 ¹⁵⁻¹⁶
	S4	72.58 ± 1.47 ¹¹	26.16 ± 0.49 ¹	30.32 ± 0.35 ¹⁻⁷	40.05 ± 0.51 ¹⁻²	49.21 ± 0.45 ¹⁶
	S5	72.42 ± 1.78 ¹¹	26.25 ± 1.02 ¹	30.73 ± 1.60 ¹⁻⁶	40.42 ± 1.83 ¹⁻²	49.48 ± 0.66 ¹⁶

注：同列肩标不同数字表示所有品种 S1-S5 时期同一颜色特征值差异显著 ($P<0.05$)。

表 2 不同甘薯品种发育过程中薯肉类胡萝卜素组分及含量

Table 2 Carotenoid composition and content of different sweet potato varieties during development												
品种	发育阶段	紫黄质	新黄质	环氧玉米黄质	叶黄素	玉米黄质	ϵ -胡萝卜素	β -隐黄质	β -胡萝卜素	δ -胡萝卜素	γ -胡萝卜素	总量
安娜	S1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	S2	1.18 ± 0.08 ¹³⁻¹⁴	0.66 ± 0.05 ¹⁹⁻²⁰	1.44 ± 0.04 ¹³⁻¹⁴	0 ± 0 ¹⁸	—	—	—	2.91 ± 0.14 ¹⁰⁻¹²	—	—	6.18 ± 0.10 ¹⁵
	S3	1.80 ± 0.12 ¹⁰⁻¹¹	0.86 ± 0.01 ¹⁷⁻¹⁸	1.29 ± 0 ¹⁴⁻¹⁶	0 ± 0 ¹⁸	—	—	—	2.69 ± 0.1 ¹⁰⁻¹²	—	—	6.65 ± 0.19 ¹⁵
	S4	2.43 ± 0.12 ⁷⁻⁸	0.51 ± 0.02 ²⁰⁻²	1.37 ± 0.06 ¹³⁻¹⁵	0.16 ± 0 ¹⁸	—	—	—	2.24 ± 0.03 ¹⁰⁻¹²	—	—	6.71 ± 0.21 ¹⁵
	S5	1.19 ± 0.02 ¹³⁻¹⁴	0.22 ± 0.07 ²²	1.43 ± 0.08 ¹³⁻¹⁴	0 ± 0 ¹⁸	—	—	—	3.72 ± 0.76 ¹⁰⁻¹²	—	—	6.57 ± 0.83 ¹⁵
玛莎莉	S1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	S2	0.59 ± 0.05 ¹⁶⁻¹⁷	0 ± 0 ²³	1.84 ± 0.17 ¹¹⁻¹²	—	—	—	—	2.18 ± 0.09 ¹⁰⁻¹²	—	—	4.61 ± 0.07 ¹⁵
	S3	1.98 ± 0.01 ⁹⁻¹⁰	0.36 ± 0.03 ²¹⁻²²	1.12 ± 0.07 ¹⁵⁻¹⁷	—	—	—	—	3.19 ± 0.11 ¹⁰⁻¹²	—	—	6.66 ± 0.21 ¹⁵
	S4	0.84 ± 0.04 ¹⁵⁻¹⁶	0.93 ± 0.04 ¹⁷⁻¹⁸	3.01 ± 0.19 ⁷	—	—	—	—	4.25 ± 0.27 ¹⁰⁻¹²	—	—	9.03 ± 0.47 ¹³⁻¹⁵
	S5	0.96 ± 0.02 ¹⁴⁻¹⁵	0.24 ± 0 ²²	2.66 ± 0.11 ⁸	—	—	—	—	2.99 ± 0.15 ¹⁰⁻¹²	—	—	6.84 ± 0.25 ¹⁵
湛薯12	S1	1.39 ± 0.12 ¹²⁻¹³	0.8 ± 0.03 ¹⁷⁻¹⁹	1.16 ± 0.03 ¹⁴⁻¹⁷	0.32 ± 0.05 ¹⁷⁻¹⁸	—	—	—	1.45 ± 0.10 ¹¹⁻¹²	—	—	5.13 ± 0.21 ¹⁵
	S2	2.19 ± 0.17 ⁸⁻⁹	1.37 ± 0.14 ¹⁴	1.38 ± 0.05 ¹³⁻¹⁵	0.65 ± 0.07 ¹⁷	—	—	—	1.27 ± 0.12 ¹²	—	—	6.85 ± 0.12 ¹⁵
	S3	2.11 ± 0.10 ⁹	1.42 ± 0.07 ¹³⁻¹⁴	1.64 ± 0.11 ¹²⁻¹³	1.74 ± 0.08 ¹⁵⁻¹⁶	—	—	—	1.00 ± 0.07 ¹²	—	—	7.90 ± 0.07 ¹⁴⁻¹⁵
	S4	2.51 ± 0.08 ⁷	1.84 ± 0.11 ¹⁰⁻¹¹	2.20 ± 0.04 ⁹	2.16 ± 0.30 ¹³⁻¹⁴	—	—	—	1.48 ± 0.08 ¹¹⁻¹²	—	—	10.18 ± 0.11 ¹²⁻¹⁵
	S5	1.95 ± 0.07 ⁹⁻¹⁰	0.73 ± 0.10 ¹⁸⁻¹⁹	0.94 ± 0.06 ¹⁷⁻¹⁸	0 ± 0 ¹⁸	—	—	—	2.33 ± 0.05 ¹⁰⁻¹²	—	—	5.95 ± 0.28 ¹⁵
广薯72	S1	1.44 ± 0.12 ¹²⁻¹³	3.25 ± 0.13 ⁵⁻⁶	6.97 ± 0.32 ¹	5.59 ± 0.52 ⁶	0.66 ± 0.04 ²	1.1 ± 0.2 ⁵	0 ± 0 ⁵	16.58 ± 0.68 ⁸⁻¹²	—	—	35.60 ± 1.28 ⁸⁻¹⁰
	S2	5.77 ± 0.44 ¹	5.10 ± 0.31 ²	5.38 ± 0.23 ²	10.77 ± 0.57 ²	0.79 ± 0.04 ¹	0 ± 0 ⁸	0 ± 0 ⁵	16.92 ± 0.19 ⁸⁻¹²	—	—	45.28 ± 1.08 ⁸⁻⁹
	S3	4.19 ± 0.08 ³	3.13 ± 0.06 ⁶	3.79 ± 0.05 ⁶	6.92 ± 0.15 ⁴	0.31 ± 0.02 ⁴	0 ± 0 ⁸	0 ± 0 ⁵	27.92 ± 0.29 ⁸	—	—	47.03 ± 0.60 ⁸
	S4	4.83 ± 0.09 ²	3.54 ± 0.10 ⁴	4.23 ± 0.1 ⁵	6.22 ± 0.22 ⁵	0.5 ± 0 ³	0 ± 0 ⁸	0.61 ± 0 ³⁻⁴	47.78 ± 1.15 ⁷	—	—	68.73 ± 1.71 ⁷
	S5	1.59 ± 0.06 ¹¹⁻¹²	1.98 ± 0.12 ¹⁰	2.60 ± 0.12 ⁸	1.45 ± 0.11 ¹⁶	0 ± 0 ⁶	0 ± 0 ⁸	0 ± 0 ⁵	29.3 ± 1.32 ⁸	—	—	36.93 ± 1.72 ⁸⁻¹⁰
广薯88-70	S1	1.15 ± 0.09 ¹³⁻¹⁴	1.67 ± 0.10 ¹¹⁻¹²	3.70 ± 0.26 ⁶	2.87 ± 0.23 ¹⁰	0.23 ± 0.11 ⁵	0.31 ± 0.02 ⁷	0 ± 0 ⁵	15.49 ± 0.92 ⁸⁻¹²	—	0.39 ± 0.05 ⁷	25.81 ± 1.41 ¹⁰⁻¹²
	S2	2.66 ± 0.16 ⁶⁻⁷	3.79 ± 0.08 ³	4.92 ± 0.08 ³	2.82 ± 0.31 ¹⁰⁻¹¹	0.66 ± 0.08 ²	0.28 ± 0.09 ⁷	0 ± 0 ⁵	21.95 ± 0.17 ⁸⁻⁹	—	1.82 ± 0.22 ¹	38.90 ± 0.84 ⁸⁻¹⁰
	S3	2.04 ± 0.17 ⁹⁻¹⁰	2.38 ± 0.22 ⁸	3.75 ± 0.23 ⁶	3.91 ± 0.1 ⁸	0 ± 0 ⁶	0 ± 0 ⁸	0 ± 0 ⁵	11.19 ± 0.43 ⁹⁻¹²	—	0.23 ± 0.02 ⁸	23.48 ± 0.36 ¹⁰⁻¹⁴
	S4	2.88 ± 0.26 ⁶	2.33 ± 0.02 ⁸⁻⁹	3.85 ± 0.06 ⁶	3.02 ± 0.13 ⁹⁻¹⁰	0.51 ± 0.06 ³	0 ± 0 ⁸	0.52 ± 0.10 ⁴	15.68 ± 0.96 ⁸⁻¹²	—	1.46 ± 0.05 ²	30.27 ± 1.49 ⁹⁻¹¹
	S5	1.53 ± 0.10 ¹¹⁻¹²	0.51 ± 0.02 ²⁰⁻²¹	1.38 ± 0.09 ¹³⁻¹⁵	0 ± 0 ¹⁸	0 ± 0 ⁶	0 ± 0 ⁸	0 ± 0 ⁵	21.21 ± 1.54 ⁸⁻⁹	—	0 ± 0 ⁹	24.88 ± 1.72 ¹⁰⁻¹³

续表2

品种	发育阶段	紫黄质	新黄质	环氧玉米黄质	叶黄素	玉米黄质	ϵ -胡萝卜素	β -隐黄质	β -胡萝卜素	δ -胡萝卜素	γ -胡萝卜素	总量
广薯87	S1	2.21 ± 0.06 ⁸⁻⁹	3.43 ± 0.02 ⁴⁻⁵	3.67 ± 0.36 ⁶	2.39 ± 0.21 ¹²⁻¹³	—	—	—	7.17 ± 0.61 ⁹⁻¹²	—	—	18.87 ± 1.07 ¹¹⁻¹⁵
	S2	3.33 ± 0.04 ⁵	5.31 ± 0.18 ¹	4.34 ± 0.19 ⁴⁻⁵	1.9 ± 0.06 ¹⁴⁻¹⁵	—	—	—	9.27 ± 0.35 ⁹⁻¹²	—	—	24.15 ± 0.63 ¹⁰⁻¹³
	S3	4.18 ± 0.20 ³	3.88 ± 0.04 ³	4.58 ± 0.01 ⁴	2.33 ± 0.1 ¹²⁻¹³	—	—	—	17.46 ± 0.35 ⁸⁻¹¹	—	—	32.44 ± 0.57 ⁸⁻¹¹
	S4	3.22 ± 0.03 ⁵	3.39 ± 0.07 ⁴⁻⁵	4.44 ± 0.07 ⁴⁻⁵	1.53 ± 0.01 ¹⁵⁻¹⁶	—	—	—	17.67 ± 0.77 ⁸⁻¹⁰	—	—	30.25 ± 0.83 ⁹⁻¹¹
	S5	1.98 ± 0.10 ⁹⁻¹⁰	2.62 ± 0.06 ⁷	4.58 ± 0.11 ⁴	2.39 ± 0.07 ¹²⁻¹³	—	—	—	21.74 ± 0.65 ⁸⁻⁹	—	—	33.32 ± 0.84 ⁸⁻¹¹
广薯79	S1	0.31 ± 0 ¹⁸	0.83 ± 0.1 ¹⁷⁻¹⁹	4.97 ± 0.14 ³	1.55 ± 0.16 ¹⁵⁻¹⁶	0.53 ± 0.04 ³	3.2 ± 0.21 ¹⁻²	0.51 ± 0.03 ⁴	74.50 ± 2.09 ⁶	—	0 ± 0 ⁹	88.88 ± 2.27 ⁶
	S2	4.9 ± 0.45 ²	3.95 ± 0.08 ³	5.31 ± 0.21 ²	7.32 ± 0.4 ³	0.79 ± 0.03 ¹	1.93 ± 0.08 ⁴	0.75 ± 0.02 ³	133.21 ± 6.07 ⁴	—	0.46 ± 0.04 ⁶⁻⁷	164.05 ± 7.72 ⁴
	S3	2.65 ± 0.03 ⁶⁻⁷	1.58 ± 0.11 ¹²⁻¹³	3.2 ± 0.08 ⁷	2.46 ± 0.19 ¹¹⁻¹³	0 ± 0 ⁶	0 ± 0 ⁸	0.67 ± 0.03 ³⁻⁴	135.76 ± 0.82 ⁴	—	0.17 ± 0 ⁸	150.68 ± 1.28 ⁴
	S4	4.11 ± 0.05 ³	2.17 ± 0.08 ⁹	4.3 ± 0.36 ⁵	2.93 ± 0.13 ¹⁰	0.34 ± 0.02 ⁴	0 ± 0 ⁸	0.75 ± 0.01 ³	83.59 ± 2.88 ⁶	—	0 ± 0 ⁹	100.67 ± 2.84 ⁶
	S5	0.91 ± 0.01 ¹⁴⁻¹⁵	0.99 ± 0.09 ¹⁶⁻¹⁷	1.93 ± 0.14 ¹⁰⁻¹¹	0 ± 0 ¹⁸	0 ± 0 ⁶	2.45 ± 0.06 ³	0.19 ± 0.03 ⁵	118.26 ± 5.6 ⁵	—	0 ± 0 ⁹	126.86 ± 5.76 ⁵
普薯32号	S1	4.67 ± 0.18 ²	3.54 ± 0.25 ⁴	3.85 ± 0.19 ⁶	11.6 ± 0.55 ¹	0.66 ± 0.05 ²	0.65 ± 0.03 ⁶	1.94 ± 0.17 ²	158.08 ± 0.31 ³	0 ± 0 ⁴	0.49 ± 0.01 ⁵⁻⁶	192.35 ± 1.70 ³
	S2	4.05 ± 0.38 ³	1.89 ± 0.11 ¹⁰	2.57 ± 0.19 ⁸	5.16 ± 0.05 ⁷	0 ± 0 ⁶	0 ± 0 ⁸	3.46 ± 0.24 ¹	229.63 ± 18.38 ²	0.39 ± 0.12 ²	0.74 ± 0.07 ³	254.51 ± 18.54 ²
	S3	3.67 ± 0.28 ⁴	1.24 ± 0.20 ¹⁴⁻¹⁵	0.76 ± 0.06 ¹⁸	3.33 ± 0.51 ⁹	0 ± 0 ⁶	0 ± 0 ⁸	3.36 ± 0.69 ¹	274.30 ± 43.35 ¹	0.65 ± 0.24 ¹	0.63 ± 0.15 ⁴	295.34 ± 46.55 ¹
	S4	3.43 ± 0.09 ⁴⁻⁵	0.83 ± 0.06 ¹⁷⁻¹⁹	1.04 ± 0.01 ¹⁶⁻¹⁷	2.64 ± 0.05 ¹⁰⁻¹²	0 ± 0 ⁶	0 ± 0 ⁸	1.97 ± 0.07 ²	282.26 ± 11.99 ¹	0.22 ± 0.01 ³	0.56 ± 0.04 ⁴⁻⁵	299.07 ± 12.33 ¹
	S5	0.54 ± 0.04 ¹⁷⁻¹⁸	1.15 ± 0.11 ¹⁵⁻¹⁶	2.17 ± 0.18 ⁹⁻¹⁰	0 ± 0 ¹⁸	0 ± 0 ⁶	0 ± 0 ⁸	0 ± 0 ⁵	82.87 ± 5.60 ⁶	0 ± 0 ⁴	0 ± 0 ⁹	88.22 ± 6.70 ⁶

注：肩标不同数字表示同一类胡萝卜素单体所有品种 S1-S5 时期类胡萝卜素含量差异显著 ($P < 0.05$)。

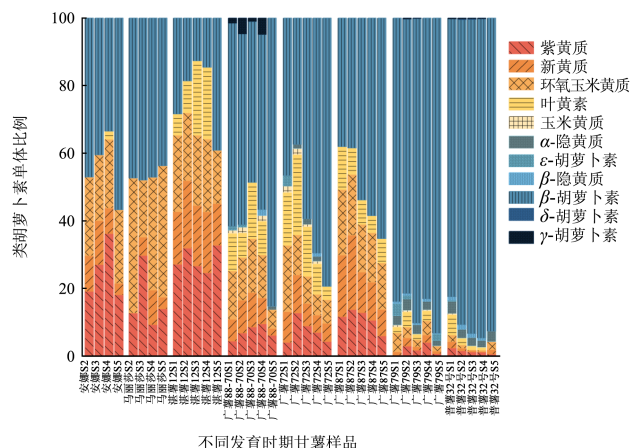


图 2 8 个甘薯品种不同发育时期类胡萝卜素单体比例图

Fig.2 The proportion of carotenoid monomer in 8 sweet potato varieties at different development stages

2.4 类胡萝卜素单体定量分析

β -胡萝卜素是甘薯中的主要的类胡萝卜素，本研究的黄肉、橘黄肉、橘红肉甘薯中， β -胡萝卜素含量在类胡萝卜素含量中的占比分别为 12.62%~56.69%、37.36%~85.26%、81.20%~94.38%。 β -胡萝卜素在不同品种中对发育时期的反应不同（表 2），其中黄肉甘薯中 β -胡萝卜素含量受发育时期的影响较小；广薯 88-70 和广薯 79 随发育时期的推进， β -胡萝卜素含量呈现升高-降低-升高的趋势，S5 时期 β -胡萝卜素含量高于 S4 时期；广薯 72 和普薯 32 号 β -胡萝卜素含量对发育时期的反应相同，其含量先上升，在 S4 时期达到顶峰，随后下降，下降率分别为 38.70% 和 70.64%，二者的 β -胡萝卜素含量下降较多，可能其合成被阻，也可能被分解，这需进一步研究。广薯 87 中 β -胡萝卜素含量随发育时期的推进稳定上升，S3 时期增长最快，S5 时期含量最高。

环氧玉米黄质是存在于所有品种所有发育时期且含量较高的一种单体。在橘黄肉、橘红肉甘薯中含量较高，但其占类胡萝卜素总含量的比值在黄肉甘薯中最高，其占比范围为 15.81%~39.95%；在橘黄肉和橘红肉甘薯中其占比分别为 5.56%~19.56% 和 0.26%~2.46%。如表 2 所示，环氧玉米黄质含量在不同品种、在不同发育时期存在显著差异，广薯 72 和广薯 87 为环氧玉米黄质的优势品种，其含量整体上远高于其他品种。

紫黄质是甘薯中类胡萝卜素的重要组成部分之一，紫黄质含量在不同薯肉色系间差异不显著，与薯肉颜色相关性不大。不同品种甘薯中紫黄质含量对发育时期的反应分为两种，普薯 32 号紫黄质含量为 S1 时期最高，之后持续下降，在 S5 时期含量最低，较上一时期

下降 88.26%；其他品种紫黄质含量在发育中期远高于 S1、S5 时期。

新黄质也是甘薯中类胡萝卜素的重要组成部分之一，橘黄肉甘薯中新黄质含量整体最高，黄肉甘薯新黄质含量最低，但在黄肉甘薯和橘黄肉甘薯中的新黄质在类胡萝卜素中具有较高的占比。甘薯中新黄质含量峰值出现在前中期阶段，整体上 S5 时期含量低于 S1 时期，在发育时期差异显著。

环氧玉米黄质、紫黄质、新黄质的含量在橘黄肉甘薯中高于橘红肉甘薯及黄肉甘薯，且存在较为稳定。上述 3 种单体为含氧官能团的类胡萝卜素，张小明等^[21]的结论中提出，当 β -胡萝卜素环氧化物或 β -玉米黄质环氧化物大量积累时，甘薯块根呈黄色，这可能与两类甘薯橙黄色有关。

叶黄素主要存在于橘黄肉和橘红肉甘薯中，其中以广薯 72 含量较高，其他品种叶黄素含量相当。随发育时期的推进，叶黄素含量先升高之后降低，至 S5 时期仅剩广薯 72 和广薯 87 能检测到叶黄素。

α -隐黄质、 β -隐黄质主要存在于橘红肉甘薯中，随甘薯的生长发育，其含量前期上升，后期下降，时期存在显著差异， α -隐黄质含量高于。结果显示，广薯 79 中 β -隐黄质含量在 S5 时期极低，普薯 32 号 S5 时期未能检测到 β -隐黄质的存在。贾瑞雪等研究中，广薯 87、普薯 32 号中 β -隐黄质的分别为 35.90、139.00 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，与本研究存在明显差异^[23]，这可能与样品种植季节和土壤环境等因素有关。

玉米黄质、 ϵ -胡萝卜素、 δ -胡萝卜素、 γ -胡萝卜素仅在部分甘薯的某一或某几个发育时期检测到，且在 S5 均未能检测到。因此在进行功能甘薯育种时，可以不考虑这 5 项指标。普薯 32 和广薯 79 中 α -隐黄质含量较高，在进行功能育种或特殊品种选择时可以考虑，但注意适当早收获。考虑类胡萝卜素和各单体含量，在产量影响较小情况下，尽量提早收获甘薯。

2.5 甘薯类胡萝卜素单体与颜色的相关性

许多花、果实、种子和根呈现出黄色、橙色到红色等不同颜色主要是由类胡萝卜素的含量、组分和比例决定的^[28,29]。将甘薯中类胡萝卜素与其颜色特征值进行相关性分析，如图 3 所示，亮度 (L^*)、色度角 (H^*) 与类胡萝卜素总量和各单体呈负相关，红度 (a^*)、黄度 (b^*) 和色彩饱和度 (C^*) 整体与类胡萝卜素呈正相关，其中类胡萝卜素总量、 β -胡萝卜素、 α -隐黄质、 β -隐黄质与 L^* 、 H^* 呈极显著负相关，与 a^* 、 C^* 具有极显著正相关性； δ -胡萝卜素与 L^* 、 H^* 呈显著负相关，与 a^* 、 C^* 呈显著正相关；新黄质与 b^* 呈

极显著正相关，与 C^* 具有正相关性，紫黄质与 a^* 、 b^* 、 C^* 呈显著正相关或正相关，与 H^* 具有负相关性。在检测出的类胡萝卜素单体中，多数单体与甘薯薯肉颜色具有相关性。 β -胡萝卜素在所有品种中均占有较高的占比，且与类胡萝卜素总量和甘薯颜色特征值具有极显著相关性。廖明欢等^[30]认为环氧或带羟基基团的类胡萝卜素在黄肉甘薯中居多，而 β -胡萝卜素在橘红色肉质甘薯中占据着主导地位，这就是甘薯薯肉之所以显示黄色肉质或橘红色肉质的原因。余华等^[31]对不同甘薯品种中的 β -胡萝卜素进行了比较分析，发现胡萝卜素含量与甘薯肉色有密切关系，橘红肉甘薯中 β -胡萝卜素的含量远高于黄肉甘薯。章园等^[32]认为 α -隐黄质和 β -隐黄质含量均与 a^* 、 C^* 值成极显著或显著正相关，与 H^* 值成负相关或显著负相关，符合上文数据中颜色特征值相关性结果（图 3）。有色类胡萝卜素组分及含量越多， a^* 、 b^* 、 C^* 值越大、 H^* 、 L^* 则越小，甘薯薯肉颜色亮度降低，甘薯的颜色由黄色逐渐向橘红色转变，颜色性状越明显（见图 1 广薯 79 与普薯 32 号）。Islam 等^[27]、Alam 等^[33]研究结果也证实，随着果肉颜色的加深，类胡萝卜素的含量也逐步提高。

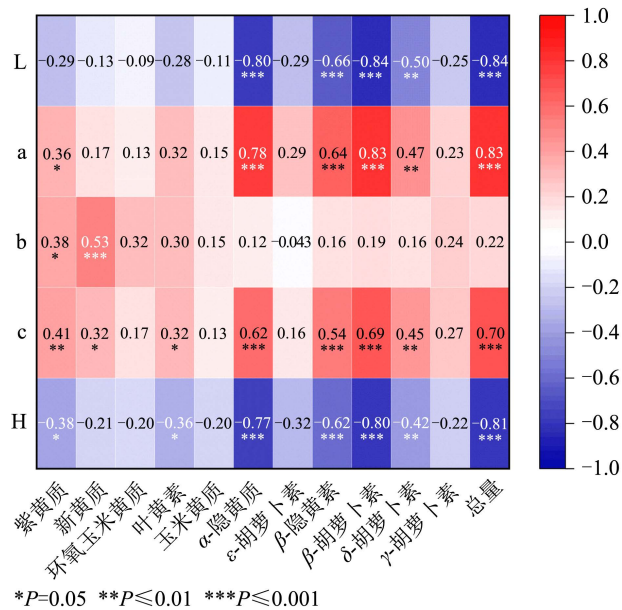


图 3 类胡萝卜素与颜色特征值进行相关性分析热图

Fig.3 Heat map of correlation analysis between carotenoids and color characteristic values

3 结论

甘薯发育期间类胡萝卜素组分及含量呈动态变化，甘薯中类胡萝卜素总含量和大部分单体含量在移栽后 165 d 明显下降，甘薯在此过程中经历了越冬低温，低温不利于甘薯类胡萝卜素的积累。 β -胡萝卜素为甘薯中最主要的类胡萝卜素单体。广薯 72 和广薯 87 为环

氧玉米黄质的优势品种。普薯 32 和广薯 79 中 α -隐黄质含量较高，在进行功能育种或特殊品种选择时可以考虑，但注意适当早收获。考虑类胡萝卜素和各单体含量，在产量影响较小情况下，尽量提早收获甘薯。

研究从多个品种的不同发育时期对甘薯类胡萝卜素组分及含量进行比较分析，阐明类胡萝卜素各组分在不同品种甘薯的分布情况，探究了甘薯中类胡萝卜素在发育过程中的积累规律，把握甘薯类胡萝卜素发育关键时期，是提取类胡萝卜素的重要影响因素，发育关键期的研究为高类胡萝卜素或特定类胡萝卜素甘薯的选育提供理论支撑。

参考文献

[1] 赵冬兰,赵凌霄,刘洋,等.基于RNA-seq的甘薯芽变株系类胡萝卜素基因代谢差异分析[J].作物学报,2023,49(12):3239-3249.

[2] WANG L, LIU Z, JIANG H, et al. Biotechnology advances in β -carotene production by microorganisms [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 322-332.

[3] CHENG J R, EMILIO B, BAXTER M, et al. The role of beta-carotene in colonic inflammation and intestinal barrier integrity [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 723480.

[4] 胡红莲,李超,陈利青,等. β -胡萝卜素对奶牛泌乳高峰期产乳性能及血常规指标、血清生化和免疫指标的影响[J].中国畜牧兽医,2023,50(4):1375-1384.

[5] IVAN P, JOHANA C, ASMA`A A, et al. β -carotene accelerates the resolution of atherosclerosis in mice [J]. Bio-archive, 2024, 12: 87430.

[6] DIANA M A, MARIA L B, MARIA C C, et al. The effect of beta-carotene on cognitive function: a systematic review [J]. Brain Sciences, 2023, 13(10): 1468.

[7] MARJORIE J H. The challenge to reach nutritional adequacy for vitamin A: β -carotene bioavailability and conversion-evidence in humans [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2012, 96(5): 1193S-1203S.

[8] NAOMICHI M, MARIE K, NOBUYOSHI K. Clinical effects of dietary supplementation of lutein with high bio-accessibility on macular pigment optical density and contrast sensitivity: a randomized double-blind placebo-controlled parallel-group comparison trial [J]. Nutrients, 2020, 12(10): 2966.

[9] YU J A, HYEYOUNG K. Lutein as a modulator of oxidative stress-mediated inflammatory diseases [J]. Antioxidants (Basel), 2021, 10(9): 1448.

[10] 张修全. α -胡萝卜素对人神经母细胞瘤细胞株GOTO增殖的影响[J].国外医学(卫生学分册),1990,(6):369.

[11] 范志红.神奇的 α -胡萝卜素[J].环境与生活,2010,(Z1):106.

[12] 张雪松,曹梦锦,王晓婧,等.部分市售植物性食物中 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素含量分析[J].营养学报,2019,41(2):193-203.

[13] 何静娟,范燕萍.观赏植物花色相关的类胡萝卜素组成及代谢调控研究进展[J].园艺学报,2022,49:1162-1172.

[14] JENNIFER B, PAUL D. F, PETER M. B. Identification and quantification of carotenoids, tocopherols and chlorophylls in commonly consumed fruits and vegetables [J]. Phytochemistry,

- 2003, 62(6): 939-947.
- [15] 贾瑞雪,陈伊航,张荣,等.超高效液相色谱法同时测定甘薯中13种类胡萝卜素的含量[J].作物学报,2023,49(8):2259-2274.
- [16] ROCIO Q, CLAUDIA S. Carotenoid biosynthesis and plastid development in plants: the role of light [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(3): 1184.
- [17] 王曼曼,薛舒丹,吴廷全,等.光照和温度调控对番茄果实中类胡萝卜素合成的影响[J].分子植物育种,2020,18(18):6158-6164.
- [18] SUN Q, HE Z C, WEI R R, et al. Transcription factor CsTT8 promotes fruit coloration by positively regulating the methylerythritol 4-phosphate pathway and carotenoid biosynthesis pathway in citrus (*Citrus* spp.) [J]. Horticulture Research, 2023, 10(11): uhad199.
- [19] REN S Y, YUAN Y, HSIHUA W, et al. G2-LIKE CAROTENOID REGULATOR (SIGCR) is a positive regulator of lutein biosynthesis in tomato [J]. aBIOTECH, 2022, 3(4): 267-280.
- [20] 陆国权,黄华宏,何腾弟.甘薯维生素C和胡萝卜素含量的基因型、环境及基因型与环境互作效应的分析[J].中国农业科学,2002,35(5):482-486.
- [21] 张小明,牟德华,张松树,等.甘薯中 β -胡萝卜素在膨大期的变化规律[J].江苏农业科学,2012,40(8):303-305.
- [22] EZELL B D, WILCOX M S, CROWDER J N. Pre- and post-harvest changes in carotene, total carotenoids and ascorbic acid content of sweetpotatoes [J]. Plant Physiology, 1952, 27(2): 355-369.
- [23] JIA R X, ZHANG R, GANGURDE S S, et al. Integrated analysis of carotenoid metabolites and transcriptome identifies key genes controlling carotenoid compositions and content in sweetpotato tuberous roots (*Ipomoea batatas* L.) [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 993682.
- [24] ROBERTSON G, MAHONEY N, GOODMAN N, et al. Regulation of lycopene formation in cell suspension culture of VFNT tomato (*Lycopersicon esculentum*) by CPTA, growth regulators, sucrose, and temperature [J]. Journal of Experimental Botany, 1995, 46: 667-673.
- [25] 贾瑞雪.甘薯类胡萝卜素组分鉴定及关键基因筛选[D].秦皇岛:河北科技师范学院,2023.
- [26] YAO Y Q, ZHANG R, JIA R X, et al. Impact of different cooking methods on the chemical profile of orange-fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) [J]. LWT, 2023, 173: 114288.
- [27] ISLAM S N, NUSRAT T, BEGUM P, et al. Carotenoids and β -carotene in orange fleshed sweet potato: a possible solution to vitamin A deficiency [J]. Food Chemistry, 2016, 199: 628-631.
- [28] XU X Y, LU X N, TANG Z L, et al. Combined analysis of carotenoid metabolites and the transcriptome to reveal the molecular mechanism underlying fruit colouration in zucchini (*Cucurbita pepo* L.) [J]. Food Chemistry: Molecular Sciences, 2021, 2: 100021.
- [29] ZHOU W Q, NIU Y Y, DING X, et al. Analysis of carotenoid content and diversity in apricots (*Prunus armeniaca* L.) grown in China [J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127223.
- [30] 廖明欢,周珊,房伯平,等.甘薯活性成分及其功能研究进展[J].热带农业工程,2018,42(3):15-21.
- [31] 余华,宋永康,姚清华,等.不同肉色甘薯营养成分分析[J].福建农业学报,2010,25(4):482-485.
- [32] 章园,宋江峰,何美娟,等.黄玉米籽粒发育过程中类胡萝卜素与色泽的变化[J].食品科学,2015,36(19):77-82.
- [33] ALAM M K, RANA Z H, ISLAM S N, et al. Comparison of the proximate composition, total carotenoids and total polyphenol content of nine orange-fleshed sweet potato varieties grown in Bangladesh [J]. Foods, 2016, 5(3): 64.