

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241203001

引用格式: 周锋杰, 夏钰, 张艳海. 在线固相萃取-液相色谱法测定食品中 4 种类胡萝卜素含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 209-214.

ZHOU FJ, XIA Y, ZHANG YH. Determination of 4 kinds of carotenoids in foodstuffs by online solid phase extraction-liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 209-214. (in Chinese with English abstract).

在线固相萃取-液相色谱法测定食品中 4 种类胡萝卜素含量

周锋杰¹, 夏钰², 张艳海^{2*}

[1. 苏州市农产品质量安全监测中心, 苏州 215104; 2. 纳谱分析技术(苏州)有限公司, 苏州 215000]

摘要: 目的 建立在线固相萃取-液相色谱法(online solid phase extraction-liquid chromatography, online SPE-LC)同时测定婴幼儿配方乳粉和天然食品中叶黄素、玉米黄质、 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素含量的方法。

方法 样品采用浓度为 50%氢氧化钾溶液在 70 °C 下皂化 15 min, 皂化液以 70%乙醇定容, 高速离心后取上清液直接上机分析。选择聚苯乙烯-二乙烯基苯基质的 SelectCore PSS 色谱柱作为 online SPE 柱, 采用 80%甲醇-水作为初始上样溶剂, 乙腈/甲基叔丁基醚作为清洗溶剂。采用 ChromCore C₃₀ (4.6 mm×250 mm, 3 μ m) 作为分析柱, 乙腈-甲醇(26:74, V:V, 含 0.4 g/L 抗坏血酸)与甲基叔丁基醚作为流动相, 梯度洗脱, 流速为 1.0 mL/min, 检测波长为 450 nm。**结果** 婴幼儿配方乳粉和天然食品中 4 个目标物分离良好, 所有目标物的线性相关系数 $r > 0.9999$, 叶黄素、玉米黄质及 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素的方法定量限分别为 0.77、0.72、0.94、1.40 μ g/100 g, 婴幼儿配方乳粉基质加标平均回收率分别为 99.76%、103.51%、99.16%和 97.92%; 方法重复性的相对标准偏差小于 2.5%。**结论** 该方法快速、可靠及重复性良好, 可满足食品中叶黄素、玉米黄质和 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素的定量要求, 可被应用于实际样品的检测中。

关键词: 胡萝卜素; 叶黄素; 玉米黄质; 婴幼儿配方乳粉; 天然食品; 在线固相萃取-液相色谱法

Determination of 4 kinds of carotenoids in foodstuffs by online solid phase extraction-liquid chromatography

ZHOU Feng-Jie¹, XIA-Yu², ZHANG Yan-Hai^{2*}

[1. Suzhou Agricultural Products Safety and Quality Inspection Center, Suzhou 215104, China;
2. NanoChrom Analytical Technology (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215000, China]

ABSTRACT: Objective To develop a method for the simultaneous determination of lutein, zeaxanthin, α -carotene, and β -carotene in infant formula milk powder and natural foods by online solid phase extraction-liquid chromatography (online SPE-LC). **Methods** Samples were saponified with 50% potassium hydroxide solution at 70 °C for 15 min. Saponified solution was diluted with 70% ethanol, and after high-speed centrifugation, the

收稿日期: 2024-12-03

第一作者: 周锋杰(1987—), 男, 硕士, 高级农艺师, 主要研究方向为农产品质量安全与营养品质。E-mail: 369629176@qq.com

*通信作者: 张艳海(1980—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为中药活性成分和质量标准。E-mail: yanhai0715@gmail.com

supernatant was directly analyzed. A styrene-divinylbenzene copolymer-based SelectCore PSS-packed chromatographic column was chosen as the online SPE column, using 80% methanol-water as the initial loading solvent and acetonitrile/methyl tert-butyl ether as the washing solvent. A ChromCore C₃₀ column (4.6 mm×250 mm, 3 μm) was used as the analytical column, with acetonitrile-methanol (26:74, V:V, 0.4 g/L of ascorbic acid) and methyl tert-butyl ether as the mobile phase for gradient elution. The flow rate was 1.0 mL/min, and the detection wavelength was 450 nm. **Results** The 4 target analytes in infant formula milk powder and natural foods were well separated. Linear correlation coefficients for all target analytes were greater than 0.9999. The limit of quantification of method for lutein, zeaxanthin, α -carotene, and β -carotene were 0.77, 0.72, 0.94, and 1.40 μg/100 g, respectively. Average recovery rates of infant formula milk powder were 99.76%, 103.51%, 99.16%, and 97.92%, respectively. The relative standard deviations of method repeatability for all the analytes were less than 2.5%. **Conclusion** This method is accurate, reliable, and reproducible and can meet the quantitative requirements of lutein, zeaxanthin, and α -carotene, β -carotene in foodstuffs. It can be applied to the determination of real samples.

KEY WORDS: carotene; lutein; zeaxanthin; infant formula milk powder; natural food; online solid phase extraction-liquid chromatography

0 引言

类胡萝卜素是一类具有着色力的脂溶性化合物^[1-6], 广泛用于食品工业中, 也作为维生素 A 前体的食品强化成分, 同时具有增强免疫力、降低患退行性疾病的风险及抗氧化特性等生物功能^[7-12]。人体自身不能合成类胡萝卜素, 因此, 叶黄素、玉米黄质和胡萝卜素作为多功能营养素, 被广泛添加到婴幼儿配方食品和成人营养品中^[13-17]。

液相色谱法是测定植物组织^[18-19]、天然食品^[20-21]、配方食品^[22-23]和保健食品^[24-25]等基质样品中类胡萝卜素的主要方法。食品中叶黄素和胡萝卜素的测定目前主要参考 GB 5009.248—2016《食品安全国家标准 食品中叶黄素的测定》和 GB 5009.83—2016《食品安全国家标准 食品中胡萝卜素的测定》, 其中样品溶液制备通常需要经过氢氧化钾的皂化和有机溶剂的液-液萃取过程, 碱皂化可以有效的将目标分析物从基质中释放出来, 再采用液-液萃取和净化后, 上机分析。不仅会消耗大量有机试剂, 且由于叶黄素和胡萝卜素对光热敏感, 样品制备步骤越多、流程越长对目标物的准确测定影响越大, 且影响整个方法的分析效率^[26]。与传统离线样品前处理相比, 在线样品前处理可以将样品制备与分析过程在密闭系统中自动完成, 即可提升样品分析效率, 又可减少人工操作而导致的损失和误差, 改善方法灵敏度、准确性和重现性^[27], 在食品中营养素和兽药残留分析中都有广泛应用^[28-33]。

本研究采用在线固相萃取-液相色谱法(online solid phase extraction-liquid chromatography, online SPE-LC)的分析技术, 样品皂化液直接上机分析, 自动完成样品富集、净化和分析的全过程, 同时实现叶黄素、玉米黄质、 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素的测定, 为开展相关配方食品中目标物的快速高通量检测提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 仪器、试剂与材料

BSA124S 万分之一分析天平[赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]; Agilent 1260 Infinity II 液相色谱系统[包括 2 台四元泵(G7111A)、自动进样器(G7129B)、柱温箱(G7116B)、阀切换单元(G1170A, 含一个二位六通阀头)、二极管阵列检测器(G7117A)、软件采用 Agilent OpenLab CDS 软件(版本 2.6), 美国安捷伦科技公司]; SelectCore PSS online SPE 柱(3.0 mm×30 mm, 40 μm)、ChromCore C₃₀ (4.6 mm×250 mm, 3 μm)[纳谱分析技术(苏州)有限公司]。

乙腈、甲醇(色谱纯, 美国 Avantor J.T.Baker 公司); 甲基叔丁基醚(methyl tertiary butyl ether, MTBE)[色谱纯, 阿拉丁试剂(上海)有限公司]; 抗坏血酸、2,6-二叔丁基对甲酚(butylated hydroxytoluene, BHT)、氢氧化钾、乙醇(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

6 种品牌的婴幼儿配方乳粉均购于超市, 其中 5 种营养成分表中含叶黄素; 玉米、胡萝卜、西红柿、菠菜、西兰花、猕猴桃和芒果等蔬菜、水果随机采购于当地的菜市场。

1.2 实验方法

1.2.1 标准品溶液配制

精密称取叶黄素和玉米黄质标准品适量, 加 0.1% (*m:m*) BHT 的乙醇溶液溶解并定容到 100 mL 棕色容量瓶中, 制成质量浓度均为 0.5 mg/mL 的储备溶液; 再精密称取 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素适量, 加 0.1% (*m:m*) BHT 的二氯甲烷溶液溶解并定容到 100 mL, 制成质量浓度分别为 0.518 mg/mL 和 0.530 mg/mL 的储备溶液。使用前按照标准 GB 5009.248—2016 与 GB 5009.83—2016 附录对标准品溶液浓度进行校正。再精密移取各储备液适量, 加 0.1%

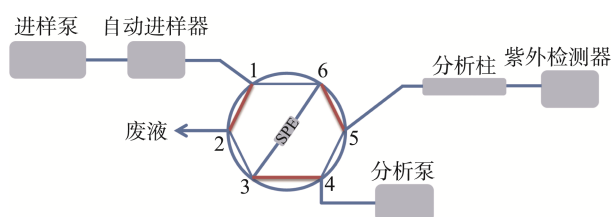
(*m:m*) BHT 的乙醇溶液稀释 10 倍,制成中间液;再移取中间液,加甲醇稀释制成叶黄素、玉米黄质、 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素质量浓度分别为 2.0680、1.3600、5.4720 和 2.8926 $\mu\text{g/mL}$ 的混合标准品溶液(校正后质量浓度)。

1.2.2 样品前处理

取样品(蔬果需提前粉碎均质)2~5 g,精密称定,置 50 mL 棕色离心管中,加入 5 mL 抗坏血酸水溶液(0.2 g/mL),使样品溶解,再加入 15 mL BHT-乙醇溶液(0.2 g/100 mL),涡旋混匀 30 s,加入 5 mL 质量浓度为 50% 的氢氧化钾溶液,涡旋混匀后,置 70 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中皂化 15 min,迅速冷却后,加 70% 乙醇,定容至 50 mL,以 5000 r/min 离心 5 min,取上清液,过 0.22 μm 尼龙膜后,上机分析,进样体积 50~100 μL 。

1.2.3 色谱条件

全自动 online SPE-LC 系统见图 1 所示,初始位置 1~6。其中二位置六通阀的具体切换时间:0.0~4.5 min,1~6;4.5~6.5 min,1~2;6.5~40.0 min,1~6。



注:1~6. 上样净化过程;1~2. 目标物转移过程。

图 1 online SPE-LC 系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of online SPE-LC system

online SPE 柱为 SelectCore PSS (30 mm \times 3.0 mm, 40 μm),其中流动相 A 为水,流动相 B 为乙腈,流动相 C 为甲醇,流动相 D 为 MTBE,梯度过程见表 1,流速为 1.0 mL/min。分析色谱柱为 ChromCore C₃₀ (4.6 mm \times 250 mm, 3.0 μm),流动相 A 为乙腈,流动相 B 为乙腈-甲醇(26:74, *V:V*, 含 0.4 g/L 抗坏血酸),流动相 C 为 MTBE;梯度洗脱:0~6.5 min, A:B=25:75 (*V:V*); 6.5~7.0 min, 100% B; 7.0~32 min,

表 1 SPE 泵梯度程序

Table 1 Gradient program of SPE pump

时间/min	流动相 A/%	流动相 B/%	流动相 C/%	流动相 D/%
0	20	0	80	0
4.5	20	0	80	0
5.0	0	100	0	0
15.0	0	100	0	0
16.0	0	80	0	20
21.0	0	80	0	20
25.0	0	100	0	0
30.0	20	0	80	0
40.0	20	0	80	0

100%~64% B, 0%~36% C; 32~35 min, 64%~20% B, 36%~80% C; 35~40 min, B:C=20:80 (*V:V*); 流速, 1.0 mL/min; 柱温为 25 $^{\circ}\text{C}$, 紫外检测波长为 450 nm, 采集频率 10 Hz; 进样体积为 50~100 μL 。

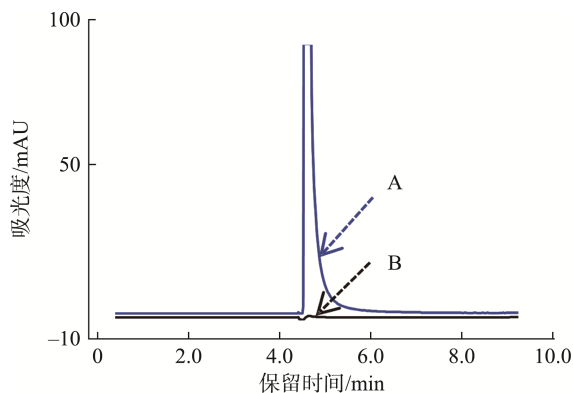
1.3 数据处理

色谱数据的采集和数据处理采用 Agilent OpenLab CDS 2.5 软件,标准曲线、重复性等采用 Excel 2010 进行数据统计分析。

2 结果与讨论

2.1 在线固相萃取条件考察

样品皂化溶液中通常含有强碱、水溶性蛋白多糖、水溶性的基质小分子、脂肪酸钠盐及包含目标待测物在内的脂溶性成分。因此本研究根据目标物的理化特征及皂化基质成分组成,选择了聚合物基质的 SelectCore PSS 填料作为 online SPE 柱。洗脱转移条件是影响 online SPE 过程及回收率的主要因素,因此为确认目标物的 SPE 转移时间,采用质量浓度为 21.2 $\mu\text{g/mL}$ 的 β -胡萝卜素标准品溶液,进样 10 μL ,在上样和除杂洗脱过程结束后,在 4.5 min 切换至 1~2,采用分析泵初始流动相比(A:B=75:25, *V:V*)转移目标物,结果由图 2 所示,目标物在 2 min 内可基本转移完全,依此确认了转移时间为 2 min。



注:A. 胡萝卜素标准品溶液;B. 空白溶剂。

图 2 目标待测物的 online SPE 洗脱谱图

Fig.2 Online SPE elution profile of the target analyte

2.2 皂化条件确认

为确认皂化时间和温度,实验分别参考 GB 5009.248—2016、GB5009.83—2016 及文献[27~29],采用婴幼儿配方乳粉(含叶黄素)作为样品基质,考察皂化温度和时间对目标物提取过程的影响。皂化温度分别对比室温、53 $^{\circ}\text{C}$ 和 70 $^{\circ}\text{C}$,皂化时间分别考察了 15、30 和 45 min。结果表明不同皂化温度对婴幼儿配方乳粉样品中叶黄素的含量影响不大,在 70 $^{\circ}\text{C}$ 下叶黄素的提取率略高;皂化温度对样品中胡萝卜素的影响较大,其中 53 $^{\circ}\text{C}$ 和 70 $^{\circ}\text{C}$ 显著高于

室温, 53 °C较 70 °C略高; 在 70 °C的皂化温度下, 对比不同皂化时间对叶黄素和 β -胡萝卜素提取效果的影响, 结果随着皂化时间增加, 叶黄素和胡萝卜素的含量显著下降, 因此皂化 15 min 较为适宜。从目标物提取率和时间的整体上考虑, 最终选择皂化温度为 70 °C和皂化时间 15 min。

2.3 方法学考察

2.3.1 线性关系及定量限考察

取混合标准品溶液分别进样 1、2、5、10、20 和 50 μL ,

以目标峰的峰面积响应为纵坐标(Y), 以进样量为横坐标(X, ng), 考察线性相关关系, 结果所有目标待测物的相关系数 $r^2 > 0.9999$, 表明各化合物的线性相关关系较好(表 2)。按照信噪比(S/N)为 10:1 计算, 叶黄素、玉米黄质、 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素的仪器定量限分别为 0.0153、0.0144、0.0189 和 0.0281 ng。按照取样量 2 g, 定容体积 50 mL, 进样体积 50 μL 计算定量限, 叶黄素、玉米黄质、 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素的方法定量限分别为 0.77、0.72、0.94 和 1.40 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 。

表 2 线性关系及定量限考察结果

Table 2 Investigation results of linear relationship and limit of quantification

待测物	保留时间/min	相关系数(r^2)	线性方程	定量限/ng	范围/ng
叶黄素	15.7540	0.99997	$Y=0.4959X-0.0054$	0.0153	0.4136~103.4000
玉米黄质	16.5780	0.99996	$Y=0.3249X-0.0052$	0.0144	0.2720~68.0000
α -胡萝卜素	32.7610	0.99995	$Y=1.3340X-0.0420$	0.0189	1.0944~273.6000
β -胡萝卜素	34.3790	0.99993	$Y=0.5350X-0.0389$	0.0281	0.5785~144.6300

2.3.2 重复性试验

取某品牌的婴幼儿配方奶粉 5 份, 每份 2 g, 精密称定, 按照确定的皂化方法制备上机溶液, 结果叶黄素含量的相对标准偏差(relative standard deviation, RSD) $<2\%$; 玉米黄质和 β -胡萝卜素含量的 RSD $<2.5\%$, 表明方法重复性较好。

2.3.3 加样回收率试验

取婴幼儿配方乳粉, 每份 2 g, 精密称定, 按照低、中、高 3 水平分别加入混合标准品, 每个加标水平各制备 5 份平行样品, 按照 1.2.2 中样品溶液制备方法制备样品溶液, 上机分析。测定加标样品中目标物的总量, 计算加标回收率。由见表 3 结果可见, 叶黄素、玉米黄质及 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素的平均回收率分别为 99.76%、103.51%、99.16% 和 97.92%, 表明该方法测定准确度良好, 满足样品中目标物定量要求。

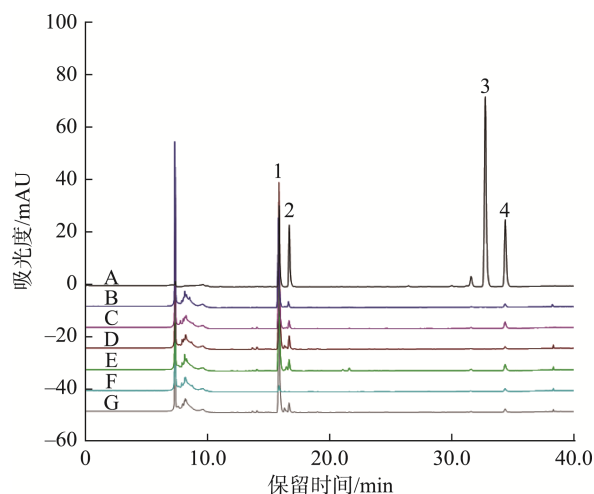
表 3 加标回收率测定结果($n=5$)

Table 3 Determination results of recovery rate with added standard ($n=5$)

待测物	加标浓度/ $(\mu\text{g}/100\text{g})$	平均回收率/%	RSDs/%
叶黄素	163.30	99.76	1.64
	244.95		
	326.60		
玉米黄质	82.70	103.51	1.53
	124.05		
	165.40		
α -胡萝卜素	172.70	99.16	1.75
	259.05		
	345.40		
β -胡萝卜素	176.70	97.92	1.64
	265.05		
	353.40		

2.4 样品测定

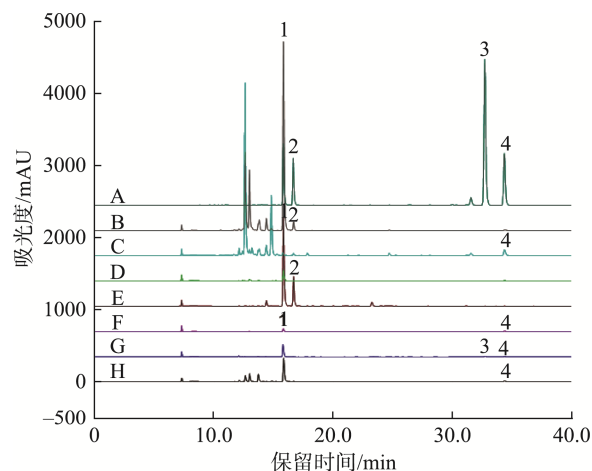
分别取不同品牌的婴幼儿配方乳粉按照 1.2.2 中样品制备方法, 制备上机溶液, 进行测定。由图 3 所示, 婴幼儿配方乳粉 B、C、D、E 和 G 中均含有叶黄素, 同时含有微量的玉米黄质及 β -胡萝卜素, 其中叶黄素、玉米黄质与其他叶黄素顺式异构体分离良好, 叶黄素与玉米黄质及 α -胡萝卜素与 β -胡萝卜素的分离度分别为 4.6 和 5.9。本研究还选取了西兰花、西红柿、玉米、猕猴桃、芒果和菠菜等蔬菜、水果, 对其中目标的类胡萝卜素成分进行分析, 结果由图 4 可见, 菠菜、玉米、西兰花和猕猴桃中叶黄素的含量较高, 胡萝卜、西红柿、芒果及西兰花中胡萝卜素的含量相对较高, 总体上, 各目标峰分离良好, 通过该方法可以对各目标待测物进行定量。



注: A. 混合标准品; B-G. 不同品牌婴幼儿配方乳粉样品。
1. 叶黄素; 2. 玉米黄质; 3. α -胡萝卜素; 4. β -胡萝卜素, 下同。

图 3 婴幼儿配方乳粉的色谱图

Fig.3 Chromatogram of infant formula milk powder



注: A. 混合标准品; B~G 分别为菠菜、芒果、猕猴桃、玉米、西红柿、胡萝卜和西兰花。

图4 蔬菜和水果的色谱图

Fig.4 Chromatogram of vegetables and fruits

2.5 与标准方法比较

现行食品中叶黄素和胡萝卜素测定分别参考 GB 5009.248—2016 和 GB 5009.83—2016 方法进行测定,二者样品前处理过程均需皂化和有机溶剂的液-液萃取过程,其中皂化时间均为 30 min,后续处理过程约为 30~40 min;分析条件均采用 C₃₀ 色谱柱进行分离分析,其中叶黄素和 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素的分析时间分别约为 28 min 和 30 min(加平衡时间)。本研究方法的皂化时间为 15 min,皂化液直接上机分析,同时测定目标物,上机的分析时间为 40 min,因此采用本研究方法的总分析时间较标准方法减少近 76%,显著提升了方法检测效率。且该方法无需有机溶剂(环己烷、乙醚、石油醚等),更绿色和环境友好。

3 结论

本研究采用 online SPE-LC 建立了婴幼儿配方乳粉和天然食品中叶黄素、玉米黄素和胡萝卜素的同时检测方法。通过对样品皂化条件和 online SPE 过程关键条件的考察,确定了优化的样品制备和净化及转移条件。系统的方法学考察结果表明该方法的线性相关性、精密度和平均回收率均能满足目标物的测定要求。采用实际的婴幼儿配方乳粉和蔬菜水果等天然食品进行分析,表明样品中各目标物分离良好,可对目标物实现准确定量。

本研究所构建的方法与标准方法比较,实现了从烦琐手动操作到高效自动化分析的转变,显著提升了分析效率和准确性,为科学研究和实际应用提供了强有力的技术支持。该方法也将为实现高通量、高灵敏度和高准确性的样品检测提供新的思路和解决方案。

参考文献

- [1] 孙新怡, 孙清瑞, 李秀波, 等. 类胡萝卜素异构化及其对生物活性和生物利用度影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 412-420. SUN XY, SUN QR, LI XB, *et al.* Research progress of carotenoid isomerization and its effects on biological activity and bioavailability [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 412-420.
- [2] SKIBSTED LH. Carotenoids in antioxidant networks. Colorants or radical scavengers [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(10): 2409-2417.
- [3] MAOKA T. Carotenoids as natural functional pigments [J]. Journal of Natural Medicines, 2020, 74(1): 1-16.
- [4] JING Y, GUO F, ZHANG S, *et al.* Recent advances on biological synthesis of lycopene by using industrial yeast [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60(9): 3485-3494.
- [5] ZAFAR J, AQEEL A, SHAH FI, *et al.* Biochemical and immunological implications of lutein and zeaxanthin [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(20): 10910.
- [6] MADHAVAN J, CHANDRASEKHARAN S, PRIYA MK, *et al.* Modulatory effect of carotenoid supplement constituting lutein and zeaxanthin (10:1) on anti-oxidant enzymes and macular pigments level in rats [J]. Pharmacognosy Magazine, 2018, 14(54): 268-274.
- [7] GRUDZINSKI W, PIET M, LUCHOWSKI R, *et al.* Different molecular organization of two carotenoids, lutein and zeaxanthin, in human colon epithelial cells and colon adenocarcinoma cells [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2018, 188: 57-63.
- [8] MUSSAGY CU, WINTERBURN J, SANTOS-EBINUMA VC, *et al.* Production and extraction of carotenoids produced by microorganisms [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103(3): 1095-1114.
- [9] DEMMING-ADAMS B, LOPEZ-POZO M, STEWART JJ, *et al.* Zeaxanthin and lutein: Photoprotectors, anti-inflammatories, and brain food [J]. Molecules, 2020, 25(16): 3607.
- [10] LOUGHMAN J, LOSKUTOVA E, BUTLER JS, *et al.* Macular pigment response to lutein, zeaxanthin, and meso-zeaxanthin supplementation in open-angle glaucoma: A randomized controlled trial [J]. Ophthalmology Science, 2021, 1(3): 100039.
- [11] 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.
- [12] MATA-GÓMEZ LC, MONTAÑEZ JC, MÉNDEZ-ZAVALA A, *et al.* Biotechnological production of carotenoids by yeasts: An overview [J]. Microbial Cell Factories, 2014, 13: 12.
- [13] EGGERSDORFER M, WYSS A. Carotenoids in human nutrition and health [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2018, 652: 18-26.
- [14] FANG N, WANG C, LIU X, *et al.* De novo synthesis of astaxanthin: From organisms to genes [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 92: 162-171.
- [15] HERNÁNDEZ-ALMANZA A, MONTANEZ J, MARTÍNEZ-ÁVILA G, *et al.* Lycopene: Progress in microbial production [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 56: 142-148.
- [16] GIORDANO E, QUADRO L. Lutein, zeaxanthin and mammalian development: Metabolism, functions and implications for health [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2018, 647: 33-40.
- [17] 郑梦媛, 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): 403-411. ZHENG MM, LI WY, LIU YW. Research progress on intestinal

- absorption and bioavailability of carotenoids [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(15): 403–411.
- [18] 张春秋, 刘杰, 谢开云, 等. 高效液相色谱法测定马铃薯薯肉中类胡萝卜素[J]. *食品科学*, 2008, 29(4): 302–305.
- ZHANG CQ, LIU J, XIE KY, *et al.* Determination of carotenoids in tuber flesh by HPLC in potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. *Journal of Food Science*, 2008, 29(4): 302–305.
- [19] 李文爽, 夏先春, 何中虎. 普通小麦类胡萝卜素组分的超高效液相色谱分离方法[J]. *作物学报*, 2016, 42(5): 706–713.
- LI WS, XIA XC, HE ZH. Ultra performance liquid chromatographic separation of carotenoid components in common wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(5): 706–713.
- [20] 王彬, 林亮, 陈敏氢, 等. 南瓜类胡萝卜素含量的超高效液相色谱分析[J]. *农学学报*, 2017, 7(12): 22–27.
- WANG B, LIN L, CHEN MD, *et al.* Ultra performance liquid chromatographic analysis of carotenoid content in pumpkin [J]. *Journal of Agriculture*, 2017, 7(12): 22–27.
- [21] 兰韬, 闫娜, 裴栋, 等. 高效液相色谱法测定鸡蛋、鸡肉中五种类胡萝卜素物质[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(20): 261–267.
- LAN T, YAN N, PEI D, *et al.* Determination of five carotenoids in eggs and chicken by HPLC [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(20): 261–267.
- [22] 曲斌, 耿士伟, 冯群科, 等. 超高效液相色谱测定鸡饲料中的5种类胡萝卜素添加剂[J]. *江苏农业科学*, 2014(9): 273–275.
- QU B, GENG SW, FENG QK, *et al.* Determination of five carotenoid additives in chicken feed by ultra performance liquid chromatography [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014(9): 273–275.
- [23] 杨方, 张盼盼, 钱疆, 等. 高效液相色谱法同时检测淀粉类食品中添加的姜黄色素与类胡萝卜素化合物[J]. *中国食品卫生杂志*, 2014, 26(6): 558–562.
- YANG F, ZHANG PP, QIAN J, *et al.* Simultaneous detection of added curcumin and carotenoid compounds in starchy foods by high-performance liquid chromatography [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2014, 26(6): 558–562.
- [24] 李赫, 陈敏, 朱蕾, 等. 反相高效液相色谱法同时测定保健品中的四种类胡萝卜素[J]. *色谱*, 2006, 24(5): 475–478.
- LI H, CHEN M, ZHU L, *et al.* Simultaneous determination of four carotenoids in health products by reversed-phase high-performance liquid chromatography [J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2006, 24(5): 475–478.
- [25] 谢瑶, 石萌萌, 庞欣. 高效液相色谱及液相色谱-质谱联用技术在保健食品检测中的应用[J]. *化学通报*, 2010, 73(8): 684–688.
- XIE Y, SHI MM, PANG X. Application of high performance liquid chromatography and liquid chromatography-mass spectrometry in health food detection [J]. *Chemistry*, 2010, 73(8): 684–688.
- [26] DANIELE G, MARIOSIMONE Z, LUIGI M. Recent developments in the carotenoid and carotenoid derivatives chromatography-mass spectrometry analysis in food matrices [J]. *TrAC: Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 132(1): 116047.
- [27] 吴新文, 吴华秀, 于以竹, 等. 在线 SPE-HPLC-紫外串联荧光检测器同时测定抹茶中的叶黄素、 β -胡萝卜素和维生素 E[J]. *贵州科学*, 2022, 40(5): 5–11.
- WU XW, WU HX, YU YZ, *et al.* Simultaneous determination of lutein, β -carotene, and vitamin e in matcha by online solid-phase extraction high-performance liquid chromatography with UV and fluorescence detection [J]. *Guizhou Science*, 2022, 40(5): 5–11.
- [28] 郑菲菲, 赖世云, 陶保华, 等. 高效液相色谱法同时测定人乳中视黄醇、 α -生育酚和类胡萝卜素[J]. *食品安全质量检测学报*, 2014, 5(7): 2066–2072.
- ZHENG FF, LAI SY, TAO BH, *et al.* Simultaneous determination of retinol, α -tocopherol, and carotenoids in human milk by high-performance liquid chromatography [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2014, 5(7): 2066–2072.
- [29] 俞淑, 庞贝妮, 林毅侃. 在线固相萃取-液相法测定食品中胡萝卜素[J]. *中国食物与营养*, 2024, 30(4): 49–52.
- YU S, PANG BN, LIN YK. Determination of carotenoids in foods by online solid-phase extraction-liquid chromatography [J]. *Food and Nutrition in China*, 2024, 30(4): 49–52.
- [30] 毛新武, 黄景初, 何淑明, 等. 在线固相萃取-高效液相色谱法快速测定奶粉中的维生素 K_1 与维生素 K_2 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(16): 5305–5313.
- MAO XW, HUANG JC, HE SM, *et al.* Rapid determination of vitamin K_1 and vitamin K_2 in milk powder by online solid phase extraction-high performance liquid chromatography [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(16): 5305–5313.
- [31] 张晶, 孟娟, 杨奕, 等. 在线固相萃取液相色谱-串联质谱法同时测定食品中的敌敌畏和敌百虫[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(18): 7133–7139.
- ZHANG J, MENG J, YANG Y, *et al.* Simultaneous determination of dichlorvos and trichlorfon in food by online solid-phase extraction liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(18): 7133–7139.
- [32] 吕运开, 张奇, 刘畅, 等. 基于分子印迹整体柱的在线固相萃取-液相色谱联用测定奶粉中四环素类兽药残留[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(7): 2692–2697.
- LV YK, ZHANG Q, LIU C, *et al.* Determination of tetracycline veterinary drug residues in milk powder by online solid-phase extraction-liquid chromatography coupled with molecularly imprinted monolithic columns [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2017, 8(7): 2692–2697.
- [33] 张艳海, 金燕. 基于涡流色谱技术的在线固相萃取/高效液相色谱-荧光检测法结合在线稀释快速测定牛奶中5种氟喹诺酮抗生素残留[J]. *分析测试学报*, 2014, 33(10): 1148–1153.
- ZHANG YH, JIN Y. Rapid determination of five fluoroquinolone antibiotic residues in milk by online solid-phase extraction/high-performance liquid chromatography-fluorescence detection coupled with online dilution based on vortex chromatography technology [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2014, 33(10): 1148–1153.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)