

植物源食品中 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素的测定及比较分析

崔亚娟^{1,2}, 孔凡华², 刘国杰^{1,*}, 鲁 绯², 李 东²

(1. 中国农业大学园艺学院, 北京 100094;

2. 北京市营养源研究所, 北京市系统营养工程技术研究中心, 北京 100069)

摘 要: 采用高效液相色谱法建立植物源食品中 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素同时在线分析检测技术, 并以胡萝卜冻干粉为样品进行方法学验证。结果显示, α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素分别在0.8~20、0.4~8.2 $\mu\text{g/mL}$ 范围内线性良好, 精密度的相对标准偏差分别为4.45%、4.71%, 加标回收率分别为96%~112%、83.5%~103%, 加标回收率的相对标准偏差分别为2.67%~5.83%、4.90%~7.42%, 以上结果说明该方法重复性良好、准确可行。采用该方法测定了多种植物源食品的胡萝卜素含量并进行比较分析, 大多数样品中 β -胡萝卜素含量高于 α -胡萝卜素, 只有南瓜中所含的 α -胡萝卜素高于 β -胡萝卜素。

关键词: 高效液相色谱法; 胡萝卜素; α -胡萝卜素; β -胡萝卜素; 植物源食品

Determination and Comparison of α -Carotene and β -Carotene of Plant-Derived Foods

CUI Yajuan^{1,2}, KONG Fanhua², LIU Guojie^{1,*}, LU Fei², LI Dong²

(1. College of Horticulture, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2. Beijing Institute of Nutrition Resources, Beijing System Nutrition Engineering and Technology Research Center, Beijing 100069, China)

Abstract: The study was conducted to develop an analytical method for simultaneous online determination of α -carotene and β -carotene in plant-derived foods by high performance liquid chromatography (HPLC). Furthermore, the method was validated with freeze-dried carrot powder. The results showed that the calibration curves for α -carotene and β -carotene were linear in the ranges of 0.8–20 and 0.4–8.2 $\mu\text{g/mL}$, respectively. The precision expressed as relative standard deviation (RSD) were 4.45% and 4.71%, respectively. The recoveries at three spiked levels were 96%–112% and 83.5%–103% with RSD values of 2.67%–5.83% and 4.90%–7.42%, respectively. These data indicated good repeatability and accuracy. Comparative analysis of various plant-derived foods by this method showed that β -carotene was more abundant than α -carotene in all samples except for pumpkin, which gave the opposite result.

Keywords: high-performance liquid chromatography; carotene; α -carotene; β -carotene; plant-derived foods

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201804029

中图分类号: TS201.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2018) 04-0194-05

引文格式:

崔亚娟, 孔凡华, 刘国杰, 等. 植物源食品中 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素的测定及比较分析[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 194-198. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201804029. <http://www.spkx.net.cn>

CUI Yajuan, KONG Fanhua, LIU Guojie, et al. Determination and comparison of α -carotene and β -carotene of plant-derived foods[J]. Food Science, 2018, 39(4): 194-198. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201804029. <http://www.spkx.net.cn>

类胡萝卜素是一类重要的天然色素的总称, 普遍存在于动物、高等植物、真菌、藻类中的黄色、橙红色或红色的色素之中, 性质极其不稳定, 受热、遇氧、见光容易受到破坏。迄今, 被发现的天然类胡萝卜素已达600

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: 首都食品安全科技创优培育专项 (Z141100002614013)

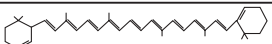
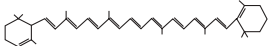
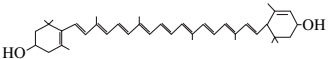
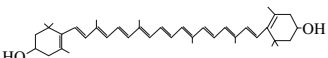
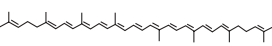
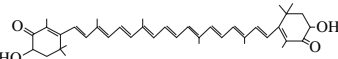
第一作者简介: 崔亚娟 (1979—), 女, 副研究员, 博士, 研究方向为食物营养与健康。E-mail: cuiyj66@163.com

*通信作者简介: 刘国杰 (1957—), 男, 教授, 硕士, 研究方向为果树栽培生理、果实着色生理。E-mail: lgj@cau.edu.cn

多种^[1-2], 其中几种常见的类胡萝卜素有 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素、叶黄素、玉米黄质、番茄红素及虾青素等。常见类胡萝卜素如表1所示。研究表明, 类胡萝卜素物质主要存在于天然果蔬中^[3-4], 具有较强抗氧化性^[5]、可

以预防和治疗糖尿病^[6]、减少心血管疾病发病率^[7]、保护视力和抗癌^[8]等多种生理功能。在自然条件下类胡萝卜素是动物体内VA的主要来源,约有10%的类胡萝卜素(主要为 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素)是VA的前体,其中 β -胡萝卜素的VA原活性最高^[9-10],这主要是因为 β -胡萝卜素具有对称结构,1分子 β -胡萝卜素可以产生2分子的VA^[9]。随着人们健康意识的增强,对天然类胡萝卜素的需求大大增加,开发利用类胡萝卜素已经成为一个引人注目的发展趋势^[11-12]。

表1 常见几种类胡萝卜素的分子式和结构式
Table 1 Molecular formulas and structures of several carotenes

名称	分子式	相对分子质量	分子结构
α -胡萝卜素	$C_{40}H_{56}$	536.88	
β -胡萝卜素	$C_{40}H_{56}$	536.88	
叶黄素	$C_{42}H_{58}O_2$	568.85	
玉米黄质	$C_{40}H_{56}O_2$	568.85	
番茄红素	$C_{40}H_{56}$	536.85	
虾青素	$C_{40}H_{56}O_4$	596.84	

植物源食品中类胡萝卜素的测定方法以及背景资料是开展类胡萝卜素营养研究工作的重要基础^[13]。目前,食物中类胡萝卜素的测定方法有分光光度法^[14]、柱层析法^[5,15]、薄层色谱法^[16]、高效液相色谱法^[17-18]、质谱^[19]、电化学检测器^[20]、核磁共振^[21]。分光光度法适用于测定单一类胡萝卜素的量,不能对多种类胡萝卜素分别定量;薄层色谱法和柱层析法成本低廉,能对多种胡萝卜素进行分离,但分析时间长、重复性差且不能精确定量;质谱、核磁共振和电化学检测器等串联仪器设备昂贵,测定成本高。高效液相色谱法具有分离效能高、分析速度快等优点,目前基本采用反相高效液相色谱法,并配合紫外-可见光检测器或二极管阵列检测器,对样品中的类胡萝卜素进行定性定量分析。研究人员用液相色谱法测定油料作物种子^[22]、小麦类^[23]、番茄和胡萝卜^[24]、白菜^[25]、茶^[26]、水果^[27]等多种植物源食品中类胡萝卜素的含量,但不同植物源食品中类胡萝卜素含量及其活性比较研究较少,目前我国尚缺少植物源食品中各种类胡萝卜素组分含量方面的背景资料和相关数据^[28],因此,建立、完善测定植物源食品中各种类胡萝卜素组分的方法亟待解决,建立一个同时测定胡萝卜素的定量方法,对于正确评价各种水果蔬菜及植物源食品的营养价值,开展营养学的研究至关重要。本实验在借鉴前人研究的

基础上,利用高效液相色谱法建立植物源食品中 α -胡萝卜素及 β -胡萝卜素的同时在线分析检测,以胡萝卜冻干粉为样品进行方法学验证,并用该方法测定多种植物源食品中胡萝卜素的含量并进行比较分析,旨在为科研和实际应用提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

胡萝卜冻干粉 实验室自制;果蔬、谷物、植物油、茶等样品各6种 市购; β -胡萝卜素标准品(纯度>95.0%)、 α -胡萝卜素标准品(纯度>95.0%) 美国Sigma公司;甲醇、乙腈、三乙胺、甲基叔丁基醚、二氯甲烷、正己烷(均为色谱纯) 美国Fisher公司;无水硫酸钠、乙醇、氢氧化钾、丙酮、三氯甲烷、石油醚、抗坏血酸(均为分析纯) 北京化工厂。

1.2 仪器与设备

BS224S分析天平 德国赛多利斯公司;EYELA N-1100旋转蒸发仪 东京理化株式会社;98-II-B磁力搅拌电热套 天津市泰斯特仪器有限公司;L-2000高效液相色谱仪 日本日立科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

称取胡萝卜冻干粉约0.03 g和果蔬、谷物、植物油、茶等样品2~5 g(精确至0.000 1 g),置于250 mL平底烧瓶中,加入10 mL抗坏血酸水溶液(10%),再加入30 mL乙醇溶解,摇匀,加入质量分数50%氢氧化钾溶液10 mL,混匀,于磁力搅拌电热套上皂化回流30 min,取出立即放入冷水中冷却。

将皂化后的液体转移至500 mL分液漏斗中,用约50 mL水分2次洗皂化瓶,洗液并入分液漏斗中。用50 mL石油醚分2次洗皂化瓶,石油醚液同样转移至分液漏斗,将分液漏斗置于振荡器上振摇,280 r/min振摇2次,每次振摇3 min,其间放气;振摇后取下分液漏斗,静置分层,将下层溶液转移至另一分液漏斗中,重复上述步骤2次;弃去下层液体,合并2次提取液后用水洗至中性;将液体经过约5 g无水硫酸钠后滤入150 mL蒸发瓶中,用约10 mL石油醚冲洗分液漏斗及无水硫酸钠3次,并入蒸发瓶中。将蒸发瓶接至旋转蒸发仪上蒸发,蒸至近干后用氮气吹干蒸发瓶,取下蒸发瓶,剩余物用甲醇-乙腈-二氯甲烷-正己烷(3:4:4:4, V/V/V/V)溶液定容至5 mL,样品过0.45 μ m滤膜,备用。

1.3.2 色谱条件

色谱柱:YMC C₃₀(4.6 mm×250 mm, 5 μ m);流动相A为乙腈-甲醇-三乙胺溶液(70:30:0.05,

V/V)，流动相B为甲基叔丁基醚-三乙胺溶液（100:0.05，V/V）；检测波长450 nm；柱温30℃；进样体积20 μL；洗脱程序：0~27 min，100%~45% A，0%~55% B；27.0~27.1 min，45%~100% A，55%~0% B，保留8 min。

1.3.3 胡萝卜素含量的测定

胡萝卜素含量按下式计算：

$$X = \frac{c \times V}{m \times 100}$$

式中：X为样品中胡萝卜素含量/（μg/100 g）；c为由标准曲线而得的试样溶液中胡萝卜素质量浓度/（μg/mL）；V为试样溶液最终定容体积/mL；m为试样质量/g。

2 结果与分析

2.1 标准曲线的绘制

2.1.1 α-胡萝卜素标准曲线的绘制

α-胡萝卜素标准储备液：称取α-胡萝卜素标准品1 mg（精确到0.1 mg），用丙酮定容至10 mL棕色容量瓶中，临用前在波长450 nm处用丙酮作空白于分光光度计上标定溶液浓度。

α-胡萝卜素标准工作液：从α-胡萝卜素标准储备液中分别准确移取1、1、1、2、1 mL溶液转移至100、50、25、25、5 mL棕色容量瓶中，用丙酮定容至刻度，得到质量浓度为0.8~20 μg/mL的标准系列工作液，分别进样20 μL。按1.3.2节色谱条件测定，记录所得峰面积，以峰面积为横坐标，以标准溶液质量浓度为纵坐标绘制标准曲线，得到回归方程为 $y = 1.8863 \times 10^{-6}x$ ， $R^2 = 0.9997$ 。

2.1.2 β-胡萝卜素标准曲线的绘制

β-胡萝卜素标准储备液：准确称取β-胡萝卜素标准品10 mg（精确到0.1 mg），用三氯甲烷定容至10 mL棕色容量瓶中，临用前在波长450 nm处用正己烷作空白于分光光度计上标定溶液浓度。

β-胡萝卜素标准中间液（20 μg/mL）：从β-胡萝卜素标准母液中准确移取1.0 mL溶液转入50 mL棕色容量瓶中，用甲醇-乙腈-二氯甲烷-正己烷（3:4:4:4，V/V）溶液定容至刻度，得到质量浓度为20 μg/mL的标准中间液。

β-胡萝卜素标准工作液：从β-胡萝卜素标准中间液中分别准确移取1.0、2.0、2.0、1.0、2.0 mL溶液转入50、50、25、5、5 mL棕色容量瓶中，用甲醇-乙腈-二氯甲烷-正己烷（3:4:4:4，V/V）溶液定容至刻度，得到质量浓度为0.4~8.2 μg/mL的系列标准工作液，分别进样20 μL。按1.3.2节色谱条件测定，记录所得峰面积，以峰面积为横坐标，以标准溶液质量浓度为纵坐标绘制标准曲线，得到回归方程为 $y = 9.1837 \times 10^{-7}x$ ， $R^2 = 0.9992$ 。

2.2 方法精密度的测定结果

准确称取0.03 g（精确至0.000 1 g）胡萝卜冻干粉样品，做6个平行，进行α-胡萝卜素和β-胡萝卜素含量测定。如表2所示，胡萝卜冻干粉中α-胡萝卜素和β-胡萝卜素的平均值分别为25.8 mg/100 g和16.1 mg/100 g，标准偏差分别为1.15 mg/100 g和0.76 mg/100 g，相对标准偏差分别为4.45%和4.71%。实验具有较好重复性，能够满足对样品测定平行的要求。

表2 胡萝卜冻干粉中胡萝卜素的含量
Table 2 Carotene content of freeze-dried carrot powder

指标	含量/(mg/100 g)						标准偏差/(mg/100 g)	相对标准偏差/%
	样品1	样品2	样品3	样品4	样品5	样品6	均值	
α-胡萝卜素	24.9	25.9	27.0	26.4	23.9	26.4	25.8	1.15
β-胡萝卜素	15.5	16.2	17.0	16.4	14.9	16.5	16.1	0.76

2.3 加标回收率的测定结果

表3 胡萝卜素加标回收实验结果
Table 3 Recoveries from spiked samples

指标	本底值/(mg/100 g)	加标量/μg	回收率/%				相对标准偏差/%
			平行1	平行2	平行3	平均值	
α-胡萝卜素	25.8	4.0	115	109	112	112	2.79
		16	100	99.9	90.4	96	5.83
		20	105	110	105	106	2.67
β-胡萝卜素	16.1	3.30	79.6	83	88	83.5	5.07
		8.25	110	102	95	103	7.42
		16.5	81.5	83.1	89.3	84.6	4.90

取胡萝卜冻干粉为样品基质，分别以样品本底的0.5、1、2倍添加低、中、高3个添加量的标准溶液，每个质量浓度水平重复3次测定，分别计算加标回收率和相对标准偏差。如表3所示，α-胡萝卜素及β-胡萝卜素加标回收率分别为96%~112%、83.5%~103%，加标回收率的相对标准偏差分别为2.67%~5.83%、4.90%~7.42%，能够满足检测实际样品需要。胡萝卜冻干粉中α-胡萝卜素及β-胡萝卜素的谱图如图1所示。

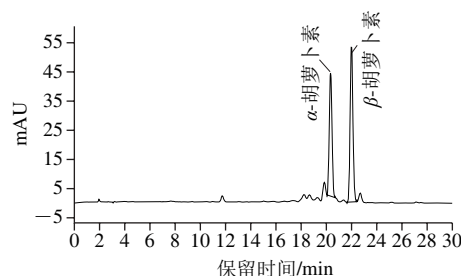


图1 胡萝卜冻干粉中α-胡萝卜素及β-胡萝卜素谱图
Fig. 1 HPLC-UV chromatograms of α-carotene and β-carotene in freeze-dried carrot powder

2.4 植物源食品中胡萝卜素含量的测定结果

2.4.1 水果中胡萝卜素含量的测定结果

选取杏、西瓜、柿子、猕猴桃、苹果和樱桃6种常

见水果,用优化方法同时测定 α -胡萝卜素及 β -胡萝卜素的含量,如表4所示,杏中的胡萝卜素含量最高,总量达到3 000 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 以上,西瓜次之,樱桃中的胡萝卜素含量最低,低于30 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 。

表4 6种水果中胡萝卜素的含量
Table 4 Carotene contents of six fruits

样品	杏	西瓜	柿子	猕猴桃	苹果	樱桃
α -胡萝卜素	913	178	29.1	12.2	11.6	8.53
β -胡萝卜素	2 091	593	68.6	25.2	24.1	20.5
总胡萝卜素	3 004	771	97.7	37.4	35.7	29.0

2.4.2 蔬菜中胡萝卜素含量的测定结果

表5 6种蔬菜中胡萝卜素的含量
Table 5 Carotene contents of six vegetables

样品	辣椒	南瓜	番茄	西葫芦	红薯	油菜
α -胡萝卜素	980	1 410	81.8	73.9	42.1	6.55
β -胡萝卜素	2 122	1 087	191	166	67.8	13.2
总胡萝卜素	3 012	2 497	273	240	110	19.7

选取辣椒、南瓜、番茄、西葫芦、红薯和油菜6种常见蔬菜,用优化方法同时测定 α -胡萝卜素及 β -胡萝卜素的含量,如表5所示,辣椒中胡萝卜素含量最高,总量达到3 000 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 以上,南瓜次之,油菜中的胡萝卜素含量最低,低于20 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 。

2.4.3 谷物中胡萝卜素含量的测定结果

表6 6种谷物中胡萝卜素的含量
Table 6 Carotene contents of six cereals

样品	大米	小米	藜麦	玉米面	黄豆	黑豆
α -胡萝卜素	17.0	19.2	5.72	2.23	3.94	11.8
β -胡萝卜素	33.8	40.0	9.14	4.96	7.80	29.4
总胡萝卜素	50.8	59.2	14.9	7.19	11.7	41.2

选取大米、小米、藜麦、玉米面、黄豆和黑豆6种常见谷物,用优化方法同时测定 α -胡萝卜素及 β -胡萝卜素的含量,如表6所示,谷物中胡萝卜素含量整体较低,总量均低于60 $\mu\text{g}/100\text{ g}$,可见,果蔬是胡萝卜素的主要食物来源,谷物可以辅助提供胡萝卜素的供给^[29-30]。

2.4.4 植物油中胡萝卜素含量的测定结果

表7 6种植物油中胡萝卜素的含量
Table 7 Carotene contents of six vegetable oils

样品	红棕榈油	沙棘籽油	植物油	菜籽油	橄榄油	亚麻籽油
α -胡萝卜素	1 540	600	262	40.8	14.1	52.5
β -胡萝卜素	3 322	1 823	899	230	150	107
总胡萝卜素	4 862	2 423	1 161	271	164	160

选取红棕榈油、沙棘籽油、植物油、菜籽油、橄榄油和亚麻籽油6种植物油,用优化方法同时测定 α -胡萝卜

素及 β -胡萝卜素的含量,如表7所示,红棕榈油中胡萝卜素含量最高,总量近5 000 $\mu\text{g}/100\text{ g}$,亚麻籽油中胡萝卜素含量最低,含量为160 $\mu\text{g}/100\text{ g}$,可见植物油中胡萝卜素含量比较高。

2.4.5 茶中胡萝卜素含量的测定结果

表8 6种茶中胡萝卜素的含量
Table 8 Carotene contents of six types of tea

样品	辣木茶	黑茶	岩茶	古树茶	桑叶茶	茶菊
α -胡萝卜素	6 379	3 921	2 728	2 008	468	271
β -胡萝卜素	16 497	7 641	5 412	3 499	2 338	617
总胡萝卜素	22 876	11 562	8 140	5 507	2 806	888

选取辣木茶、黑茶、岩茶、古树茶、桑叶茶和茶菊6种茶类,用上述方法同时测定 α -胡萝卜素及 β -胡萝卜素的含量,如表8所示,茶中胡萝卜素含量非常高,辣木茶和黑茶胡萝卜素总量均在10 000 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 以上,其他茶中胡萝卜素含量也在2 800 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 以上,只有茶菊中胡萝卜素含量较低,为888 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 。

3 结论与讨论

本实验利用高效液相色谱法建立了植物源食品中 α -胡萝卜素及 β -胡萝卜素的同时在线分析检测,并以胡萝卜冻干粉为样品进行了方法学验证,该方法线性良好,稳定性好,回收率满足分析要求。与目前常用方法相比,优化了样品前处理过程,缩短了分析时间。

姚建花等^[31]报道,选用胡萝卜、玉米、蜜橘、菠菜制备混样,用直接溶剂提取法和皂化提取法进行比较,结果显示, α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素均为皂化提取效果更好,样品经皂化后,叶绿素已破坏,皂化可排除叶绿素干扰,皂化提取法适用于所有果蔬类样品。张彩凌等^[32]同时采用直接提取法和皂化提取法对 β -胡萝卜素进行测定,并对2种方法的结果进行了比较,结果表明皂化不会影响 β -胡萝卜素含量测定,因此,本研究选用皂化提取法。

本实验用该方法测定了不同的水果、蔬菜、谷物、植物油、茶叶等植物源食品中 α -胡萝卜素及 β -胡萝卜素的含量,不同的植物源食品中二者含量差异较大,茶叶和植物油中胡萝卜素含量普遍较高、果蔬中胡萝卜素含量次之、谷物中胡萝卜素含量较低,尽管谷物不是胡萝卜素的主要提供者,但即使是低含量的谷物食物用该实验所建的方法也能检测到,可见该方法灵敏度高,能够为企业研发、质量控制和相关科学研究提供较为合适的方法保障,同时会给相关机构和部门提供准确的检测方法和完备的技术支持。

本实验筛选了30种常见植物源食品进行研究,为后

期营养膳食数据库的建立提供数据基础。绝大多数植物源食物中 α -胡萝卜素的含量小于 β -胡萝卜素,与文献报道一致,只有南瓜中 α -胡萝卜素的含量高于 β -胡萝卜素。

本实验数据可以为科研和实际应用提供一定的理论数据和技术支持,但还不能完全反映出我国大量植物源食品中胡萝卜素的含量及差异,日后还会继续增大样品量的研究,同时该数据可以为食物成分数据库的完善提供数据支持。

参考文献:

- [1] STAHL W, SIES H. Bioactivity and protective effects of natural carotenoids[J]. *Biochemical Biophysic Acta*, 2005, 1740(2): 101-107. DOI:10.1016/j.bbdis.2004.12.006.
- [2] GU Z X, CHEN D M, HAN Y B, et al. Optimization of carotenoids extraction from *Rhodobacter sphaeroides*[J]. *Swiss Society of Food Science and Technology*, 2008, 41: 1082-1088. DOI:10.1016/j.lwt.2007.07.005.
- [3] DELGADO-PELAYO R, HORNERO-MÉNDEZ D. Identification and quantitative analysis of carotenoids and their esters from Sarsaparilla (*Smilax aspera* L.) berries[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60: 8225-8232. DOI:10.1021/jf302719g.
- [4] ELISEU R, LILIAN R B M, ADRIANA Z. Mercadante carotenoids and phenolic compounds from *Solanum sessiliflorum*, an unexploited Amazonian fruit, and their scavenging capacities against reactive oxygen and nitrogen species[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61: 3022-3029. DOI:10.1021/jf3054214.
- [5] WANG C C, CHANG S C, STEPHEN I B, et al. Isolation of carotenoids, flavonoids and polysaccharides from *Lycium barbarum* L. and evaluation of antioxidant activity[J]. *Food Chemistry*, 2010, 120: 184-192. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.10.005.
- [6] HOFE C R, FENG L, ZEPHYR D. Fruit and vegetable intake, as reflected by serum carotenoid concentrations, predicts reduced probability of polychlorinated biphenyl-associated risk for type 2 diabetes: National Health and Nutrition Examination Survey 2003-2004[J]. *Nutrition Research*, 2014, 34: 285-293. DOI:10.1016/j.nutres.2014.02.001.
- [7] TANG L, ZHANG Y, JIANG Y, et al. Dietary wolfberry ameliorates retinal structure abnormalities in db/db mice at the early stage of diabetes[J]. *Experimental Biology and Medicine*, 2011, 236(9): 1051-1063.
- [8] SE K, LEE H, MIN J, et al. Proposed cytotoxic mechanisms of the saffron carotenoids crocin and crocetin on cancer cell lines[J]. *Biochemistry and Cell Biology-Biochimie et Biologie Cellulaire*, 2014, 92: 105-111.
- [9] WEBER D, GRUNE T. The contribution of β -carotene to vitamin A supply of humans[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2012, 56(2): 251-258. DOI:10.1002/mnfr.201100230.
- [10] DONHOWE E G, KONG F. Beta-carotene: digestion, microencapsulation, and *in vitro* bioavailability[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(2): 338-354. DOI:10.1007/s11947-013-1244-z.
- [11] 范立梅. 类胡萝卜素的生物学功能[J]. *生物学通报*, 2001, 36(4): 10. DOI:10.3969/j.issn.0006-3193.2001.04.004.
- [12] 林海峰. 健康一生[M]. 北京: 中国物资出版社, 2005.
- [13] 赵显峰, 潘丽莉, 孟晶, 等. 高效液相色谱法测定蔬菜中类胡萝卜素组分[J]. *卫生研究*, 2008, 37(2): 228-230. DOI:10.3969/j.issn.1000-8020.2008.02.029.
- [14] 李玉环, 王锋, 刘群山. 皂化法提取番茄红素的研究[J]. *食品科学*, 2002, 23(8): 146-150. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2002.08.040.
- [15] 娄天军, 赵功玲, 张炎, 等. 柱层析法纯化番茄红素的研究[J]. *食品研究与开发*, 2005, 26(4): 28-29. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2005.04.010.
- [16] 刘敬业, 丘玲, 王亮. 薄层色谱分离测定烤烟中的 β -胡萝卜素[J]. *昆明师范专科学校(自然科学版)*, 1998(13): 1-3. DOI:10.1007/s00256-009-0793-8.
- [17] 曹梦锦, 张雪松, 王晓娟, 等. 蔬菜中胡萝卜素测定方法的改良[J]. *卫生研究*, 2016, 45(3): 477-482.
- [18] INBARAJ B S, LU H, HUNG C F, et al. Determination of carotenoids and their esters in fruits of *Lycium barbarum* Linnaeus by HPLC-DAD-APCI-MS[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2008, 47(4/5): 812-818. DOI:10.1016/j.jpba.2008.04.001.
- [19] MERCADANTE A Z, RODRIGUEZ-AMAYA D B, BRITTON G. HPLC and mass spectrometric analysis of carotenoids from mango[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1997, 45(1): 120-123. DOI:10.1021/jf960276j.
- [20] FERRUZZI M G, SANDERL C, ROCK C L. Carotenoid determination in biological microsomes using liquid chromatography with a coulometric electrochemical array detector[J]. *Analytical Biochemistry*, 1998, 256: 74-81. DOI:10.1006/abio.1997.2484.
- [21] STROHSCHN S, PURSCH M, ALBERT K. Hyphenation of high performance liquid chromatography with nuclear magnetic resonance spectroscopy for the characterization of β -carotene isomers employing a C_{30} stationary phase[J]. *Journal of Pharmaceutical & Biomedical Analysis*, 1999, 21(3): 669-677. DOI:10.1016/S0731-7085(99)00164-8.
- [22] 高桂珍, 伍晓明, 陆光远, 等. 几种油料作物种子中类胡萝卜素含量的分析[J]. *中国油料作物学报*, 2008, 30(3): 312-315. DOI:10.3321/j.issn:1007-9084.2008.03.009.
- [23] 孙延芳, 王成社, 杨进荣, 等. 硬粒小麦类胡萝卜素含量的定量分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(5): 102-106. DOI:10.3321/j.issn:1671-9387.2007.05.022.
- [24] 惠伯棣, 李京, 孙拿拿, 等. 番茄和胡萝卜中类胡萝卜素的 C_{30} 与 C_{18} HPLC分离[J]. *中国食品卫生杂志*, 2006, 18(4): 289-292.
- [25] 陈鹏飞, 刘栓桃, 张志刚, 等. 大白菜的类胡萝卜素种类鉴定[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(19): 137-143.
- [26] 徐仲溪, 王坤波, 简伯华. 沱茶中叶绿素和类胡萝卜素组分的高效薄层色谱分析[J]. *云南农业大学学报*, 2005, 20(3): 384-387. DOI:10.3969/j.issn.1004-390X.2005.03.017.
- [27] 蔡智鸣, 王振, 王枫华, 等. 深色果蔬食品中番茄红素与 β -胡萝卜素的HPLC测定[J]. *同济大学学报(医学版)*, 2006, 27(1): 17-20. DOI:10.3969/j.issn.1008-0392.2006.01.005.
- [28] 杨月欣, 王光亚, 潘兴昌. 中国食物成份表2002[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2002.
- [29] 刘洪岩, 辛乃宏. β -胡萝卜素的研究进展[J]. *盐业与化工*, 2013(1): 18-21.
- [30] 王雪. β -胡萝卜素的研究进展[J]. *中国化工贸易*, 2013, 5(5): 193. DOI:10.3969/j.issn.1674-5167.2013.05.183.
- [31] 姚建花, 黄百芬, 任一平, 等. 高效液相色谱法同时测定果蔬中五种类胡萝卜素[J]. *营养学报*, 2012, 34(3): 282-285.
- [32] 张彩凌, 牛春芳, 葛兴信, 等. 高效液相色谱法测定栅藻中5种类胡萝卜素的含量[J]. *分析科学学报*, 2016, 32(2): 269-272. DOI:10.13526/j.issn.1006-6144.2016.02.025.