DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251120005
引用格式: 睢倩倩, 沈琦, 何伟忠, 等. 采后甜瓜果肉糖类组分和 B 族维生素含量及其生物可及性变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 288–296.
SUI QQ, SHEN Q, HE WZ, *et al*. Changes in sugar components and B-vitamin content and their bioavailability in postharvest *Cucumis melo* L. flesh [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 288–296. (in Chinese with English abstract).

采后甜瓜果肉糖类组分和 B 族维生素含量及其生物可及性变化

睢倩倩[1,2], 沈　琦[2], 何伟忠[2*], 王　成[2*]

[1. 新疆农业大学食品科学与药学学院, 乌鲁木齐　830052; 2. 新疆维吾尔自治区农业科学院农业质量标准与检测技术研究所/农业农村部农产品质量安全风险评估实验室/农业农村部荒漠绿洲生态区特色农产品功能营养与健康重点实验室(部省共建)/新疆农产品质量安全重点实验室, 乌鲁木齐　830091]

摘　要: 目的　明确采后甜瓜果肉 4 种糖、4 种维生素含量及其生物可及性变化。**方法**　以采后 7 个不同阶段 2 个品种甜瓜果肉为研究对象, 通过体外模拟消化实验及高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)技术, 分析甜瓜果肉中还原糖、果糖、葡萄糖、蔗糖、维生素 B_1 (vitamin B_1, VB_1)、维生素 B_2 (vitamin B_2,VB_2)、烟酸、烟酰胺的含量及生物可及性变化, 采用单因素方差分析、隶属函数分析法对采后甜瓜果肉各营养素进行综合评价。**结果**　采后两个品种甜瓜果肉 8 种营养素生物可及性符合: 葡萄糖>还原糖>果糖>蔗糖; VB_2>VB_1>烟酸>烟酰胺。随着时间的延长, 纳斯蜜果肉中葡萄糖、还原糖、果糖、烟酰胺生物可及性呈波动上升趋势, 果肉中 VB_1、烟酸生物可及性表现为前期上升后期下降, VB_2 波动式下降; 西州密 25 号果肉 4 种糖和 4 种维生素生物可及性呈波动变化趋势, 不同品种间差异明显。通过隶属函数分析法, 综合评价了采后纳斯蜜与西州密 25 号甜瓜果肉糖、维生素生物可及性, 结果显示, 采后第 9 d 甜瓜果肉营养水平生物可及性综合表现最佳, 分别为 0.61 和 0.72。**结论**　采后两个品种甜瓜果肉 4 种糖、4 种维生素含量与生物可及性呈现不同变化趋势, 后续宜根据特点研发调控技术, 提高甜瓜果肉营养品质生物可及性, 为消费者提供膳食指导。

关键词: 甜瓜; 糖; 维生素; 采后; 生物可及性

Changes in sugar components and B-vitamin content and their bioavailability in postharvest *Cucumis melo* L. flesh

SUI Qian-Qian[1,2], SHEN Qi[2], HE Wei-Zhong[2*], WANG Cheng[2*]

收稿日期: 2025-11-20
基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-25); 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02006-1); 新疆维吾尔自治区西甜瓜产业技术体系资助项目(XJARS-06); 新疆农业科学院农业科技创新稳定支持项目(xjnkywdzc-2023003-1)
第一作者: 睢倩倩(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: suiqianqian0007@163.com
***通信作者:** 何伟忠(1981—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为农产品品质及其质量安全控制技术研究。E-mail: hewei198112@126.com
王成(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量安全研究。E-mail: wangcheng321@sina.com

[1. *College of Food Science and Pharmacy*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*; 2. *Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology*, *Xinjiang Academy of Agricultural Sciences*/*Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Agro-products* (*Urumqi*), *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*/*Key Laboratory of Functional Nutrition and Health of Characteristic Agro-products in Arid Oasis Ecological Region*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs* (*Co-constructed by Ministry and Province*)/*Xinjiang Key Laboratory of Agricultural Product Quality and Safety*, *Urumqi* 830091, *China*]

ABSTRACT: Objective　To clarify the changes in the content and bioavailability of 4 kinds of sugars and 4 kinds vitamins in postharvest *Cucumis melo* L. flesh. **Methods**　The study examined the flesh of 2 *Cucumis melo* L. varieties at 7 different post-harvest stages. Using *in vitro* simulated digestion experiments and high performance liquid chromatography (HPLC), this study analyzed the changes in the content and bioavailability of reducing sugars, fructose, glucose, sucrose, vitamin B_1 (VB_1), vitamin B_2 (VB_2), niacin and nicotinamide in the *Cucumis melo* L. flesh. One-way analysis of variance and membership function analysis were employed to comprehensively evaluate the post-harvest nutritional components of the *Cucumis melo* L. flesh. **Results**　The bioavailability of the 8 kinds of nutrients in the *Cucumis melo* L. flesh of both varieties followed the order: Glucose>reducing sugars>fructose>sucrose; VB_2>VB_1>niacin>nicotinamide. Over time, the bioavailability of glucose, reducing sugars, fructose, and nicotinamide in Nasmi *Cucumis melo* L. flesh showed a fluctuating upward trend, while the bioavailability of VB_1 and niacin in the flesh increased initially and then decreased later, and VB_2 showed a fluctuating decline; the bioavailability of the 4 kinds of sugars and 4 kinds of vitamins in the flesh of Xizhoumi No.25 exhibited fluctuating trends, with significant differences observed among the varieties. Using the membership function analysis method, the bioavailability of sugars and vitamins in the flesh of Nasmi and Xizhoumi No.25 *Cucumis melo* L. was comprehensively evaluated post-harvest. The results showed that the overall bioavailability of nutritional components in the *Cucumis melo* L. flesh was highest on the 9th day post-harvest, with values of 0.61 and 0.72, respectively. **Conclusion**　The content and bioavailability of the 4 kinds of sugars and 4 kinds of vitamins in the flesh of the 2 *Cucumis melo* L. varieties exhibit different trends after harvest. It is recommended to develop regulatory technologies based on these characteristics to improve the bioavailability of the nutritional quality of *Cucumis melo* L. flesh and provide dietary guidance to consumers.

KEY WORDS: *Cucumis melo L.*; sugars; vitamins; postharvest; bioavailability

0　引　言

据联合国粮食与农业组织统计, 我国甜瓜生产面积与产量均居世界首位, 种植面积占全球甜瓜生产面积的 36.3%, 产量占世界甜瓜总产量的 48.71%[1]。甜瓜(*Cucumis melo* L.), 属葫芦科一年生蔓性草本植物, 富含多种糖及维生素, 为新疆名优产品, 承载着重要的经济价值和营养价值[2]。甜瓜在采后流通与贮藏过程中, 仍进行呼吸、代谢等生理活动, 导致果实糖类、维生素等营养成分的含量发生变化。且单纯测定甜瓜中营养成分的含量, 不能准确反映人体内吸收利用情况。因此, 通过研究营养成分的生物可及性, 能够更科学地评估甜瓜在食用过程中的营养释放与吸收效率。

目前, 国内外研究进展表明: 采后不同阶段, 蔬菜、水果等多种农产品中糖、维生素含量会发生变化[3–5]。如不同品种甜瓜在贮藏过程中可溶性固形物、可溶性糖等含量呈先升高后降低的趋势[6–7], 斯越秀等[8]研究发现甜瓜“黄皮 9818”在常温贮藏过程中总糖含量、维生素 C 含量均随贮藏时间延长而逐渐下降。然而, 仅通过测定农产品中各营养素的总含量, 并不能准确反映人体实际的摄入量。生物可及性是指食物中的营养素在消化道内被释放出来, 并能够被机体吸收利用的程度, 体外消化模型已广泛应用于多种农产品, 研究内容主要涉及不同品种农产品营养素生物可及性差异分析[9–12]。如红甜菜和苋菜在不同贮藏阶段总酚、总抗氧化能力呈持续增加的趋势, 体外消化后, 贮藏第 4 d 的甜菜总酚、总抗氧化能力显著降低。随后, 这些值逐渐增加, 且在在第 10 d 达到最大值[13]; ZACCARI 等[14]研究了 3 个甘薯品种和 3 个冬瓜品种的葡萄糖含量及其生物可及性, 并探究了贮藏时间对甘薯和冬瓜品种中葡萄糖的生物可及性变化规律, 发现甘薯品种中葡萄糖的生物可及性不受贮藏时间的影响, 但 3 个冬瓜品种中有 2 个品种表现出葡萄糖生物可及性受贮藏时间的影响; FU 等[15]研究发现非浓缩(not from concentrate, NFC)苹果汁和橙汁中维生素生物可及性比大豆和脱脂牛奶高出约 20%。目前关于采后甜瓜糖、维生素生物可及性变化的系统研究报道还较少。

本研究以采后两个品种甜瓜果肉为实验材料, 通过高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)技术, 分析采后甜瓜果肉还原糖、果糖、葡萄糖、蔗糖、维生素 B_1 (vitamin B_1, VB_1)、维生素 B_2 (vitamin B_2, VB_2)、烟酸、烟酰胺含量的变化, 采用 INFOGEST 国际联盟开发的体外消化模型[16], 运用方差分析、隶属函数值等方法, 分析采后 4 种糖、4 种维生素生物可及性差异, 以期为采后甜瓜的营养膳食及生物可及性调控技术研发奠定前期基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

选用西州密 25 号(*Cucumis melo* cv. Xizhou Mi No.25)与纳斯蜜(*Cucumis melo* cv. Nasmi)两个新疆主栽品种甜瓜作为研究材料, 种植于新疆维吾尔自治区农业科学院安宁渠实验基地, 采用露地直播方式种植, 且在生长期约 40~45 d 共采摘若干个甜瓜果实, 常温下贮藏 11 d(温度 25 ℃±1 ℃, 湿度 80%~85%), 分别于贮藏第 0、1、3、5、7、9、11 d 每个阶段选取外观、果重、硬度相似的 3 个果实, 果实经去皮、去籽后按照四分法取果肉, 匀浆后装入样品盒中, –20 ℃保存备用。

体外模拟消化液: 人工唾液(pH 6.8)、人工胃液(pH 1.3)、人工十二指肠液(pH 8.1)、人工胆汁(pH 8.1)(上海源叶生物科技有限公司)。

果糖标准品(纯度 99.8%)、葡萄糖标准品(纯度 99.6%)、蔗糖标准品(纯度 99.7%)、VB_1 标准品(纯度 96%)、VB_2 标准品(纯度 98.2%)、烟酸标准品(纯度 99.9%)、烟酰胺标准品(纯度 99.5%)(上海安谱实验科技股份有限公司); 乙腈(色谱纯, 美国赛默飞世尔科技有限公司); 正丁醇、铁氰化钾、氢氧化钠、盐酸、乙酸钠、冰乙酸、甲醇(色谱纯, 天津市鑫铂特化工有限公司)。

1.2 仪器与设备

Millipore Mill-Q 型超纯水机(美国 Millipore 公司); Waters2695 型高效液相色谱仪、Waters 2475 型紫外检测、Waters2414 示差检测器(美国 Waters 公司); TG18G 台式高速离心机(江苏凯特仪器有限公司); JT3003D 天平(感量 20 mg, 上海力長邦西仪器科技有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品糖含量测定方法

根据 GB 5009.8—2023《食品安全国家标准 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定》分析不同品种甜瓜果肉中果糖、葡萄糖、蔗糖含量。根据 GB 5009.7—2016《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》直接滴定法测定不同品种甜瓜果肉还原糖含量。

1.3.2 样品维生素含量测定方法

甜瓜果肉中维生素含量定量方法: GB 5009.84—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 B_1 的测定》、GB 5009.85—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 B_2 的测定》、GB 5009.89—2023《食品安全国家标准 食品中烟酸和烟酰胺的测定》。

1.3.3 生物可及性测定方法

参照 BÜŞRA 等[17]方法测定样品中果糖、葡萄糖、蔗糖、VB_1、VB_2、烟酸、烟酰胺生物可及性, 方法是: 称取样品 5.0000 g, 置于 100 mL 离心管中, 加入 5 mL 人工唾液, 然后 37 ℃恒温水浴振荡 5 min, 向上步口腔消化结束后的样品中加入 10 mL 人工胃液, 37 ℃恒温水浴振荡 2 h, 向上步胃消化结束后的样品中加入 10 mL 人工十二指肠液、5 mL 人工胆汁, 37 ℃恒温水浴振荡 2 h。各消化过程结束后, 调节 pH 为 4.5 左右, 定容至 50 mL, 将样品于高速冷冻离心机(8000 r/min)离心 10 min, 取离心后的上清液过 0.22 μm 水系滤膜过滤后, 采用 HPLC 测定消化后果糖、葡萄糖、蔗糖、VB_1、VB_2、烟酸、烟酰胺的含量, 根据公式(1)计算生物可及性。

$$\text{生物可及性}/\% = \frac{C_1}{C} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_1 为经过体外消化后各营养素的含量(糖, %; 维生素, mg/100 g), C 为各营养素消化前的含量(糖, %; 维生素, mg/100 g)。

1.4 数据处理

实验分别进行 3 组行测量, 采用 Excel 2025 汇总数据; 使用 SPSS 27.0 软件计算平均值、标准差, 进行方差分析等, 采用 Origin 2024 软件作图; 采用隶属函数法求得各指标的隶属函数值[18−19], 进行综合评价, 通过公式(2)计算隶属函数。

$$Z_{ij}=(X_{ij}-X_{i\min})/(X_{i\max}-X_{i\min}) \quad (2)$$

式中: Z_{ij} 为 i 采后某阶段的 j 指标值; $X_{i\min}$ 为 i 指标的最小值; $X_{i\max}$ 为 i 指标的最大值, 先计算各指标隶属函数值, 再对所有指标计算平均值, 值越大, 品质越好, 反之则越差。

2 结果与分析

2.1 采后甜瓜果肉 4 种糖含量的变化

消化前后甜瓜果肉中果糖、葡萄糖、蔗糖液相色谱图如图 1 所示, 从图 1 中可以看出消化前后甜瓜果肉果糖、葡萄糖、蔗糖峰面积变化明显。峰面积的变化反映出随着时间的延长, 甜瓜果肉中果糖、葡萄糖、蔗糖含量确发生了变化; 同时, 消化前后, 果糖、葡萄糖、蔗糖含量也存在差异。

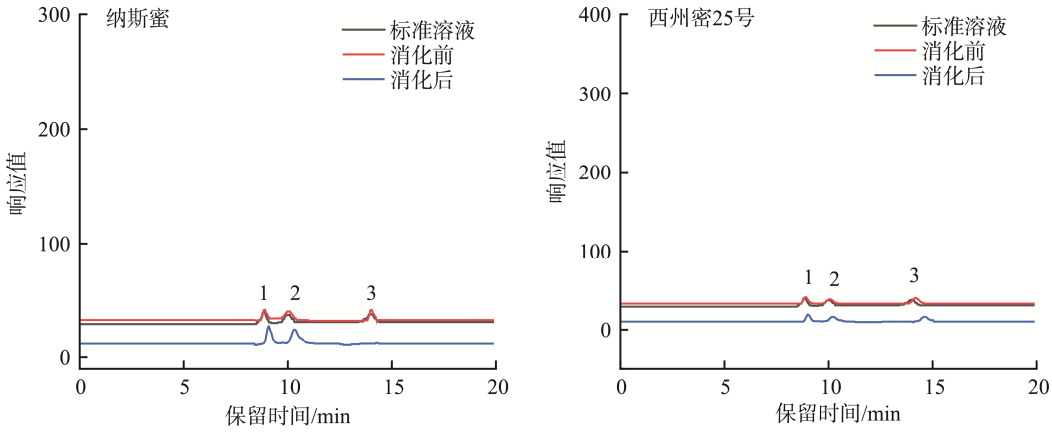
由表 1 可知: 采后两个品种甜瓜果肉 4 种糖含量平均值从高到低依次为: 还原糖>果糖>葡萄糖>蔗糖, 且随着时间延长, 4 种糖含量整体呈下降趋势, 同时两个品种甜瓜还原糖、果糖、葡萄糖在 5~7 d 均出现小幅度上升趋势而后下

降, 蔗糖则呈现波动降低趋势。这一变化趋势与王欣云[20]、侯田莹[21]和马慧等[22]的研究结果相似, 研究分别报道了采后甜瓜果实中葡萄糖、果糖和蔗糖含量呈下降或先升后降的趋势。随着贮藏时间延长, 果实的呼吸代谢可使大部分大分子糖类物质分解[23], 这可能是本研究甜瓜果实 4 种糖含量发生变化的可能原因。

采后纳斯蜜甜瓜果肉 4 种糖含量均值大于西州密 25 号, 纳斯蜜甜瓜果肉中还原糖、果糖、葡萄糖含量均在第 0 d 最高, 在第 11 d 分别降低约 33.50%、31.46%、49.39%, 蔗糖在第 1 d 最高, 在第 11 d 分别降低约 33.33%、31.36%、45.98%, 蔗糖在第 1 d 最高, 第 11 d 降低约 69.82%; 与之不同, 西州密 25 号还原糖、果糖含量在第 5 d 最高, 第 11 d 降低约 15.17%、3.79%, 葡萄糖第 0 d 最高, 第 11 d 降低约 17.56%。

2.2　采后甜瓜果肉 4 种糖生物可及性变化

由图 2 可知, 两个品种甜瓜果肉 4 种糖生物可及性均值由高至低依次为: 葡萄糖、还原糖、果糖、蔗糖。如研究发现贮藏后的冬瓜经体外消化释放的葡萄糖含量提高了 1.6 倍[14], PALMONARI 等[24]发现甜菜和甘蔗中的蔗糖在 3 h 内完全消化, 而葡萄糖和果糖在 4~6 h 内被完全消化。



注: 1. 果糖; 2. 葡萄糖; 3. 蔗糖。

图 1　甜瓜糖类消化前后 HPLC 图

Fig.1　HPLC images of *Cucumis melo* L. carbohydrates before and after digestion

表 1　不同阶段甜瓜 4 种糖含量(%)

Table 1　Sugar content of 4 kinds of *Cucumis melo* L. at different stages (%)

品种	贮藏天数/d	含量			
		还原糖	果糖	葡萄糖	蔗糖
纳斯蜜	0	7.98±1.59^{a}	3.38±1.89^{a}	3.48±0.83^{a}	1.39±2.41^{b}
	1	5.31±0.44^{b}	2.67±0.51^{a}	2.62±0.58^{ab}	4.54±2.98^{a}
	3	5.35±0.20^{b}	2.57±0.51^{a}	1.76±0.73^{b}	1.89±1.00^{b}
	5	5.75±0.51^{b}	2.51±0.53^{a}	2.58±0.71^{ab}	1.43±2.48^{b}
	7	5.79±0.38^{b}	2.96±0.87^{a}	2.55±0.53^{ab}	2.53±1.35^{b}
	9	5.31±0.56^{b}	2.39±0.26^{a}	2.26±0.19^{b}	3.05±1.17^{b}
	11	5.32±0.31^{b}	2.32±0.20^{a}	1.88±0.57^{b}	1.37±1.43^{b}
西州密 25 号	0	5.69±1.16^{a}	2.68±0.61^{a}	2.62±0.60^{a}	6.79±0.59^{a}
	1	5.30±0.33^{a}	1.98±0.39^{a}	1.98±0.20^{a}	1.54±1.4^{bc}
	3	5.17±0.62^{a}	2.09±0.45^{a}	2.07±0.16^{a}	1.74±1.79^{bc}
	5	6.66±1.04^{a}	2.90±0.76^{a}	2.54±0.57^{a}	3.15±2.18^{bc}
	7	5.91±1.37^{a}	2.69±0.82^{a}	2.59±0.54^{a}	0.73±1.27^{c}
	9	5.8±0.24^{a}	2.78±0.39^{a}	2.34±0.38^{a}	1.26±1.10^{b}
	11	5.65±0.41^{a}	2.79±0.44^{a}	2.16±0.56^{a}	-

注: 同列相同品种间不同小写字母表示具有显著差异(P<0.05), 表 2 同; -表示为检出。

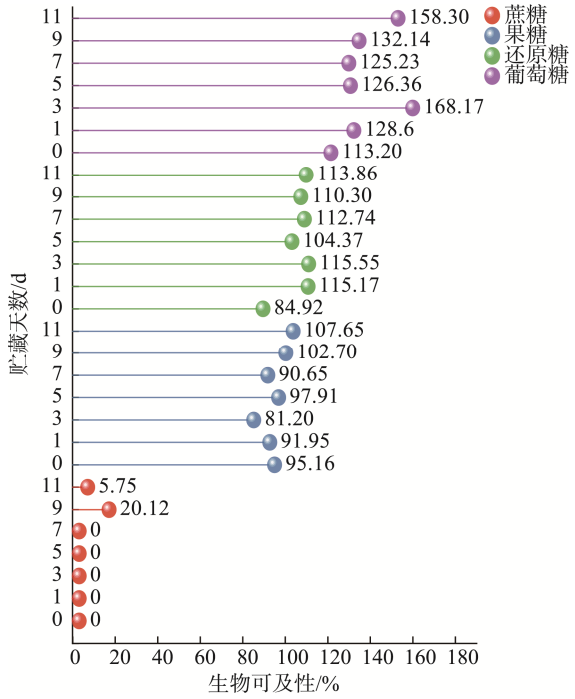


图 2 纳斯蜜 4 种糖生物可及性

Fig.2 Bioavailability of 4 kinds of sugars in Nasmi

由图 2 可知: 采后纳斯蜜甜瓜果肉中葡萄糖、还原糖、果糖的生物可及性均呈波动上升趋势, 其中葡萄糖、还原糖在 1~3 d 生物可及性相对较高, 极大值出现时间均为第 3 d, 分别达 168.17%、115.55%; 果糖生物可及性极大值出现在第 11 d, 为 107.65%; 蔗糖生物可及性极大值出现在第 9 d, 为 20.12%。由图 3 可知西州密 25 号甜瓜果肉中葡萄糖生物可及性呈波动上升趋势, 还原糖则呈波动下降趋势。其中还原糖、果糖生物可及性极大值出现时间在第 3 d, 分别达 157.98%、131.65%; 葡萄糖生物可及性极大值在第 11 d, 为 175.32%; 蔗糖生物可及性极大值出现在第 9 d, 为 35.05%。

研究发现, 不同产区甜瓜果肉生物可及性还原糖、果糖超过 100%[25], 在体外消化过程中蔗糖水解酶会将蔗糖分解为葡萄糖和果糖[26], 这可能是本研究甜瓜果肉中果糖、葡萄糖生物可及性高的原因。SINGH 等[27]研究发现口腔中存在的 α-淀粉酶, 会使马铃薯在口腔消化阶段就开始释放糖类, 胃中酸性 pH 环境会进一步促进淀粉的分解, 肠道消化阶段存在胰酶均会使糖类释放量大幅增加。消化环境、各种酶促反应、pH 等可能是影响甜瓜糖生物可及性的重要因素。

2.3 采后甜瓜果肉 4 种维生素含量的变化

消化前后甜瓜果肉中 VB_1、VB_2、烟酸、烟酰胺液相色谱图如图 4 所示, 从图 4 中亦可看出消化前后甜瓜果肉中 4 种维生素峰面积变化明显。峰面积的变化反映出随着时间的延长, 甜瓜果肉中 4 种维生素含量确发生了变化; 同时, 消化前后, VB_1、VB_2、烟酸、烟酰胺含量也存在差异。

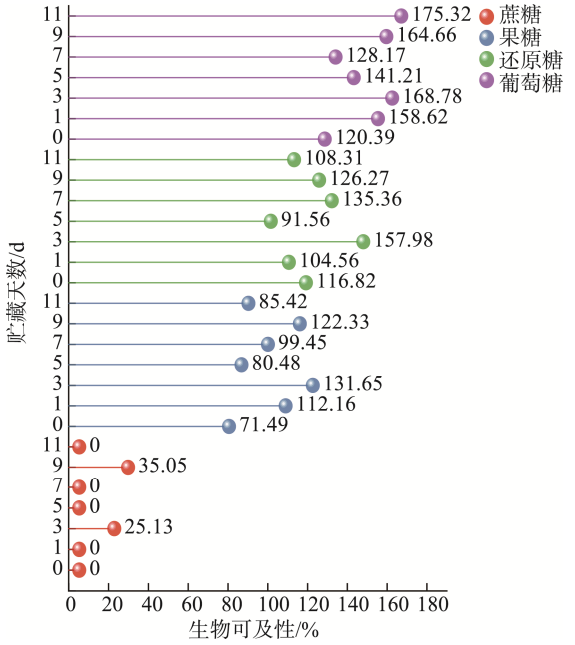


图 3 西州密 25 号 4 种糖生物可及性

Fig.3 Bioavailability of 4 kinds of species in Xizhou Mi No.25

由表 2 可知: 采后两个品种甜瓜果肉 VB_1、VB_2、烟酸含量整体均呈现波动下降趋势, 与已有研究结论一致[28]。VB_1 和 VB_2 稳定性较差, 这是导致其含量逐渐降低的可能原因。采后不同阶段, 纳斯蜜甜瓜果肉中 VB_1、烟酸含量均在第 0 d 最高, 第 11 d 分别降低了 33.33%、45.03%, VB_2 含量在第 7 d 最高, 第 11 d 降低约 62.5%; 西州密 25 号甜瓜果肉中 VB_1、VB_2、烟酸、烟酰胺含量均在第 0 d 最高, 第 11 d 分别降低约 47.83%、57.14%、95.57%、90.01%。其中西州密 25 号果肉中的烟酸、烟酰胺含量均值高于纳斯蜜, VB_2 含量品种间无明显差异。

2.4 采后甜瓜果肉 4 种维生素生物可及性变化

由图 5 可知, 采后纳斯蜜甜瓜果肉 VB_1、VB_2、烟酸、烟酰胺生物可及性均值由高至低依次为: VB_2、VB_1、烟酸、烟酰胺。纳斯蜜甜瓜果肉中 VB_1、烟酸生物可及性表现为前期逐渐上升后期下降, VB_2 波动式下降, 烟酰胺则呈现为波动上升趋势。VB_1、烟酰胺生物可及性极大值出现时间均在第 5 d 分别为 101.16%、73.64%; 烟酸、VB_2 生物可及性极大值出现时间分别为第 1 d 和第 9 d, 分别为 83.60%、117.99%。由图 6 可知, 采后不同阶段西州密 25 生物可及性均值由高至低依次为: VB_2、VB_1、烟酸、烟酰胺。西州密 25 号甜瓜果肉中烟酸、烟酰胺、VB_1、VB_2 生物可及性均呈现波动变化趋势, 极大值出现时间分别为第 1、5、7、9 d, 分别为 80.79%、53.77%、110.43%、115.61%。采后两品种甜瓜 4 种维生素生物可及性均值排序一致, 西州密 25 号维生素生物可及性整体优于纳斯蜜。

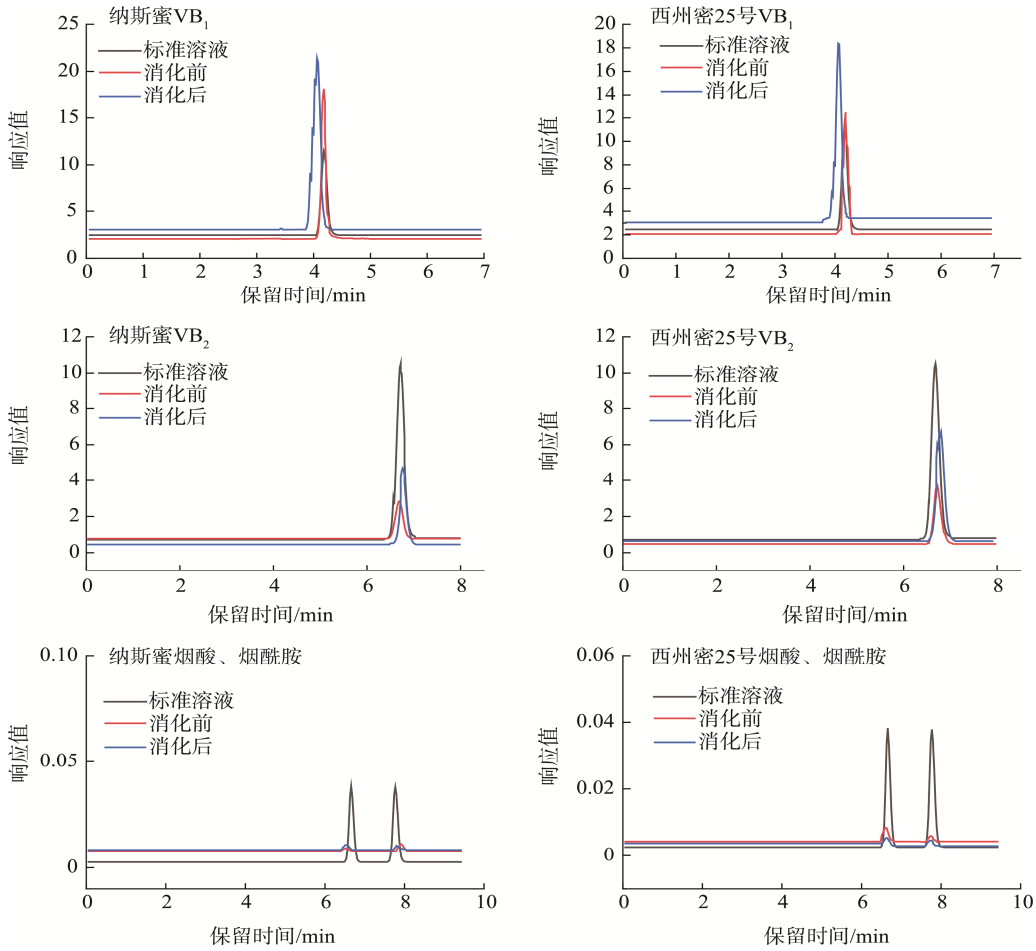


图 4　甜瓜维生素消化前后 HPLC 图

Fig.4　HPLC images of vitamins in *Cucumis melo* L. before and after digestion

表 2　不同阶段甜瓜果肉 4 种维生素含量(mg/100 g)

Table 2　Contents of 4 kinds of vitamins in *Cucumis melo* L. flesh at different stages (mg/100 g)

品种	贮藏天数/d	含量			
		VB_1	VB_2	烟酸	烟酰胺
纳斯蜜	0	0.021±0.007^{a}	0.007±0.001^{b}	0.151±0.084^{a}	0.049±0.084^{b}
	1	0.016±0.001^{a}	0.003±0.0004^{cd}	0.114±0.028^{a}	0.171±0.092^{ab}
	3	0.014±0.004^{a}	0.003±0.001^{cd}	0.089±0.027^{a}	0.040±0.055^{b}
	5	0.012±0.004^{a}	0.003±0.001^{cd}	0.081±0.004^{a}	0.066±0.057^{b}
	7	0.015±0.012^{a}	0.008±0.001^{a}	0.106±0.04^{a}	1.289±0.156^{a}
	9	0.016±0.003^{a}	0.002±0.0004^{d}	0.094±0.011^{a}	0.053±0.055^{b}
	11	0.014±0.003^{a}	0.003±0.0004^{c}	0.083±0.021^{a}	0.222±0.156^{ab}
西州密 25 号	0	0.023±0.013^{a}	0.007±0.001^{a}	0.812±0.028^{a}	1.201±0.987^{a}
	1	0.010±0.002^{b}	0.003±0.001^{cd}	0.039±0.005^{a}	0.225±0.011^{b}
	3	0.014±0.001^{ab}	0.005±0.001^{b}	0.136±0.068^{a}	0.290±0.059^{b}
	5	0.014±0.006^{ab}	0.003±0.0002^{c}	0.120±0.032^{a}	0.057±0.023^{b}
	7	0.013±0.003^{ab}	0.006±0.001^{ab}	0.019±0.014^{a}	0.114±0.037^{b}
	9	0.014±0.003^{ab}	0.002±0.0003^{d}	0.046±0.032^{a}	0.255±0.217^{b}
	11	0.013±0.002^{b}	0.003±0.0004^{cd}	0.036±0.011^{a}	0.120±0.012^{b}

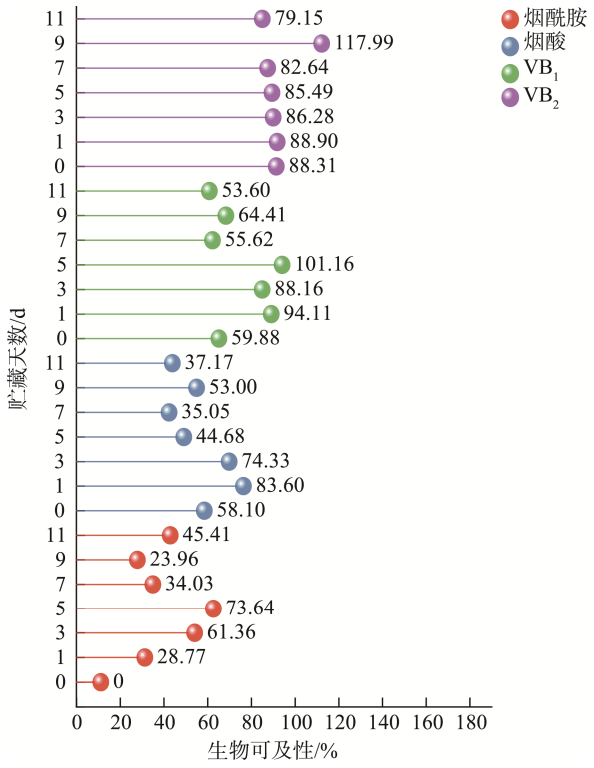


图 5 纳斯蜜 4 种维生素生物可及性

Fig.5 Bioavailability of 4 kinds of vitamins in Nasmi

研究发现部分蔬菜 VB_1 的生物可利用性范围为 37%~100%, VB_2 的生物可及性范围为 33%~101%, 烟酸和烟酰胺的生物可利用性分别为 4%~95%和 3%~82%, 16 种蔬菜中, 有 10 种蔬菜的烟酸生物可及性高于烟酰胺[17], 本研究结果与上述报道接近。维生素水溶性和化学稳定性低, 其在胃肠道内可能会发生化学或酶促转化, 进而影响其生物活性[29]。UĞUR 等[30]研究了 pH 对水果和蔬菜中维生素 C 生物可及性的影响, 结果发现: pH 在 1.5 和 4 条件下, 维生素 C 都会发生显著降解, 这是因为维生素 C 容易被氧化。先前研究报道, VB_2 通常以与蛋白质结合的形式存在于食物中, 由于蛋白质消化率差, 因此植物性食品中维生素的生物可利用性较低[31]。综上, 消化环境、各种酶促反应、pH、物质结合形式等可能是影响甜瓜维生素生物可及性的重要因素。

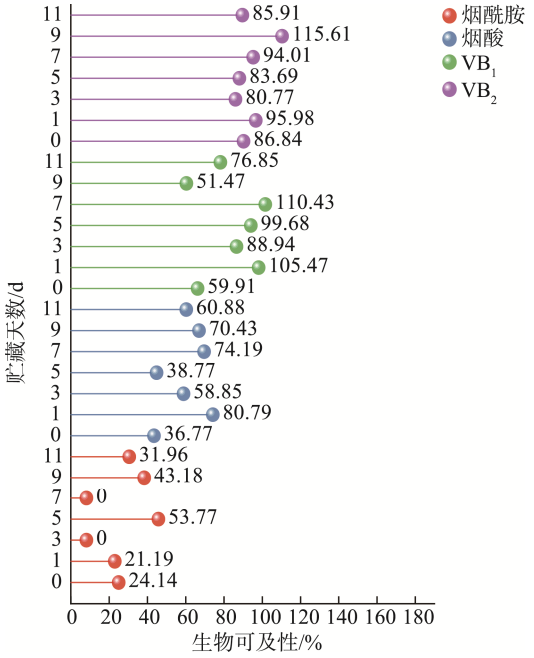


图 6 西州密 25 号 4 种维生素生物可及性

Fig.6 Bioavailability of 4 kinds of vitamins in Xizhou Mi No.25

2.5 隶属函数法综合评价结果

利用模糊数学隶属函数法, 对采后甜瓜果肉蔗糖、果糖、葡萄糖、还原糖、烟酰胺、烟酸、VB_1、VB_2 8 种营养素生物可及性进行综合评价, 表 3 结果显示: 纳斯蜜与西州密 25 号甜瓜果肉均在第 9 d 8 种营养素生物可及性综合表现最佳, 平均隶属函数值分别为 0.61 和 0.72。

表 3 不同阶段甜瓜各指标隶属函数值

Table 3 Membership function values of various indicators at different stages of *Cucumis melo* L.

品种	贮藏天数/d	蔗糖	果糖	葡萄糖	还原糖	烟酰胺	烟酸	VB_1	VB_2	平均值	排名
纳斯蜜	0	0.00	0.53	0.00	0.00	0.00	0.47	0.13	0.24	0.17	7
	1	0.00	0.41	0.28	0.99	0.39	1.00	0.85	0.25	0.52	3
	3	0.00	0.00	1.00	1.00	0.83	0.81	0.73	0.18	0.57	2
	5	0.00	0.63	0.24	0.63	1.00	0.20	1.00	0.16	0.48	4
	7	0.00	0.36	0.22	0.91	0.46	0.00	0.04	0.09	0.26	6
	9	1.00	0.81	0.34	0.83	0.33	0.37	0.23	1.00	0.61	1
	11	0.29	1.00	0.82	0.94	0.62	0.04	0.00	0.00	0.46	5

表 3(续)

品种	贮藏天数/d	蔗糖	果糖	葡萄糖	还原糖	烟酰胺	烟酸	VB_1	VB_2	平均值	排名
西州密25号	0	0.00	0.00	0.00	0.38	0.45	0.00	0.14	0.17	0.14	7
	1	0.00	0.68	0.70	0.20	0.39	1.00	0.92	0.44	0.54	3
	3	0.72	1.00	0.88	1.00	0.00	0.50	0.64	0.00	0.59	2
	5	0.00	0.15	0.38	0.00	1.00	0.05	0.82	0.08	0.31	6
	7	0.00	0.46	0.14	0.66	0.00	0.85	1.00	0.38	0.44	4
	9	1.00	0.85	0.81	0.52	0.80	0.76	0.00	1.00	0.72	1
	11	0.00	0.23	1.00	0.25	0.59	0.55	0.43	0.15	0.40	5

3　结　论

本研究通过对采后甜瓜果肉中 4 种糖与 4 种维生素含量及其生物可及性进行分析, 得出以下结论, 甜瓜在采后不同阶段营养释放特性上存在差异, 纳斯蜜果肉中糖的生物可及性整体呈波动上升趋势, 而西州密 25 号则表现出较强的波动性, 维生素的生物可及性在两品种间也呈现不同的变化趋势, 其中烟酰胺生物可及性相对较低。因此不同营养素的生物可及性存在差异, 其影响机制仍需进一步深入研究。此外, 明确了采后第 9 d 为甜瓜果肉营养素生物可及性的最佳时期, 为消费者提供了更准确的营养信息, 也为后续研发调控技术, 提高甜瓜果肉营养元素生物可及性提供了重要的参考依据。

参考文献

[1] 韦盈, 刘冬妮, 康蕊, 等. 甜瓜果实不同部位矿物元素含量分析[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(7): 74–83.
WEI Y, LIU DN, KANG R, *et al.* Analysis of mineral element contents in different parts of muskmelon fruit [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2024, 37(7): 74–83.

[2] CHEN C, ZHANG H, ZHANG X, *et al.* The effect of different doses of ozone treatments on the postharvest quality and biodiversity of cantaloupes [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 163(2): 111124.

[3] WU JX, XU ZL, ZHANG YJ, *et al.* An integrative analysis of the transcriptome and proteome of the pulp of a spontaneous late-ripening sweet orange mutant and its wild type improves our understanding of fruit ripening in citrus [J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(6): 1651–1671.

[4] 赵嘉宇. 两种薄皮甜瓜果实采后贮藏特性及成熟软化机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
ZHAO JY. Study on postharvest storage characteristics and ripening softening mechanism of two thin-skinned melon cultivars [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.

[5] 梁芳菲, 王小容, 邓丽莉, 等. 采后柑橘果实糖酸代谢研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(10): 268–274.
LIANG FF, WANG XR, DENG LL, *et al.* Research progress on sugar and acid metabolism in postharvest citrus fruits [J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(10): 268–274.

[6] 鲍甜甜, 王硕硕, 王建全, 等. “羊角蜜”甜瓜不同部位发育及品质差异形成机制研究[J]. 植物生理学报, 2021, 57(1): 149–158.
BAO TT, WANG SS, WANG JQ, *et al.* Study on the developmental process and quality difference formation mechanism of different parts of “Yangjiaomi” melon [J]. Plant Physiology Journal, 2021, 57(1): 149–158.

[7] 杨永, 翟文强, 张学军, 等. 新疆厚皮甜瓜果实可溶性糖积累规律及其差异分析[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(1): 1–8.
YANG Y, ZHAI WQ, ZHANG XJ, *et al.* Study on accumulation regularity and difference analysis of soluble sugars in postharvest thick-skinned melon fruits from Xinjiang [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(1): 1–8.

[8] 斯越秀, 胡妙君, 汪财生, 等. 贮藏温度对哈密瓜“黄皮9818”采后营养品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(2): 210–212.
SI YX, HU MJ, WANG CS, *et al.* Effects of storage temperature on postharvest nutritional quality of Hami Melon ‘Yellow Skin 9818’ [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(2): 210–212.

[9] MA J, YIN N, WANG P, *et al*. Bioaccessibility of essential elements and arsenic in brown rice, milled rice, and bran: Implications for consumer choices [J]. Food Research International, 2025, 214(6): 116651.

[10] ZENG W, CHEN L, LI Y, *et al.* The effect of *in vitro* digestion on the chemical and antioxidant properties of *Lycium barbarum* polysaccharides [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108507.

[11] ROCCHETTI G, TOMAS M, ZHANG L, *et al*. Red beet (*Beta vulgaris*) and amaranth (*Amaranthu* ssp.) microgreens: Effect of storage and *in vitro* gastrointestinal digestion on the untargeted metabolomic profile [J]. Food Chemistry, 2020, 33(2): 127415.

[12] HUALU Z, YUNBING T, JULIAN DM. Applications of the INFOGEST *in vitro* digestion model to foods: A review [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2023, 14: 135–156.

[13] LI C, YU W, WU P, *et al*. Current *in vitro* digestion systems for understanding food digestion in human upper gastrointestinal tract [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 114–126.

[14] ZACCARI F, CABRERA CM, SAADOUN A, *et al*. Glucose content and *in vitro* bioaccessibility in sweet potato and winter squash varieties during storage [J]. Foods, 2017, 6(7): 48–48.

[15] FU S, BI J, JIANG X, *et al.* Effect of different food matrices on the bioaccessibility of vitamin D_3 in beverage systems: Comparison between juice and liquid milk [J]. Food Chemistry, 2024, 460(P3): 140756.

[16] MARTÍNEZ-CASTRO J, DE HARO-BAILÓN A, OBREGÓN-CANO S, *et al.* Bioaccessibility of glucosinolates, isothiocyanates and inorganic micronutrients in cruciferous vegetables through INFOGEST static *in vitro* digestion model [J]. Food Research International, 2023, 166: 112598.

[17] BÜŞRA D, MURAT G, JALE Ç, *et al. In vitro* bioaccessibility of vitamins B_1, B_2, and B_3 from various vegetables [J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133944.

[18] 梁昕景, 夏玲, 王学林, 等. 基于隶属函数法对 34 份黄皮厚皮甜瓜种质资源的综合评价[J]. 热带农业科学, 2022, 42(3): 39–44.
LIANG XJ, XIA L, WANG XL, *et al.* Comprehensive evaluation of 34 germplasm resources of yellow-skinned thick-skinned melons based on membership function method [J]. Tropical Agricultural Science, 2022, 42(3): 39–44.

[19] MOHSIN MK, AZHER MN, MAHMOOD SA, *et al.* Rootstock–scion interaction mediated impact on fruit quality attributes of thick-skinned melon during storage under different temperature regimes [Z]. 2023.

[20] 王欣云. 1-MCP 处理对‘灯笼红’甜瓜果实采后生理和保鲜效果的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
WANG XY. Effect of 1-MCP treatment on postharvest physiology and preservation effect of ‘Denglonghong’ melon fruits [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

[21] 侯田莹, 宋曙辉, 李武, 等. 不同品种西瓜常温贮藏期间品质变化及贮藏特性研究[J]. 现代食品科技, 2011, 27(3): 242–245.
HOU TY, SONG SH, LI W, *et al.* Study on quality changes and storage characteristics of different watermelon cultivars during storage at room temperature [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(3): 242–245.

[22] 马慧, 刘艳, 汪可心, 等. 甜瓜果实采后贮藏期间糖含量及相关代谢酶活性变化[J]. 现代园艺, 2024, 47(21): 59–61.
MA H, LIU Y, WANG KX, *et al.* Changes in sugar content and related metabolic enzyme activities of melon fruits during postharvest storage [J]. Modern Horticulture, 2024, 47(21): 59–61.

[23] 丁小礼, 张红宇. 2018. 南康甜柚采后常温贮藏营养成分及品质的变化[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(24): 185–189.
DING XL, ZHANG HY. Changes in nutritional components and quality of postharvest nankang sweet pomelos during storage at room temperature [J]. Food Research and Development, 2018, 39(24): 185–189.

[24] PALMONARI A, CAVALLINI D, SNIFFEN CJ, *et al. In vitro* evaluation of sugar digestibility in Molasses [J]. Italian Journal of Animal Science, 2021, 20(1): 571–577.

[25] 王晓婷, 沈琦, 盘菊秀, 等. 不同产区甜瓜果肉 6 种营养素生物可及性差异及其与土壤元素含量的回归分析[J]. 中国农业科学, 2025, 58(4): 779–791.
WANG XT, SHEN Q, PAN JX, *et al.* Differences in bioaccessibility of 6 nutrients in melon pulp from different producing areas and regression analysis with soil element contents [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(4): 779–791.

[26] LATULIPPE ME, SKOOG SM. Fructose malabsorption and intolerance: Effects of fructose with and without simultaneous glucose ingestion [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2011, 51(7): 583–592.

[27] SINGH A, RAIGOND P, LAL KM, *et al.* Effect of cooking methods on glycemic index and *in vitro* bioaccessibility of potato (*Solanum tuberosum* L.) carbohydrates [Z]. 2020.

[28] 勿吉斯古冷, 沈琦, 张忠祥, 等. 生育后期甜瓜果实中营养成分累积变化机制研究[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(4): 875–883.
WU JSGL, SHEN Q, ZHANG ZX, *et al.* Study on the accumulation and change mechanism of nutritional components in melon fruits at the late growth stage [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2023, 45(4): 875–883.

[29] HELENA DOS, FERNANDA CR, CARLOS HP *et al.* Vitamin and bioactive compound diversity of seven fruit species from south Brazil [J]. Journal of the science of food and agriculture, 2018, 99(7): 3307–3317.

[30] UĞUR H, ÇATAK J, MIZRAK FÖ, *et al.* Determination and evaluation of in vitro bioaccessibility of added vitamin C in commercially available fruit-, vegetable-, and cereal-based baby foods [J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127166.

[31] AKÇA NS, SARGIN SH, MIZRAK FÖ, *et al.* Determination and assessment of the bioaccessibility of vitamins B_1, B_2, and B_3 in commercially available cereal-based baby foods [J]. Microchemical Journal, 2019, 150: 104192.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)