

果胶与多酚相互作用机制及其对食品加工特性影响的研究进展

张璇, 赵文, 高哲, 李美娇, 吴梦颖, 周茜

Research Progress on the Interaction Mechanism of Pectin and Polyphenol and Their Effect on Food Processing Characteristics

ZHANG Xuan, ZHAO Wen, GAO Zhe, LI Meijiao, WU Mengying, and ZHOU Qian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023030201>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多酚与蛋白质相互作用研究方法进展

Progress in Research Methods for the Interaction between Polyphenols and Proteins

食品工业科技. 2018, 39(24): 340-345 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.24.058>

多酚-蛋白质相互作用分析技术研究进展

Advances in Analytical Techniques of Polyphenol-Protein Interaction

食品工业科技. 2021, 42(14): 371-379 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070099>

原花青素生理功能及其与肠道微生物相互作用的研究进展

Physiological Functions and Interactions with Gut Microbiota of Proanthocyanidins

食品工业科技. 2020, 41(10): 350-357 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.10.059>

磷脂与食品中蛋白质相互作用机制及对蛋白质特性的影响研究进展

Interaction Mechanism between Phospholipids and Food Proteins and Effect on Protein Properties: A Review

食品工业科技. 2020, 41(17): 345-351 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.058>

茶多酚-蛋白质相互作用的研究进展

Research Progress on Tea Polyphenol-Protein Interaction

食品工业科技. 2019, 40(8): 337-342,349 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.08.056>

多酚的功能性质及与蛋白质、多糖相互作用研究进展

Advances in Studies on the Functional Properties of Polyphenols and Their Interactions with Proteins and Polysaccharides

食品工业科技. 2021, 42(11): 405-413 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070358>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张璇, 赵文, 高哲, 等. 果胶与多酚相互作用机制及其对食品加工特性影响的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 378–386.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030201

ZHANG Xuan, ZHAO Wen, GAO Zhe, et al. Research Progress on the Interaction Mechanism of Pectin and Polyphenol and Their Effect on Food Processing Characteristics[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 378–386. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030201

· 专题综述 ·

果胶与多酚相互作用机制及其对食品加工特性影响的研究进展

张璇¹, 赵文^{1,2}, 高哲¹, 李美娇¹, 吴梦颖¹, 周茜^{1,*}

(1. 河北农业大学食品科技学院, 河北保定 071000;

2. 河北省农产品加工工程技术研究中心, 河北保定 071000)

摘要: 果胶和多酚共存于植物性食品体系中。除天然存在的果胶-多酚复合物外, 在受到加热、高压、干燥等外力作用的食物加工过程中, 两者会快速且自发地进行相互作用。果胶与多酚之间的相互作用会影响食品的理化性质和功能特性。本文总结了果胶与多酚相互作用的机制、内部和外部多重影响因素、主要的研究方法并结合 Langmuir 和 Freundlich 常见的等温吸附模型对果胶与多酚之间的吸附行为进行描述和定量表征。此外还探讨了两者相互作用对食品加工特性及多酚生物可利用性的影响, 分析了该领域的研究方向和发展趋势。

关键词: 果胶, 多酚, 相互作用, 等温吸附模型, 生物可利用性

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)01-0378-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030201

本文网刊:



Research Progress on the Interaction Mechanism of Pectin and Polyphenol and Their Effect on Food Processing Characteristics

ZHANG Xuan¹, ZHAO Wen^{1,2}, GAO Zhe¹, LI Meijiao¹, WU Mengying¹, ZHOU Qian^{1,*}

(1. College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China;

2. Engineering Technology Research Center for Agricultural Product Processing of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: The pectin and polyphenols that co-exist in plant-based food systems form complexes in natural conditions and interact quickly and spontaneously during food processing due to external forces, such as heating, high pressure, and drying. The interaction can affect the physicochemical properties and functional properties of foods. This review summarizes the mechanisms, multiple internal and external influencing factors, and main research methods involved in pectin and polyphenol interaction, while their adsorption behavior is described and quantitatively characterized using the isothermal adsorption model commonly used by Langmuir and Freundlich. In addition, the impact of pectin and polyphenol interaction on food processing characteristics and polyphenol bioavailability is also discussed, and the future research prospects and development trends in this field are analyzed.

Key words: pectin; polyphenol; interactions; isothermal adsorption models; bioavailability

果胶是一种酸性杂多糖, 广泛存在于蔬菜、水果和谷物等植物细胞壁中, 在人类健康中发挥着重要的作用^[1]。在膳食结构中, 果胶的合理摄入, 在降脂、减压、降糖、提高机体免疫力、缓解便秘以及胃肠道疾

病等方面具有重要的作用^[2]。多酚是一类植物次生代谢物, 主要存在于高等植物的叶片和果实中, 参与调节植物信号转导等多种功能, 是植物生存所必需的^[3-4]。同时, 多酚也是一种重要的生物活性成分, 具

收稿日期: 2023-03-21

基金项目: 河北省重点研发计划项目 (20327120D)。

作者简介: 张璇 (1997-), 女, 硕士, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: zhangxuanwzj@163.com。

* 通信作者: 周茜 (1986-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: zhouqian@hebau.edu.cn。

有抗炎、抗氧化、抗肥胖等多种有益于人体健康的保健作用,广泛应用于食品、生物、医药等领域^[5-7]。目前,果胶与多酚之间相互作用引起了学者们的广泛关注,两者之间相互作用的机制也不断被揭示和认识,研究表明果胶与多酚之间的相互作用主要是由氢键等非共价键驱动的,并形成非共价复合物,这种复合物与体系中多酚经体内外消化过程中的物理稳定性、抗氧化活性和生物可利用性密切相关,也影响着果胶和多酚的生理健康功效,此外,还可以通过非共价复合物的相互作用来调控食品的加工特性^[7-9]。本文综述了近十年来果胶与多酚之间相互作用的机制及其对食品加工特性影响,并对未来果胶与多酚之间相互作用的研究方向及发展趋势进行了展望。

1 果胶与多酚

1.1 果胶

果胶是由 D-半乳糖醛酸通过 α -1,4 糖苷键连接而成的酸性杂多糖(图 1),相对分子质量介于 20~400 kDa 之间,多存在于初生细胞壁和胞间层,对维持细胞壁的三维骨架结构具有重要作用^[10]。果胶主要来源于植物果实、根、茎、叶,常以原果胶、果胶、果胶酸的形态存在。根据酯化度的不同,果胶分为高甲氧基果胶和低甲氧基果胶,其中酯化度高于 50% 的果胶为高甲氧基果胶(high methoxyl pectin, HMP),酯化度低于 50% 为低甲氧基果胶(low methoxyl pectin, LMP)^[11]。根据分子主链和支链结构的不同,可分为富含半乳糖醛酸(galacturonic acid, GalA)的同型半乳糖醛酸区(homogalacturonan, HG)、富含中性糖分支区域的鼠李糖半乳糖醛酸-I 区(rhamngalacturonan I, RG-I)和鼠李糖半乳糖醛酸-II 区(rhamngalacturonan II, RG-II)三类^[12-13]。其中, HG 区域被称为果胶的“平滑区”,而 RG-I 和 RG-II 区域统称为“毛发区”,分别构成果胶的线性骨架和分支结构^[14]。HG 区大约是由 100 个无支链的 D-聚半乳糖醛酸残基通过 α -1,4 糖苷键连接而成,约占果胶的 65% 左右,其中甲基化修饰主要发生在 C-6 羧基部分,而乙酰化修饰发生在 O-2 或 O-3 原子上。RG-I 和 RG-II 区域分别为果胶的主要和次要分支结构,以含有 1,2- α -L-鼠李糖-1,4- α -D-半乳糖醛酸二聚体的形式延伸为主要特征,其中富含 L-阿拉伯糖和 D-半乳糖的侧链可被鼠李糖残基取代^[14-15]。研究表明,不同原材料

和提取工艺所得到的果胶在相对分子质量上存在较大的差异性,并具有高度的结构多样性^[16]。

目前,商业化果胶主要来源于柑橘、苹果和甜菜等,因具有良好的乳化性、增稠性、凝胶性和稳定性等特点,被广泛应用于果汁、果酒、饮料中,在食品的稳定性和色泽、风味等方面发挥着重要作用^[17-19]。通过改性方法得到的果胶分子在医药方面具有很好的应用,如通过改性试验合成的高分子果胶纳米纤维能够在水相中保持较高的稳定性,在预防和治疗 I 型糖尿病方面具有很好的应用潜力^[20]。果胶还是吸附剂的理想原料,甜菜糟粕果胶能够有效地吸附 II 型汞离子,在食品安全方面也具有较强的应用价值^[21]。

1.2 多酚

多酚是一类以苯酚为基本骨架,苯环多羟基取代为主要特征的植物次生代谢产物的总称,目前已发现的结构大约有 8000 多种^[22-23]。多酚主要根据芳香环及所连羟基数量和位置的不同而进行分类,可分为酚酸类、黄酮类和单宁类^[24]。常见的多酚种类及结构如图 2 所示。酚酸是一类含有酚环和至少一个羧基的有机酸类物质,根据主要基团的不同,可分为以 C_6-C_1 为主的羟基苯甲酸和从苯甲酸中衍生的以 C_6-C_3 为主的羟基肉桂酸。黄酮是一类基于 2-苯基色原酮-4-酮骨架的化合物,根据 C 环与 B 环的连接位置以及 C 环的不饱和程度,可进一步分为黄酮、黄酮醇、黄烷酮、黄烷醇、花色苷、二氢黄酮醇、异黄酮^[25-26]。单宁是一类复杂的高分子多元酚类化合物,可分为水解单宁和缩合单宁两大类。水解单宁是指酚酸及其衍生物与葡萄糖或多元醇通过酯键连接而成的化合物,如鞣花单宁;缩合单宁是由黄烷醇及其衍生物通过 C_4-C_8 或 C_4-C_6 的 C-C 共价键缩合而成的聚合物,如原花青素^[27]。除以上分类外,多酚还包括姜黄素、白藜芦醇、辣椒素、黄连素及番茄红素等^[6]。

2 果胶与多酚之间的相互作用机制

果胶与多酚之间的共价相互作用,主要以天然存在的形式表现在细胞壁多糖与多酚之间的共价作用方面,如麸皮中阿拉伯木聚糖会通过酯键共价连接阿魏酸,以增强细胞壁强度^[28]。Wang 等^[29]研究发现枣里的酚类物质主要是以糖苷结合型和不溶性酚类这两种形式存在。

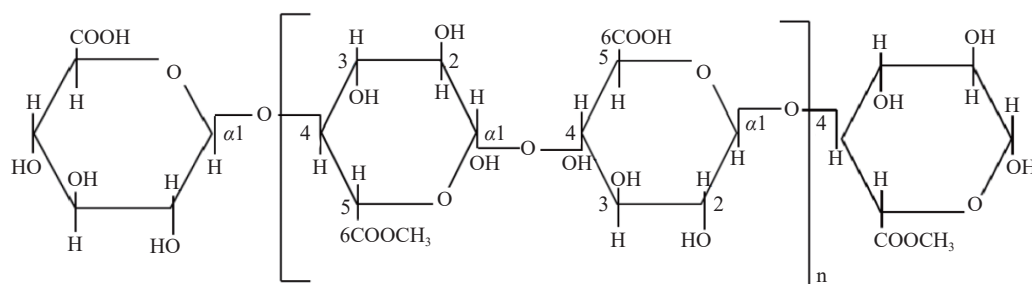


图 1 果胶分子基本结构式

Fig.1 The basic structure of pectin

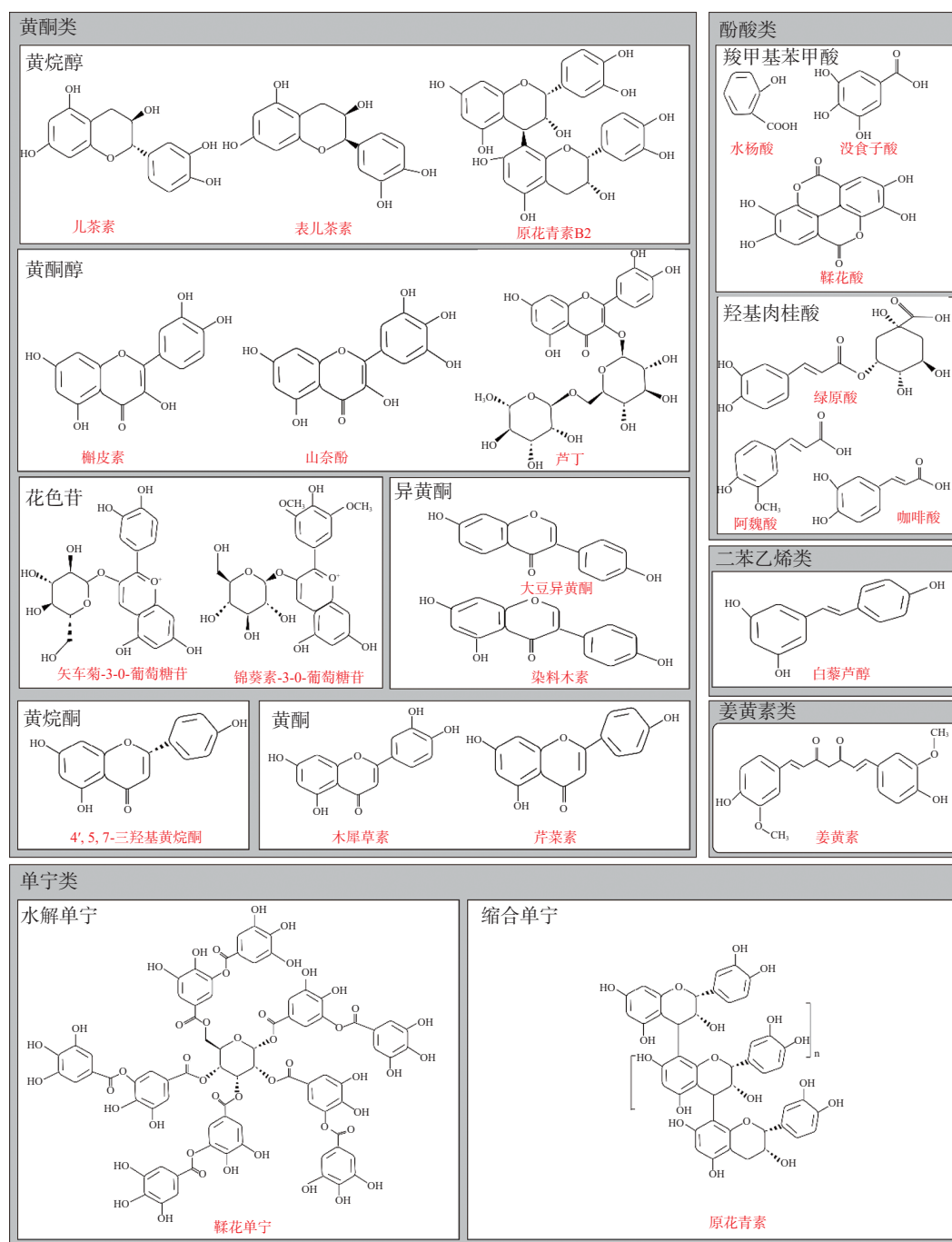


图2 多酚常见的种类及化学结构

Fig.2 Types and chemical structures of common phenolic compounds

果胶与多酚之间的非共价相互作用主要是在食品模拟体系中进行研究,作用机制包括氢键、疏水作用和静电作用等,这种相互作用具有可逆性和不稳定性等特点^[26,30-32](图3)。Dominguez等^[33]建立了芒果加工模拟体系,研究发现,芒果果胶与绿原酸、原儿茶酸、没食子酸和香草酸等4种酚酸的相互作用都是由氢键驱动的,且没食子酸与芒果果胶的亲合力最强,受果胶的影响最大,这可能与具有3个羟基和苯环第5位上的羟基有关。王玥^[34]研究发现,柿果胶与柿单宁之间的相互作用主要是由疏水相互作用驱动的。Liu等^[35]在煮沸和干燥的加工体系中研究发现,苹果果胶含量的增加会导致其与绿原酸的吸

附量减少,且减少129%~311%,这可能与两者之间的静电排斥作用有关。

3 果胶和多酚相互作用的影响因素

3.1 果胶结构对相互作用的影响

果胶的提取方式、来源以及结构特性会影响其与多酚之间的相互作用。Koh等^[13]采用乙酸和EDTA辅助乙酸提取方法,获得了蓝莓来源的水溶性果胶(water soluble fraction, WSF)和螯合性果胶(chelator soluble fraction, CSF),结果表明两种果胶与花青素之间的相互作用具有显著差异,CSF与花青素的结合量最大为243 μg/mg果胶,约为WSF的4倍,其原因可能是CSF线性结构较多、中性糖侧链较少,

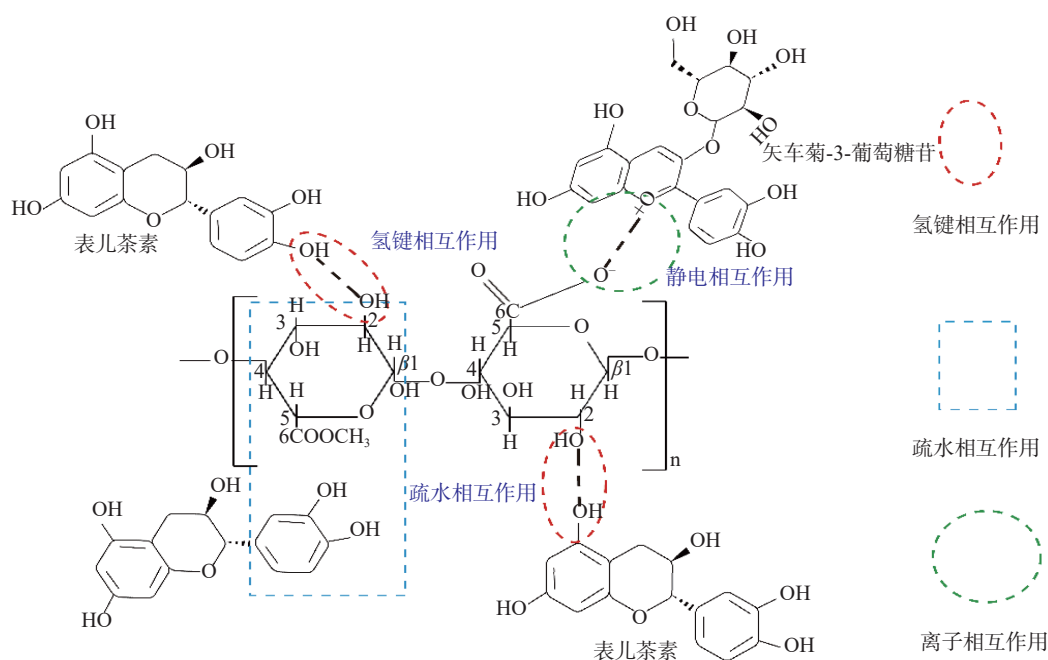


图 3 果胶与多酚(表儿茶素和矢车菊-3-葡萄糖苷)之间的非共价作用机制

Fig.3 Non-covalent forces between pectin and polyphenols(epicatechin and cyanidin-3-glucoside)

导致其空间位阻效应降低,进而提高了与花青素之间的相互作用。Liu 等^[36]采用柠檬酸-磷酸盐法,提取了苹果、甜菜和猕猴桃等不同来源的果胶,结果表明,具有高线性度、高半乳糖醛酸含量和低阿拉伯分支等结构特性会导致果胶空间位阻效应降低,进而增强了果胶与原花青素的相互作用。Watrelet 等^[37]研究发现高甲氧基果胶与原花青素的结合能力更强,这可能与高甲氧基可以增加果胶分子链的自由度,进而促进与原花青素的结合有关。

3.2 多酚结构对相互作用的影响

多酚的种类和分子结构是影响果胶与多酚之间相互作用的另一重要因素。Liang 等^[38]通过建立果汁模拟体系研究了儿茶素和原花青素与柑橘果皮果胶之间的相互作用,结果表明儿茶素与柑橘果皮果胶之间的相互作用主要是由疏水相互作用驱动的,而原花青素与柑橘果皮果胶之间主要是由离子相互作用驱动的,与此同时,儿茶素/原花青素与柑橘果皮果胶偶联后会引起其本身抗氧化活性的降低。Fernandes 等^[39]通过建立绿原酸、根皮苷和原花青素与果胶的模拟体系,阐明了相比于绿原酸和根皮苷,聚合度较高的原花青素与果胶的结合更多。Mamet 等^[40]研究发现原花青素分子中没食子酸部分和 A 型黄烷键的存在,增强了其与果胶的氢键和离子结合类型。

3.3 外界因素对相互作用的影响

pH、温度、离子浓度等外界因素也会影响果胶与多酚之间的相互作用。

3.3.1 pH pH 是影响果胶和多酚之间相互作用最重要的因素之一。pH 主要通过影响两者之间的静电相互作用进而影响两者之间的结合。Lin 等^[41]研究发现,在不同的 pH 下,蓝莓 WSF、CSF 和碱溶性果

胶(sodium carbonate soluble fraction, NSF)与花青素展现出不同的结合能力,且这种结合能力具有 pH 依赖性。CSF 在 pH2.0~3.6 和 NSF 在 pH3.6~4.5 时,与花青素具有更强的结合能力。同样地, Koh 等^[13]研究也揭示了 pH 在低于 2.6 时蓝莓果胶与花青素之间具有强相互作用,但随着 pH 的增加,结合相互作用相对减弱。

3.3.2 温度 温度对果胶与多酚之间的相互作用具有重要的意义。温度主要是通过影响氢键和疏水相互作用进而影响两者之间的结合。Zhang 等^[42]发现菜籽粕来源的果胶与阿魏酸的结合量,随着温度的升高而呈现先升高后降低的变化趋势,这是因为温度升高导致疏水键的生成,两者的结合量升高,随后,当温度持续升高时,阿魏酸分子运动加剧,氢键显著减弱,进而导致其结合量下降。Le Bourvellec 等^[43]研究发现,温度与苹果细胞吸附原花青素的量呈现负相关性,这可能意味着温度的变化引起了氢键的变化。Zhang 等^[44]研究表明,温度与山楂果胶结合表儿茶素的量呈现正相关,这可能源于温度的升高引起疏水键的生成,进而提高其两者之间的结合量。

3.3.3 离子浓度 离子浓度可以通过改变离子强度进而影响果胶与多酚之间的相互作用。若两分子间的结合量与离子浓度呈正相关,则可能是发生了疏水相互作用,反之则不易发生疏水相互作用。托尔坤·买买提^[45]研究发现,在 0.5~1 mol/L 的范围内,随着离子浓度的升高,果胶与柿单宁之间的相互作用受到抑制,表明两者之间不太可能发生疏水相互作用。Le Bourvellec 等^[43]研究发现,随着离子浓度的提高,苹果细胞壁多糖与原花青素的结合量逐渐提高,可能是由于逐渐增强了两者的疏水相互作用。

4 果胶与多酚相互作用表征

由于研究目标和任务的不同,对果胶与多酚相互作用的研究方法也具有多样性。其中,光谱法、浊度分析法、扫描电子显微镜观测法、动态光散射技术和等温滴定量热法是研究两者相互作用最常用的方法,其中光谱法和浊度分析法是最简便、易操作的研究方法。而电子显微镜观测法、动态光散射技术和等温滴定量热法则是从微观和机制方面研究两者之间的相互作用,是相对前沿的技术手段。值得注意的是,每种方法都具有各自的优势和局限性,因此在研究果胶与多酚之间的相互作用过程中,多种方法联用更能有效地证明果胶与多酚之间的相互作用表现和机制。

4.1 光谱法

紫外-可见吸收光谱法和红外光谱法是研究果胶与多酚之间相互作用机制最常用的方法。Zhang等^[44]通过观察275和326 nm处紫外可见吸收峰峰强的降低,以及FT-IR特征吸收峰的消失,进而初步证实了山楂果胶与表儿茶素和绿原酸之间的相互作用属于化学性结合作用。王玥^[34]通过FT-IR法明确了柿果胶与柿单宁之间的结合且没有新峰产生,初步阐明了两者之间的非共价相互作用。

4.2 浊度分析法

浊度是指溶液对光线通过时所产生的阻碍程度,试验中可通过光密度或吸光值的高低反映浊度的大小,研究表明浊度大小取决于溶质颗粒大小、浓度、形状以及形成颗粒的光散射指数,并可作为间接表征分子间相互作用的一种方法^[46]。Liu等^[36]采用浊度分析法研究果胶和原花青素之间的相互作用,结果表明,在650 nm处与果胶和原花青素的吸光度值相比,随着果胶浓度的增加,复合体系的吸光度值增加了2~14倍,此外通过浊度的高低也可以间接反映两者之间相互作用的程度。浊度分析也被应用于研究果胶和柿子单宁之间的相互作用,研究表明,相比于果胶和柿单宁的吸光度值,随着果胶浓度的增加,复合体系的吸光度值呈现先下降后升高的趋势,从侧面反映出相互作用过程中聚合物的生成^[47]。

4.3 扫描电子显微镜观测法

扫描电子显微镜观测法是一种利用电子束扫描样品表面,从而获得样品信息的电子显微技术。因其具有制样简单、高分辨率、高放大倍数等特点,在描述复合物表面微观特征方面得到了广泛地应用^[48]。Liang等^[38]研究发现,相比于果胶的微观结构,果胶与儿茶素/原花青素的复合物展现出更多的蜂窝状孔隙结构,这可能是由于果胶与儿茶素/原花青素的分子间和分子内氢键结合所致,这与Li等^[49]所研究的膳食纤维与没食子酸/儿茶素结合后其表面呈现出许多孔隙和裂缝的变化具有一致性。同样地,崔灵敏等^[50]采用SEM技术研究表明,相比于芒果果胶微观结构,芒果果胶-原花青素复合物具有较多的触角型细

丝且表面光滑无孔洞,这可能是由于相互作用改变了果胶分子链间的聚合。此外,研究表明阿魏酸呈现针状晶体,富含阿拉伯糖果胶多糖呈现碎片状,两者相互作用后明显改变了富含阿拉伯糖果胶多糖的碎片状表面特征,呈现聚集的块状^[42]。

4.4 动态光散射技术

动态光散射技术也称作光子相关光谱或准弹性光散射,是一种物理表征手段,用来测量溶液或悬浮液中的粒径分布,广泛应用于研究果胶与多酚之间的相互作用。Riou等^[51]采用动态光散射技术监测葡萄酒多糖存在时葡萄酒单宁的胶体行为,研究表明葡萄酒单宁在贮藏过程中容易在模型溶液中聚合,10 h内颗粒大小从几百发展到1000 nm。此外,不同果胶的存在对初始聚合的形成没有影响,但会在不同程度上降低聚合速率,这可能在一定程度上取决于果胶的类型。崔灵敏等^[50]采用DLS研究了芒果果胶与原花青素之间的相互作用,发现与果胶溶液的粒径相比,复合体系的粒径从700 nm显著降低至300 nm,这可能是由于复合物改变了果胶的链状结构或影响了果胶的链聚合作用,进而减小复合体系的粒径,使复合溶液体系更稳定。

4.5 等温滴定量热法

等温滴定量热法(isothermal titration calorimetry, ITC)是通过利用热力学原理,研究大分子物质之间相互作用的一种重要方法,因具有灵敏度高、检测范围广等优点,在果胶与多酚中也得到了应用。该方法能够准确地检测和记录相互作用的热量变化情况并获得完整热力学参数,包括化学计量(n)、结合常数(Ka)和结合焓(H)。此外,分子间结合的吉布斯自由能(ΔG)、焓变(ΔH)和熵变(ΔS)之间的关系可以用Van't Hoff方程定义为: $\Delta G = -RT \ln K_a = \Delta H - T\Delta S$ 。Liang等^[38]采用ITC技术揭示了柑橘果胶与原花青素主要是通过静电相互作用驱动的($\Delta H < 0$, $\Delta S > 0$ 且 $|\Delta H| \approx |\Delta S|$),而疏水相互作用是柑橘果胶和儿茶素之间的主要驱动力($\Delta H > 0$, $\Delta S < 0$ 且 $|\Delta H| < |\Delta S|$)。王玥^[34]研究了柿果胶与柿单宁之间的氢键和疏水相互作用,结果显示 $\Delta G < 0$, $\Delta H < 0$, $\Delta S > 0$,这些结果表明,焓变和熵变共同驱动了两者之间的自发放热反应。

5 果胶与多酚相互作用的等温吸附模型研究

等温吸附模型是在一定的温度条件下,描述吸附剂的平衡吸附容量与吸附物的平衡浓度之间关系的数学式。Langmuir和Freundlich是两种最常见的等温吸附模型,在果胶与多酚相互作用的等温吸附机理研究方面发挥着重要的作用^[52,35]。

5.1 Langmuir等温吸附模型

Langmuir等温吸附模型为单层吸附模型,假设溶质分子在吸附剂表面的吸附达到最大时为饱和状态,吸附位点数量有限且相同。它很好地考虑了温度对试验的影响,并能预测最大吸附量($q_{\max}$),但此等

温吸附模型与实际有区别。Langmuir 等温吸附模型被应用于研究 WSF 和 CSF 对花青素结合选择性的影响,结果表明 CSF 与花青素的最大吸附量($q_{\max}$) 在 1413~1904 $\mu\text{g}/\text{mg}$ 果胶之间,约为 WSF 的 8 倍^[13]。Phan 等^[53] 通过建立以果胶为主要成分的细胞壁模型,利用 Langmuir 等温吸附模型拟合了果胶与儿茶素、阿魏酸和矢车菊-3-葡萄糖苷之间的吸附行为,研究表明,果胶与矢车菊-3-葡萄糖苷之间的吸附量最高(809 $\mu\text{g}/\text{mg}$ 细胞壁),而与阿魏酸最低(435 $\mu\text{g}/\text{mg}$ 细胞壁),这可能是电荷效应引起的。

5.2 Freundlich 等温吸附模型

Freundlich 等温吸附模型是描述吸附剂表面具有不同吸附位点的经验吸附模型,无假定条件,此模型除可拟合最大吸附量外,还可得到与吸附不均一性有关的常数(n)。当 $1/n=1$ 时为均质吸附,当 $0<1/n<1$ 时为非均质吸附。Liu 等^[35] 采用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型拟合了 3 个品种的苹果细胞壁对表儿茶素、根皮苷和绿原酸的吸附行为,结果表明,Langmuir 适用于所有情况的拟合($R^2 \geq 0.97$),而 Freundlich 仅适用于 3 个品种的苹果细胞壁对表儿茶素的吸附行为拟合($R^2 \geq 0.98$),且 $0<1/n<1$,表明该吸附行为符合非均质吸附。Zhang 等^[44] 采用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型拟合了山楂果胶与表儿茶素和绿原酸之间的吸附行为,结果表明 Langmuir 略优于 Freundlich 的拟合结果,且 Langmuir 拟合结果显著高于实际的吸附量,这与 Phan 等^[53] 的研究具有一致性。

以上拟合结果的差异性可能与果胶和多酚的结构密切相关,且最适拟合模型要与实际吸附过程和条件相结合。同时,不同参数的数学模型反映了相互作用的不同方面,它们可以联合使用来反映吸附过程。值得注意的是,数学等温模型参数仍然需要更好地与化学、物理和结构方面联系起来,这样才更有实际的意义和价值。

6 果胶与多酚相互作用对食品加工特性的影响

6.1 对食品涩味的影响

果胶与多酚之间相互作用对食品体系的涩味具有一定的影响且具有重要的应用价值。托尔坤·买买提^[45] 基于电子舌模型,研究了柿单宁-果胶复合物的涩味,结果表明,柿单宁与果胶以质量比为 1:5 相互作用时,形成的复合物能有效降低柿单宁本身的涩味。这一结果与王玥^[34] 制备柿果胶-单宁复合物具有较低的涩味具有一致性。在模拟苹果酒体系中,果胶的适当加入,可以有效地改善果酒入口后单宁与口腔蛋白质相互作用产生的涩味^[54]。还有研究阐明,果胶与多酚之间的相互作用可以提高体系粘度,这有利于降低酚类物质引起的涩味^[55]。Haghighi 等^[56] 也报道了果胶与多酚相互作用很好地改善了其本身口感差、水溶性差等缺点,这一发现对食品以及医药行业都有很好的参考价值。

6.2 对食品功能特性的影响

果胶与多酚之间的相互作用还会影响食品的功能特性,如提高食品体系抗氧化和抗癌活性等方面具有重要的作用。白海娜等^[57] 通过果实破壁、打浆等食品加工过程,使果蔬细胞破裂后果胶与原花青素接触来研究两者之间的相互作用,研究结果表明,果胶与原花青素、儿茶素等多酚混合后不仅对抗氧化的效果具有协同效应,而且还增强了复合体系的抗癌效应。相似的结果也表现在研究黑木耳多糖与原花青素之间的相互作用,结果表明,两者之间的相互作用不仅能够显著性地提高机体的抗氧化状态和免疫能力,还能抑制脾脏细胞凋亡,并对辐射诱导的氧化损伤具有保护作用^[58]。唐玉妹^[59] 发现,竹笋膳食纤维与多酚相互作用后所构建的膳食纤维-多酚复合体系,增强了多酚体系的抗氧化活性和贮藏稳定性。

6.3 对食品品质特性的影响

果胶与多酚之间的相互作用也会在一定程度上对食品品质产生影响如稳定食品色泽和增强浊汁体系稳定性等方面具有重要的意义。Le Bourvellec 等^[60] 通过模拟梨罐头加工过程,探究了梨片从米白色变成粉红色的变化机理。结果表明,在加工过程中,梨中的原花青素被降解成花青素,与细胞壁多糖结合后显出稳定的粉红色。任佳琦等^[8] 通过建立苹果浊汁模拟体系,探究了 5 mg/mL 苹果果胶与不同浓度的根皮苷、绿原酸和表儿茶素之间相互作用对浊汁体系稳定性的影响。结果表明,0.03 mmol/L 根皮苷与果胶相互作用后,提高了复合体系的浊度稳定性,其他多酚复合体系的浊度稳定性均无显著变化。这种现象可能归因于果胶对不同结构多酚表现出不同的结合能力。Le Bourvellec 等^[61] 揭示了在模拟浑浊苹果汁体系中,果胶竞争性地结合原花青素单体儿茶素,导致体系中较大颗粒的形成,增强了模拟果汁体系的稳定性。

7 果胶与多酚相互作用对多酚生物可利用性的影响

多酚的生物可利用性是指其在消化过程中从食物基质中释放出来并被小肠吸收的量。水溶性多酚易溶于水,在大多数食品体系中的溶解性较好,但因其结构中含有多个酚羟基基团,对光、高温、碱性条件不稳定,很容易被氧化、分解和转化,进而导致其具有较低的生物可利用性。脂溶性多酚除在光、高温、碱性条件引起其降解和转化外,还因其本身溶解性差等特点,使其生物可利用性较低^[27,62-63]。无论是水溶性还是脂溶性多酚都存在生物利用率低的问题,可通过果胶与多酚相互作用,来达到调控多酚生物利用率的目的。研究表明果胶与多酚相互作用对多酚生物可利用性的影响是非常复杂的^[64],且对多酚的生物可利用性起到协同或拮抗的作用。Nagar 等^[65] 研究结果表明,花青素在肠道消化和转运的过程中,其生物可及性显著降低了 70%,而 Koh 等^[66] 揭示了 WSF

和CSF的加入能在一定程度上阻止花青素类化合物的降解,增强花青素在胃肠消化过程中的生物可及性,进而有助于提高其本身的生物可利用性。除此之外,相互作用还表现出降低多酚生物可利用性的特点。由此,明确果胶与多酚之间的相互作用对多酚生物可利用性的影响,为更好地提高多酚的生物活性和发挥营养健康效益具有至关重要的作用。

8 结论和展望

本文综述了近十年来果胶与多酚之间的相互作用,重点分析了两两者之间相互作用的表征、影响因素、作用机理及对多酚生物可利用性和食品加工特性的影响。果胶与多酚之间的相互作用,主要是由疏水作用、氢键、离子键等非共价作用力驱动的,不仅能影响多酚的生物可利用性,而且在改善食品涩味、功能、品质等加工特性方面 also 具有重要的意义。在此基础上,仍存有一些问题需进一步阐明和研究,例如a.从等温吸附方程得到的参数,仍需要与相互作用的物理化学和结构等方面紧密地联系在一起;b.应更好地探索不同加工技术对果胶与多酚相互作用的影响,为更好地应用食品加工生产提供理论基础;c.深入研究果胶与多酚相互作用后形成的复合物在消化、吸收、代谢特性方面及对肠道菌群的影响;d.阐明两者之间的相互作用是否具有潜在的营养健康效益,如降低肿瘤、糖尿病和肥胖等慢性疾病的功效。

参考文献

- [1] WU Y, WU W, FARAG M A, et al. Functionalized cellulose nanocrystal embedded into citrus pectin coating improves its barrier, antioxidant properties and potential application in food[J]. *Food Chemistry*, 2023, 401: 134079.
- [2] ZHU F. Interactions between cell wall polysaccharides and polyphenols[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(11): 1808-1831.
- [3] CHEYNIER V, HALBWIRTH H, STICH K, et al. Foreword focus on polyphenols[J]. *Planta*, 2017, 246(2): 183.
- [4] 张杰, 党斌, 杨希娟. 植物多酚的生理活性、抑菌机理及其在食品保鲜中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(24): 1-11. [ZHANG J, DANG B, YANG X J. Research progress on physiological activity, antibacterial mechanism of plant polyphenols and its application in food preservation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(24): 1-11.]
- [5] VELDERRAIN-RODRIGUEZ G R, PALAFOX-CARLOS H, WALL-MEDRANO A, et al. Phenolic compounds: Their journey after intake[J]. *Food & Function*, 2014, 5(2): 189-197.
- [6] 陈南, 高浩祥, 何强, 等. 植物多酚与淀粉的分子相互作用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(2): 1-12. [CHEN N, GAO H X, HE Q, et al. A review of the molecular interaction between plant polyphenols and starch[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(2): 1-12.]
- [7] 易翠平, 刘爽, 林本平, 等. 谷物中多酚与多糖之间相互作用的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(4): 187-193. [YI C P, LIU S, LIN B P, et al. Research progress on interaction between polyphenols and polysaccharides in cereals[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(4): 187-193.]
- [8] 任佳琦, 刘昕, 雷琳, 等. 苹果多酚/果胶相互作用及其对油汁体系理化特性和稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(10): 14-22. [ZHENG J Q, LIU X, LEI L, et al. Interaction between apple polyphenols and pectin and its effect on the physicochemical properties and stability of turbid juice[J]. *Food Science*, 2021, 42(10): 14-22.]
- [9] 郑佳. 果酒中蛋白质、多糖、多酚的相互作用及其澄清初步研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019. [ZHENG J. Preliminary study on the interaction and clarification of protein, polysaccharide and polyphenol in fruit wine[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.]
- [10] 徐仰仓, 赵炳赫, 衣丽霞, 等. 果胶的结构、提取及应用研究进展[J]. *福建技术师范学院学报*, 2021, 39(5): 437-442. [XUE Y C, ZHAO B H, YI L X, et al. Research progress on the structure, extraction and application of pectin[J]. *Journal of Fujian Polytechnic Normal University*, 2021, 39(5): 437-442.]
- [11] 陈芳, 张悦. 果胶作为生物活性成分包埋载体研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(6): 220-224. [CHEN F, ZHANG Y. Advances of pectin as embedded carrier with biological active ingredients[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(6): 220-224.]
- [12] 任佳琦, 李福香, 雷琳, 等. 原花青素与果胶相互作用对果蔬加工特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(12): 83-88. [REN J Q, LI F X, LEI L, et al. Effects of interactions between procyanidins and pectins on processing properties of fruits and vegetables: A review[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(12): 83-88.]
- [13] KOH J, XU Z, WICKER L. Binding kinetics of blueberry pectin-anthocyanins and stabilization by non-covalent interactions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 99: 105354-105354.
- [14] 王胜, 孟昆, 罗会颖, 等. 果胶甲酯酶的结构与功能研究进展[J]. *生物工程学报*, 2020, 36(6): 1021-1030. [WANG S, MENG K, LUO H Y, et al. Research progress in structure and function of pectin methylesterase[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, 36(6): 1021-1030.]
- [15] 易建勇, 毕金峰, 刘璇, 等. 果胶结构域精细结构研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(7): 292-299. [YI J Y, BI J H, LIU X, et al. A review: Domain fine structure of pectic polysaccharides[J]. *Food Science*, 2020, 41(7): 292-299.]
- [16] 许馨予, 毛小雨, 杨鹤隽, 等. 天然植物果胶的提取及其在食品工业中的应用现状[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(8): 115-122. [XU X Y, MAO X Y, YANG H J, et al. Extraction of natural plant pectin and its application in food industry[J]. *China Food Additives*, 2020, 31(8): 115-122.]
- [17] 赵凯, 曹雪丹, 方利明. 橘皮果胶在酸性乳饮料中的应用及其展望[J]. *浙江柑橘*, 2018, 35(1): 2-4. [ZHAO K, CAO X D, FANG L M. Application and prospect of orange peel pectin in acidic milk beverage[J]. *Zhejiang Ganju*, 2018, 35(1): 2-4.]
- [18] 邓卓丹. 不同品种芒果果皮中果胶提取及其性质研究[D]. 海口: 海南大学, 2020. [DENG Z D. Study on mixed culture fermentation of mango slurry by lactic acid bacteria and yeast[D]. Haikou: Hainan University, 2020.]
- [19] 王撼辰. 典型化学加工条件对苹果果胶与多酚复配物流变、凝胶及质构特性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019. [WANG Z H. Impacts of typical chemical processing conditions on the rheological, gel and textural properties of apple pectin and apple polyphenols compound[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.]
- [20] 邹澄飞. 低酯果胶在预防1型糖尿病中的作用及机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [WU C F. The role and mechanism of low-methoxyl pectin in the prevention of type 1 diabetes[D]. Wuxi:

Jiangnan University, 2020.]

[21] 马新芳,温自成,刘志勇. 甜菜干粕果胶对 Hg(II) 的吸附性能研究[C]. 热烈庆祝中国化学会成立 80 周年——中国化学会第 16 届反应性高分子学术研讨会论文集, 2012: 83–85. [MA X F, WEN Z C, LIU Z Y. Study on the adsorption of Hg(II) by pectin from dried beet pulp[C]. Celebrating the 80th Anniversary of the Founding of Chinese Chemical Society-Proceedings of the 16th Chinese Chemical Society Symposium on Reactive Polymers, 2012: 83–85.]

[22] FRAGA C G, GALLEANO M, VERSTRAETENS V, et al. Basic biochemical mechanisms behind the health benefits of polyphenols[J]. *Molecular Aspects of Medicine*, 2010, 31(6): 435–445.

[23] 王晓燕. 多酚对荞麦蛋白物化、营养及结构性质的影响[D]. 广州:华南理工大学, 2010. [WANG X Y. The effects of polyphenols on physicochemical, nutritional and structural properties of buckwheat protein[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.]

[24] 程周周. 基于多酚—蛋白分子互作的低敏牛乳蛋白体系构建及机制研究[D]. 杭州:浙江工商大学, 2022. [CHENG Z Z. Construction and mechanism of hypoallergenic milk protein system based on polyphenol-protein molecular interaction[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2022.]

[25] LIU X, LE BOURVELLEC C, RENARD C M G C. Interactions between cell wall polysaccharides and polyphenols: Effect of molecular internal structure[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(6): 3574–3617.

[26] OLAGARAY K E, BRADFORD B J. Plant flavonoids to improve productivity of ruminants - A review[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2019, 251: 21–36.

[27] 任顺成,陈佳乐,陶华. 多酚对淀粉慢消化作用及其生物利用率研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 133–140. [REN S C, CHEN J L, TAO H. Research progress on the effect of polyphenols on slow digestion of starch and its bio availability[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2022, 43(3): 133–140.]

[28] 陈彩薇,吴晖,赖富饶,等. 米糠中不同存在形态酚类物质的抗氧化活性研究[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(2): 42–46, 13. [CHEN C W, WU H, LAI F R, et al. Study on the antioxidant activity of different forms of phenolic compounds in rice bran[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 31(2): 42–46, 13.]

[29] WANG B N, LIU H F, BIN ZHENG J, et al. Distribution of phenolic acids in different tissues of jujube and their antioxidant activity[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(4): 1288–1292.

[30] 王丽颖,李福香,杨雅轩,等. 多糖与多酚相互作用机制及其对多酚特性的影响研究进展[J]. *食品科学*, 2017, 38(11): 276–282. [WANG L Y, LI F X, YANG Y X, et al. Interaction mechanism between polyphenols and polysaccharides and effect on polyphenolic properties: A review[J]. *Food Science*, 2017, 38(11): 276–282.]

[31] JAKOBEK L, MATIC P. Non-covalent dietary fiber-polyphenol interactions and their influence on polyphenol bioaccessibility[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 83: 235–247.

[32] 田子昂,郑丽丽,艾斌凌,等. 蛋白质-多酚-淀粉三元体系的相互作用与功能影响研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(11): 348–355. [TIAN Z A, ZHENG L L, AI B L, et al. Research progress on the interaction and functional effect of protein - polyphenol - starch ternary system[J]. *Food Science*, 2023, 44(11): 348–355.]

[33] DOMINGUEZ AVILA J A, VILLEGAS OCHOA M A, AL-

VAREZ PARRILLA E, et al. Interactions between four common plant-derived phenolic acids and pectin, and its effect on antioxidant capacity[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2018, 12(2): 992–1004.

[34] 王玥. 柿果胶与单宁互作及其对柿果涩味的影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2019. [WANG Y. The interaction between persimmon pectin and persimmon tannin and its effect on the astringency of persimmon[D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2019.]

[35] LIU D J, LOPEZ-SANCHEZ P, MARTINEZ-SANZ M, et al. Adsorption isotherm studies on the interaction between polyphenols and apple cell walls: Effects of variety, heating and drying[J]. *Food Chemistry*, 2019, 282: 58–66.

[36] LIU X, RENARD C M G C, ROLLAND-SABATE A, et al. Exploring interactions between pectins and procyanidins: Structure-function relationships[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106498.

[37] WATRELOT A A, LE BOURVELLEC C, IMBERTY A, et al. Interactions between pectic compounds and procyanidins are influenced by methylation degree and chain length[J]. *Biomacromolecules*, 2013, 14(3): 709–718.

[38] LIANG T, JIAO S, JING P. Molecular interaction between pectin and catechin/procyanidin in simulative juice model: Insights from spectroscopic, morphology, and antioxidant activity[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(6): 2445–2456.

[39] FERNANDES P A R, LE BOURVELLEC C, RENARD C M G C, et al. Interactions of arabinan-rich pectic polysaccharides with polyphenols[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 230: 115644.

[40] MAMET T, YAO F, LI K-K, et al. Persimmon tannins enhance the gel properties of high and low methoxyl pectin[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 86: 594–602.

[41] LIN Z, FISCHER J, WICKER L. Intermolecular binding of blueberry pectin-rich fractions and anthocyanin[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 986–993.

[42] ZHANG D, ZHU J, YE F, et al. Non-covalent interaction between ferulic acid and arabinan-rich pectic polysaccharide from rapeseed meal[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 103: 307–315.

[43] LE BOURVELLEC C, GUYOT S, RENARD C. Non-covalent interaction between procyanidins and apple cell wall material Part I. Effect of some environmental parameters[J]. *Biochimica Et Biophysica Acta-General Subjects*, 2004, 1672(3): 192–202.

[44] ZHANG X, LI M, ZHAO W, et al. Hawthorn juice simulation system for pectin and polyphenol adsorption behavior: Kinetic modeling properties and identification of the interaction mechanism[J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2022, 11(18): 2813.

[45] 托尔坤·买买提. 柿单宁与果胶相互作用研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2017. [TORKUN·Mamet. Study on the interaction between persimmon tannins and pectins[D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2017.]

[46] CHYLEK P. Absorption and scattering of light by small particles. By C. F. Bohren and d. R. Huffman[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(18): 3166.

[47] MAMET T, GE Z-Z, ZHANG Y, et al. Interactions between highly galloylated persimmon tannins and pectins[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 106: 410–417.

[48] 陈超,樊海丽,蔡志威,等. 扫描电子显微镜在缓释微球制剂表征中的应用进展[J]. *分析测试技术与仪器*, 2022, 28(2): 132–138. [CHEN C, FAN H L, CAI Z W, et al. Progress in characterization of controlled release microspheres using scanning electron mi-

- croscopy[J]. *Analysis and Testing Technology and Instruments*, 2022, 28(2): 132–138.]
- [49] LI S, LI J, ZHU Z, et al. Soluble dietary fiber and polyphenol complex in lotus root: Preparation, interaction and identification[J]. *Food Chemistry*, 2020, 314: 126219.
- [50] 崔灵敏, 谢笔钧, 孙智达. 果胶与莲原花青素复合物理化性质及体外抑菌活性研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(16): 60–66, 80. [CUI L M, XIE B Y, SUN Z D. Physical and chemical properties of pectin-proanthocyanidin complex and its antibacterial activity *in vitro* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(16): 60–66, 80.]
- [51] RIOU V, VERNHET A, DOCO T, et al. Aggregation of grape seed tannins in model wine - effect of wine polysaccharides[J]. *Food Hydrocolloids*, 2002, 16(1): 17–23.
- [52] WU Z, LI H, MING J, et al. Optimization of adsorption of tea polyphenols into oat beta-glucan using response surface methodology[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(1): 378–385.
- [53] PHAN A D T, FLANAGAN B M, D'ARCY B R, et al. Binding selectivity of dietary polyphenols to different plant cell wall components: Quantification and mechanism[J]. *Food Chemistry*, 2017, 233: 216–227.
- [54] SYMONEAUX R, CHOLLET S, PATRON C, et al. Prediction of sensory characteristics of cider according to their biochemical composition: Use of a central composite design and external validation by cider professionals[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 61(1): 63–69.
- [55] TROSZYNSKA A, NAROLEWSKA O, ROBREDO S, et al. The effect of polysaccharides on the astringency induced by phenolic compounds[J]. *Food Quality and Preference*, 2010, 21(5): 463–469.
- [56] HAGHIGHI M, YARMAND M S, EMAM-DJOMEH Z, et al. Design and fabrication of pectin-coated nanoliposomal delivery systems for a bioactive polyphenolic: Phloridzin[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 112: 626–637.
- [57] 白海娜, 王振宇, 李辉, 等. 五种浆果多酚与黑木耳多糖复合物的辐射防护作用[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(16): 117–120, 124. [BAI H N, WANG Z Y, LI H, et al. Effect of five berry polyphenols and auricularia auricular polysaccharides combination on radiation protection[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(16): 117–120, 124.]
- [58] 白海娜. 黑木耳多糖 AAP-4 与原花青素对辐射诱导氧化损伤协同防护作用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016. [BAI H N. Synergistic protective effect on radiation induced oxidative damage of polysaccharides AAP-4 from auricularia auricular with procyanidins[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.]
- [59] 唐玉妹. 竹笋膳食纤维-多酚复合物的构建及其性能的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022. [TANG Y M. The study on the construction and performance of bamboo shoots dietary fibers-polyphenol complex[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022.]
- [60] LE BOURVELLEC C, GOUBLE B, BUREAU S, et al. Pink discoloration of canned pears: Role of procyanidin chemical depolymerization and procyanidin/cell wall interactions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(27): 6679–6692.
- [61] LE BOURVELLEC C, BOUCHET B, RENARD C. Non-covalent interaction between procyanidins and apple cell wall material. Part III: Study on model polysaccharides[J]. *Biochimica Et Biophysica Acta-General Subjects*, 2005, 1725(1): 10–18.
- [62] 刘夫国. 蛋白质-多酚-碳水化合物共价复合物制备及其对功能因子稳态作用[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. [LIU F G. Fabrication of protein-polyphenol-carbohydrate conjugates and their stabilization effect on functional components[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.]
- [63] 刘甜甜, 吴晓娟, 吴伟. 多酚-膳食纤维相互作用及其影响多酚生物利用率研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(7): 179–187. [LIU T T, WU X J, WU W. Research progress of polyphenol-dietary fiber interaction and its effects on the bioavailability of polyphenols[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(7): 179–187.]
- [64] 易建勇, 赵圆圆, 毕金峰, 等. 细胞壁多糖与酚类物质相互作用研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(9): 269–275. [YI J Y, ZHAO Y Y, BI J F, et al. A review of interactions between cell wall polysaccharides and polyphenols in fruits and vegetables[J]. *Food Science*, 2020, 41(9): 269–275.]
- [65] NAGAR E E, BERENSSTEIN L, KATZ I H, et al. The impact of chemical structure on polyphenol bioaccessibility, as a function of processing, cell wall material and pH: A model system[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 289: 110304.
- [66] KOH J, XU Z, WICKER L. Blueberry pectin and increased anthocyanins stability under *in vitro* digestion[J]. *Food Chemistry*, 2020, 302: 125343.