

酚类化合物与食品大分子 互作代谢研究进展

任霞霞¹, 刘连亮^{1,*}, 张鑫¹, 吴祖芳¹, 吕亚宁², 胡本峰²

(1. 宁波大学海洋学院, 浙江省动物蛋白食品精深加工技术重点实验室, 浙江宁波 315211;

2. 山东省农业机械科学研究院, 山东济南 250100)

摘要: 由于代谢形态变化以及其与食品大分子相互作用等因素的影响, 酚类化合物的体内外生理活常常表现不一致。酚类化合物与脂质、蛋白质和碳水化合物等食品大分子的相互作用是造成这一现象的主要原因。本文综述了酚类化合物与食品大分子之间的相互作用及食品大分子对酚类化合物生物利用度和生理活性的影响, 以期深入探讨酚类化合物的体内代谢机制提供借鉴。

关键词: 酚类化合物, 脂质, 蛋白质, 碳水化合物, 相互作用, 生物利用度

Advance in interactions of phenolic compounds with food macromolecules on digestion and metabolism

REN Xia-xia¹, LIU Lian-liang^{1,*}, ZHANG Xin¹, WU Zu-fang¹, LV Ya-ning², HU Ben-feng²

(1. School of Marine Science, Ningbo University, Deep processing Technology Key Laboratory of

Zhejiang Province Ningbo University Animal Protein Food, Ningbo 315211, China;

2. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: Recent researches indicated that discrepancy of the biological activity *in vivo* and *in vitro* have been discussed due to the interactions of phenolic compounds with compounds present in foods, like carbohydrates, proteins or lipids. Interactions of phenolic compounds with compounds present are the main reason to cause the inconsistency of the biological activity *in vivo* and *in vitro*. The interactions between phenolic compounds with lipids, carbohydrates and proteins was reviewed in this paper, which could provide a reference for understanding metabolic mechanism of phenolic compounds.

Key words: phenolic compounds; lipids; proteins; carbohydrates; interaction; bioavailability

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2017)14-0321-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2017.14.063

酚类化合物是一类广泛存在于植物中的次级代谢产物, 具有抗氧化、清除自由基、抑菌、消炎、抗衰老和防治心血管疾病等生理活性。研究表明, 由于受体内代谢形态以及与其他营养组分相互作用等因素的影响, 酚类化合物的体内生理活性常与体外实验表现不一致^[1]。探讨酚类化合物的生物利用度是理解酚类化合物体内活性差异的关键。

1 酚类化合物的生物利用度

生物利用度是指摄入化合物在肠道中被吸收的百分比, 是评价食品营养物质吸收利用情况的重要指标^[2]。人体摄入酚类化合物后, 只有从食品基质中释放并被小肠吸收后才能发挥其有效生理功能。一般而言, 酚类化合物(尤其是多酚类化合物)的体内生物利用度是很低的。其中, 以异黄酮和没食子酸

的消化吸收率最好, 其次是儿茶素、黄烷酮、槲皮素苷, 而原花青素、酯型儿茶素和花青素的消化吸收率则较低^[3]。然而采用不同测定方法的结果可能存在差异^[4]。剂量也是影响酚类化合物生物利用度的一个因素, 高剂量的咖啡会显著降低其中绿原酸的生物利用度^[5]。此外, 食品大分子也会对酚类化合物的生物利用度产生影响。蛋白质、碳水化合物和脂质等大分子结构比较复杂且往往具有微孔结构, 能够与酚类化合物形成包裹, 进而影响酚类化合物的消化吸收。酚类化合物还可能与食品大分子(如蛋白质)发生沉淀反应, 降低其营养价值、抗氧化活性及其他生理功能^[6]。

2 酚类化合物与食品大分子相互作用的微环境

酚类化合物主要存在于植物性食物中, 植物性

收稿日期: 2016-10-14

作者简介: 任霞霞(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: 1361934475@qq.com。

* 通讯作者: 刘连亮(1983-), 男, 博士, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: hahaliang408@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金(31601476); 浙江省自然科学基金(LQ15C200002)。

表1 酚类化合物和脂质的相互作用

Table 1 Phenolic compounds interaction with lipids

	酚类化合物	脂质	作用结果	参考文献
对乳化性能的影响	绿茶多酚、 红茶多酚	模型乳液(含橄榄油、 磷脂酰胆碱和胆盐)	增加液滴尺寸、降低 橄榄油乳液比表面积	[12]
对脂肪酶活性的影响	苹果多酚	4-甲基伞形酮酞油酸酯	抑制脂肪酶活性且抑制活性 与浓度呈正相关性	[13]
	红茶多酚	脂肪乳剂(含玉米油、 胆酸、胆固醇油酸酯、水)	抑制脂肪酶活性、大鼠血浆甘油三酯的 增加、抑制体重增加和肝脏脂质含量	[14]
对脂质过氧化的抑制作用	槲皮素、芦丁、 咖啡酸、绿原酸、 儿茶素、3,4-二 羟基苯甲酸	葵花籽油乳液	槲皮素、芦丁、儿茶素、 咖啡酸较 α -生育酚和抗坏血酸 能够更好地抑制脂质氧化	[15]
	槲皮素、芦丁、 绿原酸	葵花籽油乳液	槲皮素、芦丁和绿原酸能够抑制 肌红蛋白诱发的脂质氧化;槲皮素能够 抑制铁离子诱导的脂质氧化	[16]
	红酒	黑火鸡肉排	红酒能够抑制肉制品的脂质氧化	[17]
对酚类化合物消化率的影响	可可多酚	可可提取液(含50%脂肪)、 可可粉(含15%脂肪)	脂肪促进了可可多酚的消化率,尤其是 促进原花青素在十二指肠消化率效果显著	[18-19]

食物的天然结构是由细胞壁包裹的含水体系,包括细胞核、细胞质、细胞膜和中央大液泡,这一结构是许多化合物发挥生理活性的基础,也是理解酚类化合物和食品大分子相互作用的基础。大多数经口摄入的果蔬类食品都是未经加工或者轻度加工的,而此时酚类化合物在植物性食品中的原始状态即其初始微观环境。口腔的咀嚼作用是改变这一微环境的第一步,促使部分细胞壁破碎从而释放小部分的酚类化合物和其他营养成分^[7]。

微环境的改变可能影响酚类化合物释放,促使其与食品大分子相互作用,包括化学反应或者物理聚集作用,进而影响酚类化合物的生物利用度及其生理活性,如天然杏仁中的酚类化合物较去皮杏仁具有更好的生物利用度^[8],而牛奶则会降低咖啡中绿原酸的生物利用度^[9]。牛奶也会影响可可多酚的生物利用度,但是在不同的研究中呈现的结果有差异,这可能与可可多酚的浓度有关^[10]。肉桂多酚能够与脱脂大豆面粉形成共聚体,在动物实验中表现出抗胰岛素作用^[11],这也说明微环境改变影响酚类化合物的生物利用度,进而影响其生理活性。

在消化过程中,脂质、蛋白质和碳水化合物等均会对酚类化合物的消化、吸收、代谢和生物利用度产生影响。酚类化合物在结肠微生物菌群的作用下进行分解和代谢,有助于肠道有益微生物生长,促进胃肠功能,而肠道菌群代谢产物又对肠道微生物酶活性和免疫水平产生重要影响。

3 酚类化合物与体内食品大分子的相互作用

3.1 酚类化合物与脂质的相互作用

酚类化合物与脂质的相互作用会对脂质的吸收过程产生影响(表1),进而影响人类健康。脂肪在口腔的咀嚼作用下开始形成乳液,随后到达胃和十二指肠,在胃、肠中,脂肪乳液进一步乳化,同时在脂肪

酶的分解作用下形成更小的粒子。任何影响脂肪乳化过程或者脂肪酶活性的因素都会影响脂肪的吸收利用。绿茶和红茶多酚与磷脂的相互作用会导致橄榄油乳液的液滴尺寸增加、比表面积降低^[12]。从分子极性上分析,磷脂亲水性的头部能够与亲水性的酚类化合物结合。苹果多酚和原花青素能够抑制小鼠和人体的脂肪酶活性,降低甘油三酯水平^[13]。红茶多酚亦能够抑制脂肪酶活性,降低肥胖大鼠的脂肪吸收率,抑制甘油三酯水平的增加,降低大鼠体重^[14]。

早在2003年,Schramm等^[19]发现脂质对黄烷醇吸收率的影响较微弱。然而,从另一个角度而言,脂质可以对酚类化合物形成包裹,“保护”其到达胃肠消化道的下部。对可可多酚的研究表明,增加脂肪含量有助于形成稳定的胶束,提高可可多酚在消化过程中的稳定性,使得可可多酚能够顺利到达小肠以发挥作用^[18]。在这种情况下,酚类化合物可以在肠道发挥其脂质抗氧化等生理学功效,抑制脂质过氧化产物的形成或者降低脂质过氧化产物对人体的损害。Gorelik等^[17]研究发现红酒多酚能够降低大鼠肠道因脂质过氧化而导致的低密度脂蛋白修饰。此外,酚类化合物还可以与脂质形成纳米颗粒以便酚类化合物在胃肠发挥其作用^[20],这对于水不溶性化合物或者pH敏感性化合物的体内运输具有重要意义。

3.2 酚类化合物与蛋白质的相互作用

茶叶与牛奶是研究酚类化合物和蛋白质相互作用的经典模型。绿茶中的黄酮类化合物与牛奶蛋白(主要为酪蛋白)主要通过疏水相互作用、氢键结合,氨基酸残基也能参与酚类化合物-蛋白质的相互作用。Von Staszewski等^[21]研究表明绿茶多酚与 β -乳球蛋白、酪蛋白可以通过疏水相互作用发生聚集作

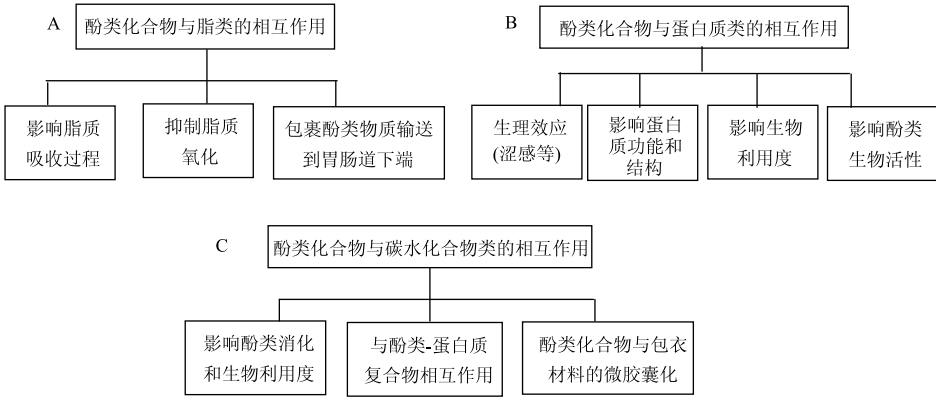


图1 酚类化合物与营养组分的相互作用

Fig.1 Interaction of phenolics with nutrinsents

注:(A)脂质;(B)蛋白质;(C)碳水化合物。

用,形成纳米颗粒。与天然 β -乳球蛋白相比,加热后的 β -乳球蛋白表现出与表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)更好的结合能力,其作用力包括疏水相互作用和氢键^[22]。Frazier 等^[23]的体外实验研究中,绿茶多酚、葡萄籽花青素、高粱花青素与明胶通过多种作用力结合,其中以氢键为主。酚类化合物的结构和分子量是酚类与蛋白相互作用的重要影响因素。小分子酚类化合物对于不同的蛋白质表现出的亲和力差异不大,但是大分子量的酚类化合物却表现出显著差异,如鞣花单宁对明胶表现出强的结合力,但是对牛血清蛋白的亲和力就较弱。酚类化合物分子结构中的羟基数目越多,与蛋白质结合能力也越强^[24]。

酚类化合物和蛋白质的相互作用会对人体产生多种生理效应。单宁可以通过与唾液中的蛋白质发生收敛反应,降低唾液的润滑功能从而在口腔产生不舒适的感觉,使人感到涩味^[25]。这一作用的强弱受到酚类化合物结构、口腔 pH、唾液蛋白类型(酸性、碱性或者富含脯氨酸等)等因素的影响。酚类化合物与蛋白质的结合会改变蛋白质的结构,进而影响其功能。如黄酮类化合物可以与某些必需氨基酸(如赖氨酸、色氨酸和半胱氨酸等)反应,进而改变大豆蛋白的电荷,影响其溶解性或者 pH 特性^[26]。这一作用也受到酚类化合物种类的影响,如绿原酸与 β -乳球蛋白的相互作用不会导致大鼠特定必需氨基酸种类的缺失^[27]。酚类化合物可以改变蛋白质的消化率,还可以通过生物酶的结构来改变其活性。 α -淀粉酶可以水解淀粉生成糖类,可能会导致牙菌斑和龋齿的发生,而酚类化合物与 α -淀粉酶结合后能够有效抑制其生理活性^[28]。酚类化合物还可以降低溶菌酶、糜蛋白酶等活性,减缓食物中蛋白质的水解速度^[29]。

酚类化合物可与蛋白质相互作用影响其生物利用率。阿魏酸和香豆酸可与纤维素酶的芳香族氨基酸残基发生共价反应,增强其活性^[30]。在动物实验中,大豆蛋白可以提高龙蒿酚类化合物的生物利用率^[31]。与脂质的相互作用类似,蛋白质与酚类化合物可以结合形成纳米粒子,蛋白质作为载体可以保护酚类化合物到达胃肠消化道的下部,使酚类化合物在胃肠消化道的下部发挥作用,预防结肠癌等疾

病的发生^[32]。从另一个角度来看,在蛋白质的存在下,酚类化合物的抗氧化作用也会因形成纳米粒子而被暂时“屏蔽”。

3.3 酚类化合物与碳水化合物的相互作用

目前酚类化合物与碳水化合物的相互作用的研究主要是利用体外模型。酚类化合物可以与植物细胞壁的果胶、纤维素或膳食纤维等反应。花青素和酚类化合物能够通过氢键和疏水相互作用与植物细胞壁中纤维素和果胶作用^[7]。植物细胞壁的复杂多孔结构对于碳水化合物和酚类化合物的结合是非常重要的^[33]。研究表明,果胶能够形成疏水口袋对花青素形成包裹,因而表现出强亲和力^[34]。

在酚类化合物与碳水化合物的相互作用中,酚类化合物的生物利用度取决于酚类化合物能否从酚类-碳水化合物聚合物中被释放出来,影响因素包括:酚类化合物的结构,酚类-碳水化合物聚合物结构的复杂性和消化酶作用于碳水化合物的生理活性等。即使酚类化合物没有从酚类-碳水化合物聚合物中释放出来,酚类化合物与碳水化合物的相互作用也可对人体产生积极影响。酚类化合物以酚类-碳水化合物聚合物的形式被输送到大肠,在结肠的酶以及微生物作用下游离出来,能够有效防止结肠癌等消化道癌症的发生^[35]。酚类-碳水化合物聚合物到达结肠后,在肠道微生物作用下进行代谢分解。酚类化合物及其分解代谢产物共同作用,共同创建肠道的抗氧化环境。研究表明,膳食纤维对酚类化合物形成包裹,作为酚类化合物体内运输的良好载体,防止消化道酶对酚类化合物的分解,保护其到达结肠。对黑麦、小麦、燕麦麸皮的研究表明,当这三种植物的细胞壁发生降解,酚类化合物的释放出现增加,肠道微生物能够更直接地作用于膳食纤维,酚类化合物分解、代谢的速率和程度显著增加^[36]。

酚类化合物和碳水化合物的相互作用可以产生复杂的生理效应。一方面,碳水化合物可包裹酚类化合物,降低酚类化合物的生物利用度。全谷物面粉中的木聚糖和木质素与阿魏酸交联,降低阿魏酸的生物利用率^[37]。另一方面碳水化合物也会促进酚

类化合物的生物利用度。Schramm 等人实验表明,碳水化合物(面包)会促进黄烷醇的吸收,这可能是碳水化合物在肠道生理活性(蠕动或者分泌等)特异性调节的结果,也可能是碳水化合物特异性地提高了某种碳水化合物-黄烷醇转运子的结果。另一方面,酚类化合物与膳食纤维的相互作用能够促进脂质、蛋白质、水分等的排泄和降解,对人体脂质代谢、总胆固醇含量、低密度脂蛋白胆固醇含量和甘油三酯水平均表现出积极的影响^[38]。此外,碳水化合物会对酚类化合物与蛋白质的相互作用产生影响。多聚半乳糖醛酸、阿拉伯糖、果胶和黄原胶等能够阻止原花青素 B₃ 与胰蛋白酶的结合^[39]。阿拉伯胶和果胶等能够阻止唾液蛋白和单宁的收敛反应,减轻口腔中的涩味^[21]。酚类化合物和碳水化合物的相互作用也会影响到肠道对碳水化合物的发酵作用。

4 结论与展望

酚类化合物与体内食品大分子(脂质、蛋白质和碳水化合物等)的相互作用是影响其生物利用度和体内生理活性的主要因素。酚类化合物主要通过疏水相互作用与脂质、蛋白质和碳水化合物发生相互作用,其相互作用也包括氢键、共价键和其他一些形式的作用力。酚类化合物与脂质、蛋白质和碳水化合物形成聚合物后,其生理活性发生改变:酚类-脂质聚合物可以降低脂质吸收,减缓脂肪氧化,降低脂肪氧化产物的形成;酚类-蛋白质聚合物可以影响收敛反应,改变蛋白质的生理活性,影响某些氨基酸的生物利用度及一些蛋白质的消化率;酚类-碳水化合物聚合物可以促进脂质代谢、降低血脂水平、影响酚类化合物与其他食品大分子的相互作用等。

酚类化合物与体内食品大分子的相互作用对于创造体内的抗氧化环境是非常重要的,脂质、蛋白质和碳水化合物与酚类化合物形成聚合物后能够成为其良好的载体,保护其到达胃肠部,发挥抗氧化作用,然而其聚合物体内代谢的结构变化尚需要进一步研究。虽然酚类化合物与食品大分子的相互作用可能造成其营养价值降低,但是其表现出的改善食品风味和影响微生物菌群代谢等方面也值得深入探讨。

参考文献

[1] Hollman P, Cassidy A, Comte B, et al. The biological relevance of direct antioxidant effects of polyphenols for cardiovascular health in humans is not established [J]. *Journal of Nutrition*, 2011, 141(5): 989S-1009S.

[2] Palafox-Carlos, Ayala-Zavala H, Gonzalez-Aguilar G. The role of dietary fiber in the bioaccessibility and bioavailability of fruit and vegetable antioxidants [J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(1): R6-R15.

[3] 鲁玉妙, 马惠玲. 植物多酚 SCI 文献计量及生物活性研究热点分析 [J]. *食品科学*, 2013, 23: 375-383.

[4] Czank C, Cassidy A, Zhang Q, et al. Human metabolism and elimination of the anthocyanin, cyanidin-3-glucoside: A (13) c-tracer study [J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2013,

97(5): 995-1003.

[5] Stalmach A, Williamson G, Crozier A. Impact of dose on the bioavailability of coffee chlorogenic acids in humans [J]. *Food and Function*, 2014, 5(8): 1727-1737.

[6] Tomas-Barberan F, Andres-Lacueva C. Polyphenols and health: Current state and progress [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(36): 8773-8775.

[7] Padayachee A, Netzel G, Netzel M, et al. Binding of polyphenols to plant cell wall analogues - part 2: Phenolic acids [J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(4): 2287-2292.

[8] Mandalari G, Tomaino A, Rich G, et al. Wickham. Polyphenol and nutrient release from skin of almonds during simulated human digestion [J]. *Food Chemistry*, 2010, 122(4): 1083-1088.

[9] Duarte G, and Farah A. Effect of simultaneous consumption of milk and coffee on chlorogenic acids' bioavailability in humans [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(14): 7925-7931.

[10] Del Rio D, Borges G, Crozier A. Berry flavonoids and phenolics: Bioavailability and evidence of protective effects [J]. *Br J Nutr*, 2010, 104(3): S67-90.

[11] Cheng D, Kuhn P, Poulev A, et al. *In vivo* and *in vitro* antidiabetic effects of aqueous cinnamon extract and cinnamon polyphenol-enhanced food matrix [J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(4): 2994-3002.

[12] Shishikura Y, Khokhar S, Murray B. Effects of tea polyphenols on emulsification of olive oil in a small intestine model system [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(5): 1906-1913.

[13] Sugiyama H, Akazome Y, Shoji T, et al. Oligomeric procyanidins in apple polyphenol are main active components for inhibition of pancreatic lipase and triglyceride absorption [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(11): 4604-4609.

[14] Uchiyama S, Taniguchi Y, Saka A, et al. Prevention of diet-induced obesity by dietary black tea polyphenols extract *in vitro* and *in vivo* [J]. *Nutrition*, 2011, 27(3): 287-292.

[15] Lorrain B, Dangles O, Genot C, et al. Chemical modeling of heme-induced lipid oxidation in gastric conditions and inhibition by dietary polyphenols [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(1): 676-683.

[16] Lorrain B, Dangles O, Loonis M, et al. Dietary iron-initiated lipid oxidation and its inhibition by polyphenols in gastric conditions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(36): 9074-9081.

[17] Gorelik S, Kanner J, Schurr D, et al. A rational approach to prevent postprandial modification of ldl by dietary polyphenols [J]. *Journal of Functional Foods*, 2013, 5(1): 163-169.

[18] Ortega N, Reguant J, Romero M, et al. Effect of fat content on the digestibility and bioaccessibility of cocoa polyphenol by an *in vitro* digestion model [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(13): 5743-5749.

[19] Schramm D, Karim M, Schrader H, et al. Food effects on the absorption and pharmacokinetics of cocoa flavanols [J]. *Life*

Science, 2003, 73(7): 857-869.

[20] Barras A, Mezzetti A, Richard A, et al. Formulation and characterization of polyphenol-loaded lipid nanocapsules [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2009, 379(2): 270-277.

[21] Von Staszewski M, Jara F, Ruiz A, et al. Nanocomplex formation between β -lactoglobulin or caseinomacropепptide and green tea polyphenols: Impact on protein gelation and polyphenols antiproliferative activity [J]. Journal of Functional Foods, 2012, 4(4): 800-809.

[22] Shpigelman A, Israeli G, Livney Y. Thermally-induced protein-polyphenol co-assemblies: Beta lactoglobulin-based nanocomplexes as protective nanovehicles for egcg [J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(8): 735-743.

[23] Frazier R, Deaville E, Green R, et al. Interactions of tea tannins and condensed tannins with proteins [J]. J Pharm Biomed Anal, 2010, 51(2): 490-495.

[24] Kanakis C, Hasni I, Bourassa P, et al. Milk β -lactoglobulin complexes with tea polyphenols [J]. Food Chemistry, 2011, 127(3): 1046-1055.

[25] Soares S, Mateus N, De Freitas V. Carbohydrates inhibit salivary proteins precipitation by condensed tannins [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(15): 3966-3972.

[26] 江连洲, 胡少新, 李杨, 等. 大豆加工领域的科学技术问题 [J]. 中国食品学报, 2011(9): 98-110.

[27] Petzke K, Schuppe S, Rohn S, et al. Chlorogenic acid moderately decreases the quality of whey proteins in rats [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(9): 3714-3720.

[28] Gonçalves R, Mateus N, De Freitas V. Inhibition of α -amylase activity by condensed tannins [J]. Food Chemistry, 2011, 125(2): 665-672.

[29] 李晓东, 何卿, 郑先波, 等. 葡萄白藜芦醇研究进展 [J]. 园艺学报, 2011(1): 171-184.

[30] Tian Y, Y Jiang, S Ou. Interaction of cellulase with three phenolic acids [J]. Food Chemistry, 2013, 138(2-3): 1022-1027.

[31] Ribnicky D, Roopchand D, Poulev A, et al. Artemisia dracunculus l. Polyphenols complexed to soy protein show enhanced bioavailability and hypoglycemic activity in c57bl/6 mice [J]. Nutrition, 2014, 30(7-8): S4-S10.

[32] Stojadinovic M, Radosavljevic J, Ognjenovic J, et al. Binding affinity between dietary polyphenols and β -lactoglobulin negatively correlates with the protein susceptibility to digestion and total antioxidant activity of complexes formed [J]. Food Chemistry, 2013, 136(3-4): 1263-1271.

[33] Wang Yu-xue, Liu Jia, Chen Fang, et al. Effects of molecular structure of polyphenols on their noncovalent interactions with oat β -glucan [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(19): 4533-4538.

[34] Watrelot A, Le Bourvellec C, Imbert A, et al. Renard. Interactions between pectic compounds and procyanidins are influenced by methylation degree and chain length [J]. Biomacromolecules, 2013, 14(3): 709-718.

[35] Tuohy K, Conterno L, Gasperotti M, et al. Up-regulating the human intestinal microbiome using whole plant foods, polyphenols, and/or fiber [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(36): 8776-8782.

[36] Nordlund E, Aura A, Mattila I, et al. Formation of phenolic microbial metabolites and short-chain fatty acids from rye, wheat, and oat bran and their fractions in the metabolical *in vitro* colon model [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(33): 8134-8145.

[37] Adam A, Crespy V, Levrat - Verny M, et al. The bioavailability of ferulic acid is governed primarily by the food matrix rather than its metabolism in intestine and liver in rats [J]. Journal of Nutrition, 2002, 132(7): 1962-1968.

[38] Saura-Calixto F. Dietary fiber as a carrier of dietary antioxidants: An essential physiological function [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(1): 43-49.

[39] 杨伟, 金曼蕾, 袁芳, 等. 多糖对乳铁蛋白与表没食子儿茶素没食子酸酯聚集的影响 [J]. 中国食品学报, 2015(8): 47-54.

一套《食品工业科技》在手， 纵观食品工业发展全貌