

综述文章

花色苷调控肠道微生物的研究进展

李伊欣, 张芮, 杜佳丹, 刘玉姗, 张雨萌, 刘佳怡, 王敏, 韩林*

食品科学与工程学院, 西北农林科技大学, 咸阳市 712100, 陕西省, 中国

* 通讯作者: 韩林, hanlin2019@nwsuaf.edu.cn

引用格式

李伊欣, 张芮, 杜佳丹, 等. 花色苷调控肠道微生物的研究进展. 食品营养化学. 2024; 2(1): 88.

<https://doi.org/10.18686/zhfnc.v2i1.88>

Li Y, Zhang R, Du J, et al. Research progress of anthocyanins regulating intestinal microorganisms (Chinese). Journal of Food Nutrition Chemistry. 2024; 2(1): 88.

<https://doi.org/10.18686/zhfnc.v2i1.88>

文章信息

收稿日期: 2023-11-21

录用日期: 2024-03-11

发表日期: 2024-03-18

版权信息



版权 © 2024 作者。

《食品营养化学》由 Universe Scientific Publishing 出版。本作品采用知识共享署名 (CC BY) 许可协议进行许可。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

English edition of this article is available online at <https://cae.usp-pl.com/index.php/fnc/article/view/185>

摘要: 花色苷是一种广泛存在于各种果蔬, 以 $C_6-C_3-C_6$ 为骨架的一类糖苷衍生物。除了赋予果蔬鲜艳的色泽外, 花色苷已知对生物体具有抗氧化、改善心血管健康、保护视力、预防肥胖、保护神经以及抗肿瘤的健康效应。本文主要对花色苷的结构、分布、含量以及近年来有关花色苷及其代谢产物对肠道微生物调节的研究进展进行了综述, 以期深入开发富含花色苷的营养健康食品提供理论依据。

关键词: 花色苷; 肠道微生物

1. 花色苷简介

1.1. 花色苷的结构及种类

花色苷具有黄酮类特有的 $C_6-C_3-C_6$ 碳骨架结构, 由花青素和一个或多个糖分子通过糖苷键缩合而成。其中, 花青素的基本结构是 2-苯基苯并吡喃 [1], 并且大多数花青素在其基本结构的 3-, 5-, 7-碳位上有取代羟基 (如图 1 所示)。由于 B 环上 C-3'和 C-5'位上的取代基不同 (羟基或甲氧基), 形成了不同化学性质并呈现不同颜色的花青素 [2,3]。现已确定有近 50 种花青素, 详细加以区分则超过 600 种, 如矢车菊色素 (Cyanidin, Cy)、飞燕草色素 (Delphinidin, Dp)、天竺葵色素 (Pelargonidin, Pg)、芍药色素 (Peonidin, Pn)、矮牵牛色素 (Petunidin, Pt) 和锦葵色素 (Malvidin, Mv) 的衍生物 [4,5], 它们在植物可食部分的分布比例占比较高, 其名称及对应位置上的取代基如表 1 所示 [6]。

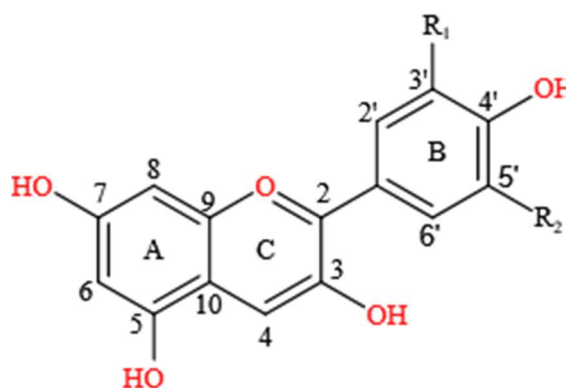


图 1. 花色苷苷元结构。

Figure 1. Structure of anthocyanin aglycone.

表 1. 自然界中常见的花青素种类。

Table 1. Common anthocyanin species in nature.

花青素名称	花青素英文名	R ₁	R ₂	颜色
矢车菊素	Cyanidin, Cy	OH	H	洋红色
飞燕草素	Delphinidin, Dp	OH	OH	洋红色
锦葵素	Malvidin, Mv	OCH ₃	OCH ₃	红色
矮牵牛素	Petunidin, Pt	OH	OCH ₃	紫色
芍药素	Peonidin, Pn	OCH ₃	H	紫色
天竺葵素	Pelargonidin, Pg	H	H	紫色

自然条件下游离状态的花青素极少见，常与一个或多个葡萄糖（glu）、鼠李糖（rha）、半乳糖（gal）、阿拉伯糖（ara）、木糖（xyl）等通过糖苷键连接形成花色苷 [7,8]，其中，3-单糖苷、5-双糖苷、3, 5-二糖苷和 3, 7-二糖苷是最常见的。花青素及其糖苷也存在甲氧基化形式，甲氧基化的位置多数位于 C-3' 和 C-5' [9]。同时，酰化形式也常存在于花色苷中，通常在 C-3 或 C-6 位与香豆酸、阿魏酸、咖啡酸、丙二酸、对羟基苯甲酸等通过酰基键形成 [10]。

1.2. 花色苷的分布及含量

花色苷广泛分布于 27 个科，72 个属植物的不同器官中，如果实、花、茎、叶、根等。这些花色苷通常均匀地溶解于表皮细胞的液泡溶液，在某些物种中，花色苷分布于细胞液泡的离散区域，称为花色苷原生质体 [11]。花色苷在植物中的分布主要分为以下五类，在水果类中，花色苷主要存在于果皮、果肉、花、树叶、树皮等组织中；在蔬菜类中，花色苷主要存在于叶、块茎或表皮组织中；在谷薯类中，花色苷主要存在于种皮、叶、须、颖穗、块茎等组织中；在豆类中，花色苷主要存在于种皮、胚轴、子叶、豆荚、块茎等组织中；在其他植物中，花色苷主要存在于叶、茎、花中 [12]。

植物中花色苷的种类因物种的不同而不同，品种之间的差异也会对花色苷的种类有所影响，而花色苷的含量会因植物种类、品种、栽培方式、季节、生长环境、成熟度、贮存条件的不同而异，常见植物中花色苷的种类及含量如表 2 所示 [13-23]。

表 2. 植物中花色苷的种类及含量。

Table 2. Species and content of anthocyanins in plants.

来源	含量 (mg/100g FW)	主要花色苷
阿龙尼亚苦味果 (<i>Pyrus arbutifolia</i> var. <i>melanocarpa</i>)	506-1000	Cy-3-gal, Cy-3-ara
水果类 红莓苔子 (<i>Vaccinium microcarpum</i>)	300-500	Dp-3-gal, Cy-3-gal, Mv-3-gal
黑醋栗 (<i>Ribes nigrum</i>)	250	Cy-3-(2G-xylosylrutinoside), Cy-3-sam, Cy-3-glu, Cy-3-rut

表 2. (续表)。

Table 2. (Continued).

来源	含量 (mg/100g FW)	主要花色苷
接骨木果 (<i>Sambucus nigra</i>)	200–1560	Cy-3-glu, Cy-3-sam, Cy-3-sam-5-glu, Cy-3-diglu
越橘 (<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L)	180–330	Cy-3-gal, Cy-3-ara, Cy-3-glu, Dp-3-ga, Dp-3-gul, Dp-3-ara, Mv-3-glu
黑莓 (<i>Rubus fruticosus</i>)	90–250	Cy-3-glu, Cy-3-rut
红醋栗 (<i>Ribes rubrum</i> L)	80–810	Cy-3-glu, Dp-3-glu, Cy-3-rut, Dp-3-rut
黑树莓 (<i>Rubus mesogaeus</i>)	76–428	Cy-3-rut, Cy-3-xyl-rut, Cy-3-glu, Cy-3-sam
蓝莓 (<i>Semen Trigonellae</i>)	60–480	Mv-3-gal, Dp-3-gal, Dp-3-ara, Pt-3-gal, Pt-3-ara, Mv-3-ara
橄榄 (<i>Canarium album</i>)	42–228 (干重)	Cy-3-rut, Cy-3-glu, Cy-3-caffeoylrutinoside, Cy-3-(2G-glucosylrutinoside)
水果类		
葡萄 (<i>Vitis vinifera</i> L)	33–751	Cy-3-glu, Dp-3-glu, Pn-3-glu, Pt-3-glu, Mv-3-glu, Mv-3-glu-acetate
酸果蔓 (<i>Oxycoccus</i> Hill)	20–360	Cy-3-gal, Cy-3-glu, Cy-3-ara, Pn-3-ara, Pn-3-gal
草莓 (<i>Fragaria ananassa</i>)	12–36	Pg-3-glu, Cy-3-glu
苹果 (<i>Malus pumila</i>) (皮)	10–2160	Cy-3-gal, Cy-3-ara, Cy-3-glu, Cy-3-xyl
红树莓 (<i>Rubus idaeus</i> L)	10–116	Cy-3-sop, Cy-3-glu, Cy-3-rut, Cy-3-glu-rut
梨 (<i>Pyrus</i>)	5–10 (果皮)	Cy-3-glu, Cy-3-ara
樱桃 (<i>Cerasus pseudocerasus</i>)	4–450	Cy-3-glu, Cy-3-rut
无花果 (<i>Ficus carica</i>) (皮)	3.2–9.7	Cy-3-rut, Cy-3-glu
无花果 (<i>Ficus carica</i>) (肉)	0.15–1.5	Cy-3-rut, Cy-3-glu
茄子 (<i>Solanum melongena</i> L)	750	Dp-3-glu, Dp-3-diglu-5-glu, Dp-5-glu-3-diglu-caffeic acid, Dp-3-rut
紫甘蓝 (<i>Brassica oleracea</i>)	25–203.26	Cy-3-sop-5-glu acylated with p-coumaric, ferulic or sinapyl acids, Cy-3-sop-5-glu
蔬菜类		
马铃薯 (<i>Solanum tuberosum</i> L) (红)	15–45	3-caffeoylferulylsophoroside-5-glu of Cy and Pn
红萝卜 (<i>Daucus carota</i>)	11–60	Pg-3-diglu-5-glu acylated with p-coumaric, ferulic or caffeic acids
洋葱 (<i>Allium cepa</i> L)	5–25	Cy-3-glu, Cy-3-lam
花椰菜 (<i>Brassica oleracea</i>)	4.21	Cy-3-sop-5-glu acylated with p-coumaric or ferulic acids
紫玉米 (<i>Zea mays</i> L)	1779	Cy-3-glu, Cy-3-gal, Pg-3-glu, Pn-3-glu, Cy-3-(6' malonylglucoside)
谷薯类		
紫薯 (<i>Solanum tuberosum</i>)	24.6–53.1	3-caffeoylferulylsophoroside-5-glu of Cy and Pn
稻米 (<i>Oryza sativa</i> L)	10–493	Cy-3-glu, Pn-glu
小麦 (<i>Triticum aestivum</i> L)	0.5–16	Cy-3-glu
豆类		
黑豆 (<i>Glycine max</i> (L.) merr)	1248	Dp-3-glu, Cy-3-glu, Pt-3-glu, Pg-3-glu, Pn-3-glu

表 2. (续表)。

Table 2. (Continued).

来源	含量 (mg/100g FW)	主要花色苷
豆类		
蝶豆 (<i>Clitoria L</i>)	未报道	Dp-3-rut-7,3-di(6-p-coumarylglucoside) and four similar Dp glycosides
海棠花 (<i>Malus spectabilis</i>)	未报道	Cy-3-(3-malonylglucoside), Cy-3-(2-xylosyl-6-caFFEylglucoside)
飞燕草花 (<i>Consolida ajacis</i>)	未报道	Pg-3-rut-7-(6-p-hydroxybenzoylglucoside)
桔梗花 (<i>Platycodon grandiflorus</i>)	未报道	Dp-3-rut-5-(6-p-coumarylglucoside) Dp-3,3-diglu-5-(6-p-coumarylglucoside)
天竺葵花 (<i>Pelargonium domesticum Bailey</i>)	未报道	Dp-3-glu-5-(6-p-coumarylglucoside), Mv-3-(6-acetylglucoside)-5-glu Cy-3-glu-7,3-di-(6-sinapylglu), Pn-3-[6-(3-glucosylcaFFEyl)glu]
其他植物		
牵牛花 (<i>Ipomoea nil</i>)	未报道	Cy-3-glu-5,3-di(6-caFFEylglucoside)Cy-3-glu-5-(6-p-coumarylglucoside), Dp-3,3 -diglu-5-(6-caFFEylglucoside)
龙胆蓝花 (<i>Eustoma grandiflorum</i>)	未报道	Cy-3-(6-malonylglucoside)-7,3-di-(6-sinapylglucoside)
蝴蝶兰 (<i>Phalaenopsis aphrodite</i>)	未报道	

注: Cy 矢车菊素; Pg 天竺葵色素; Dp 飞燕草色素; Pn 芍药色素; Pt 牵牛色素; Mv 锦葵色素; glu 葡萄糖苷; gal 半乳糖苷; xyl 木糖苷; ara 阿拉伯糖苷; diglu 二糖苷; sop 槐糖苷; rut 芸香糖苷。

1.3. 花色苷的消化、吸收与代谢

花色苷及其衍生物可被消化系统吸收, 并广泛运输到各组织器官 [24]。花色苷在摄入后部分被口腔中的细菌和上皮细胞分泌的消化酶消化, 随后进入胃部, 由于胃部 pH 非常低, 花色苷可保持相对稳定的结构, 但在这其中有约 20%–25% 的花色苷以糖苷的形式被吸收。其余未被胃部吸收的花色苷进入肠道被快速代谢。被吸收的花色苷以原型或代谢产物的形式进入血液或被分泌到胆汁和尿液中 [25], 进而运输到全身或者排出体外。

此外, 有研究表明花色苷还会保留在组织中。Kalt 等 [24] 给猪喂食添加蓝莓的饲料 4 周, 然后禁食 18–21 小时后对猪的组织的花色苷成分进行检测。尽管在禁食动物的血浆或尿液中未检测到花色苷, 但在肝脏、眼睛、皮质和小脑中检测到 11 个种花色苷。这表明这部分花色苷保留在组织中, 而不是进入血液循环参加机体代谢或者排除体外, 但是这种保留的机制尚不清楚, 可能涉及亚细胞成分的定位。在另一项研究中, 给大鼠喂食富含黑莓花色苷的食物 15 天, 经检测胃部仅含有天然黑莓花色苷 (Cy-3-glc 和 Cy-3-pen), 而其他器官 (空肠、肝脏和肾脏) 含有天然、甲基化和共轭花色苷 (Cy 和 Pn) [26]。不同器官中花色苷衍生物的比例不同。肝脏呈现出最高比例的甲基化形式, 而空肠和血浆也含有苷元形式。

近年来的研究也通过体外模拟消化进一步研究花色苷的代谢物与生理功能的关系。已有研究证明体外模拟消化对黑果枸杞活性成分和抗氧化性有显著影响 [26]，黑米花色苷可以调控视网膜色素上皮细胞内质网应激增强视网膜色素上皮 (retinal pigment epithelium, RPE) 细胞屏障功能 [27]，黑果枸杞花色苷通过对肥胖小鼠肠道菌群和肝脏转录组的影响预防和治疗肥胖等 [28]。

1.3.1. 花色苷在口腔的消化与吸收

在口腔内影响花色苷消化和吸收的因素有唾液、口腔上皮组织和口腔微生物区系。研究表明，花色苷摄入后，首先在口腔中被初步消化。口腔内微生物菌群和口腔上皮细胞分泌的唾液蛋白酶与 β -葡萄糖苷酶，是花色苷在口腔中降解的关键酶，会使花色苷去糖基化，从而降解成花色苷元及其他降解产物 (图 2)。同时在口腔上皮组织和唾液腺末端导管中分泌与小肠中相似的水解酶，如鸟苷二磷酸葡萄糖醛酸转移酶，也可降解花色苷 [27]。人体研究发现，花色苷经口腔消化后，在唾液中可检测到残留的花色苷苷元、原儿茶酸、矢车菊素-3-葡萄糖苷和葡萄糖醛酸化花色苷等 [14]。

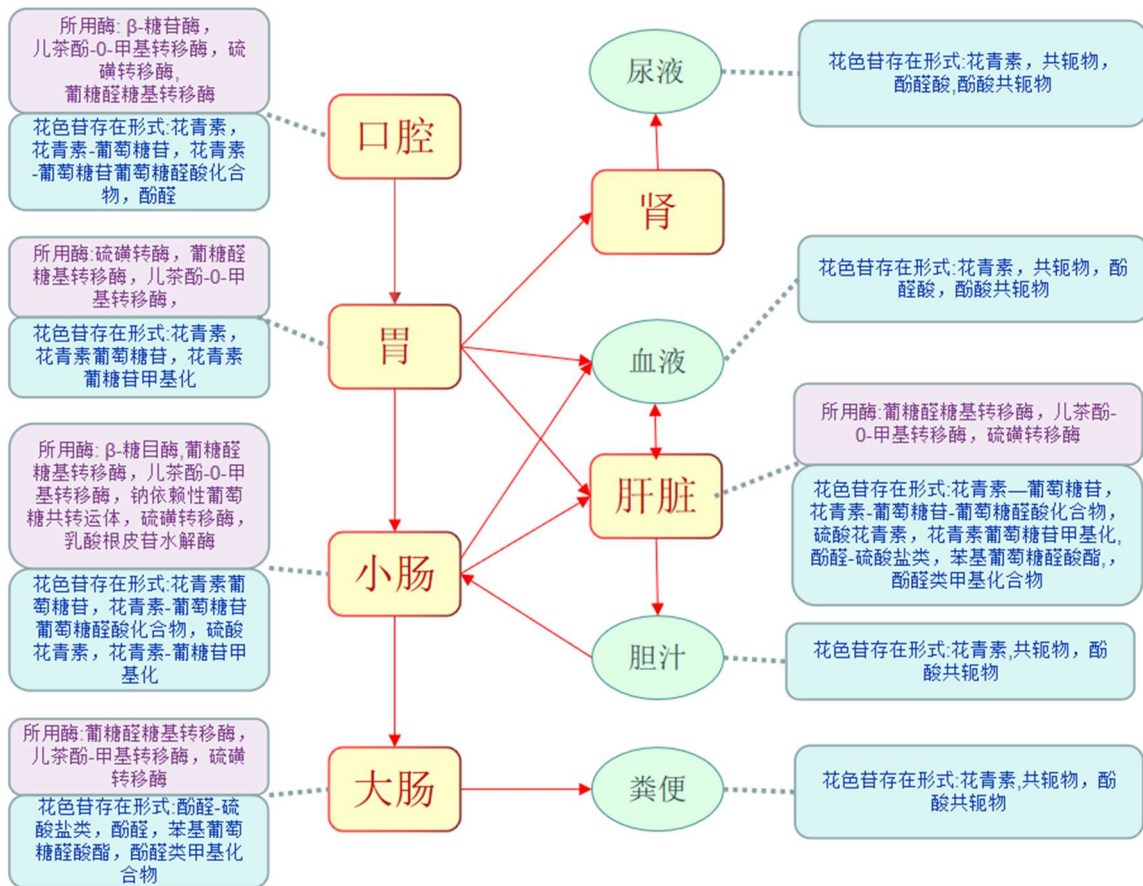


图 2. 花色苷在体内的吸收与代谢。

Figure 2. Absorption and metabolism of anthocyanins in vivo.

1.3.2. 花色苷在胃中的消化和吸收

未被口腔消化的花色在胃部的低 pH、混合气体和代谢活动下代谢分解 [28]。研究表明，胃部环境中的低 pH (1.5–4.0) 环境为花色苷的代谢提供了适宜条件。在 $\text{pH} \leq 2$ 时，花色苷以黄烺盐离子结构稳定存在，花色苷在胃部应保持 2-苯基苯并吡喃结构，这是花色苷的稳定结构，能够通过胃黏膜，同时也可以以糖苷的形式被胃部快速吸收 (大约 20%–25%) [29]。花色苷在胃部的吸收具有饱和效应，表明花色苷的吸收是主动吸收，需要转运系统的协助，但胃部对花色苷的吸收代谢机制仍不明确。而体外实验表明，这种吸收依赖于一些转运蛋白，如葡萄糖转运蛋白 (Glucose Transporter 1, GLUT1)、有机阴离子转运蛋白 (Organic anion transporter 2, OAT2)、单羧酸转运蛋白 (Monocarboxylate Transporters, MCTs) 等 [30]。

在一些体外模拟胃消化试验中，有结果显示经胃消化后的蓝莓花色苷发生了不同程度的减少，如飞燕草色素-3-葡萄糖苷、矢车菊素-3-半乳糖苷及锦葵花色苷-3-葡萄糖苷分别降低了 13.21%，12.59% 和 27.29%，说明在胃消化过程中，消化酶能造成大多数花色苷的损失 [29]。

1.3.3. 花色苷在小肠的消化和吸收

小肠是花色苷在机体中被吸收的主要部位。研究表明，在大鼠小肠原位灌注后，花色苷被迅速有效地消化后吸收代谢 [31]。当花色苷到达小肠接近中性或轻度碱性 ($\text{pH} 7.5\text{--}8.0$) 区域时，其稳定性降低，花色苷 B 环结构发生甲基化和磺基化修饰，其葡萄糖基会发生葡萄糖醛酸化修饰。同时，花色苷在肠道中也发生糖苷键的断裂以及花色苷杂环的开环，形成花青素、原儿茶酸、丁香酸、香草酸、对香豆酸和没食子酸等酚类物质。这些花色苷的代谢产物与肠道生理环境 (pH 和温度)、肠道微生物及肠上皮转运代谢蛋白有关 [32]。小肠对花色苷的降解具有选择性，小肠上皮细胞刷状缘中的乳糖酶-根皮苷水解酶 (lactase phlorizin hydrolase, LPH) 和肠道微生物中的 β -葡萄糖苷酶 (cytosolic β -glucosidase, CBG) 可能是降解花色苷的基础，它们能够将花色苷水解为游离的花色苷元。其中糖苷键的水解是花色苷消化的关键，因为它们的苷元比摄入的糖苷更容易被吸收。研究表明钠依赖性葡萄糖转运体 1 (sodium-dependent glucose transporter 1, SGLT1) 和葡萄糖转运蛋白 2 (glucose transporter 2, GLUT2) 参与了花色苷矢车菊素-3-葡萄糖苷 (Cy-3-G) 在小肠的吸收 [33]。

在一些体外模拟胃消化试验中发现，花色苷在小肠中的稳定性与结构密切相关，糖基配体上的羟基被甲氧基取代越多越稳定，而糖基配体上羟基越多越不稳定。由于小肠弱碱性环境会导致花色苷结构发生破坏，因此蓝莓多酚在小肠消化过程中损失较大，尤其是总酚及总花色苷含量明显减少，同时，蓝莓多酚还会与消化酶形成不溶性物质，从而导致部分多酚不能被人体吸收 [29]。大量研究表明，花色苷在小肠中会快速地代谢，以原型或者代谢物 (糖醛酸化、硫酸化和甲基化衍生物) 的形式进入血液循环或者被分泌到胆汁和尿液中。

1.3.4. 花色苷在结肠的代谢

未被小肠吸收的花色苷进入结肠，在结肠中发生实质性的结构改变。在复杂生理条件或微生物的作用下，进一步降解代谢，形成酚酸如香草酸、原儿茶酸和马尿酸等 [34]。与小肠相似，结肠内的 pH 值呈中性，花色苷苷元会通过 C-环裂解，降解为相应的酚酸和醛。同时结肠是肠道菌群主要的聚居地，肠道菌群被看作是花色苷在结肠代谢的另一个通路，对于花色苷在肠道中漫长的代谢吸收发挥重要的作用，花色苷很大程度上被菌群分解代谢为更简单的化学形式，被迅速去糖基化和脱甲基化。随后花色苷在结肠中代谢后的代谢物以完整的糖苷以及甲基化形式和葡萄糖醛酸化衍生物，被结肠上皮细胞吸收进入血液循环或分泌进入胆汁发挥作用 [32]。花色苷进入血液后多以原型、甲基化或酚酸代谢物等活性形式存在并发挥作用。

大量的体外和体内实验研究均表明，花色苷能直接或间接干预结肠癌的发展。由于在结肠中花色苷原型的形式吸收量少，主要被微生物代谢为各种酚酸。基于花色苷与结肠菌群的相互作用，花色苷能够影响肠道菌群的组成，促进有益菌群增殖，增强有益菌群的代谢能力，从而增加有利菌群代谢物如短链脂肪酸的产出，抑制肠道炎症的发生，可推测花色苷由此途径干预结肠癌的发展 [30]。

1.3.5. 肠道微生物对花色苷的分解代谢

花色苷是小肠、结肠和肝脏中糖苷酶的底物。同时，大多数肠道细菌如双歧杆菌和乳酸杆菌也可产生 β -葡萄糖苷酶。肝脏和肾脏中的酶将花色苷转化为葡萄糖醛酸、甲基化物和硫酸盐，随后可通过胆汁排泄到空肠，并通过肠肝循环系统循环利用 [35]。肠道微生物群可由食物基质中的花色苷进行调节，同时，肠道微生物群（约 10^{13} – 10^{14} 个）也参与花色苷代谢、维生素合成、碳水化合物分解等。体外研究证明，细菌代谢涉及糖苷键的断裂和花色苷杂环（C 环）的分解，降解为间苯三酚衍生物和苯甲酸。此外，还观察到 O-去甲基化 [36]。

Pg-3-O-葡萄糖苷、Cy-3-葡萄糖苷、Dp-3-O-葡萄糖苷、Pn-3-O-葡萄糖苷和 Mv-3-O-葡萄糖苷的主要人体代谢物分别为 4-羟基苯甲酸、原儿茶酸、没食子酸、香草酸和丁香酸 [28]。花色苷部分降解后产生的其他分解代谢产物包括儿茶酚、邻苯三酚、间苯二酚、酪醇、3-(3'-羟基苯基)丙酸和二氢咖啡酸 [33]。Cy-3-O-葡萄糖苷的酶解糖基化可被肠道细菌中的分枝真杆菌和梭状芽孢杆菌催化。经过肠道微生物特定的条件，氰化物可降解为二羟基苯甲酸、三甲氧基苯甲醛和其他几种产品 [37]。Mv-3-O-葡萄糖苷的降解可能与特定的细菌依赖性代谢有关，而 Dp-3-O-葡萄糖苷的减少可能是由于非特定的细菌自身分解代谢所导致。花色苷也可以代谢为原儿茶酸、阿魏酸和马尿酸。桑树中三种花色苷（Cy-3-O-葡萄糖苷、Cy-3-O-芸香苷、Dp-3-O-芸香苷）代谢产生醛和酚酸代谢物（如原儿茶酸和香草酸），这是由于相关酶催化或自发裂解 [38]。根据相关研究数据，总结了肠道微生物群对花色苷的假设代谢如图 3 所示。

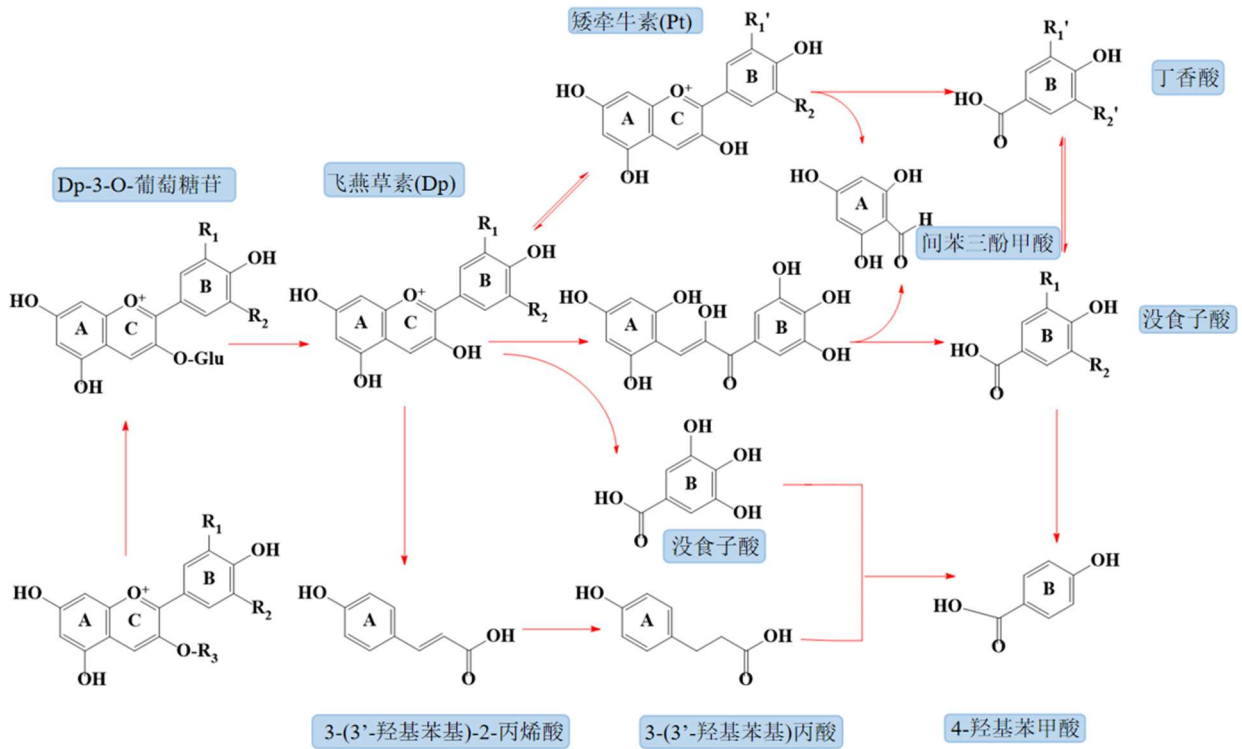


图 3. 肠道微生物群对花色苷的假定代谢 [39]。

Figure 3. Hypothesized metabolism of anthocyanins by intestinal microbiota [39].

注: R1, R2 = H, OH 或 OCH₃; 图中化学式中中文名称均为 R1, R2 = OH, R1', R2' = OCH₃ 时。

2. 花色苷及其代谢产物对肠道微生物的调节

2.1. 花色苷对肠道微生物的调节作用

目前, 随着对肠道微生物研究的深入, 已有充分的证据表明人类肠道微生物群的组成与人体健康密切相关, 同时, 肠道健康在很大程度上取决于宿主与肠道微生物群之间的相互作用 [40]。有多个研究说明多酚单体能够对肠道微生物产生显著影响。多酚能直接抑制一些肠道微生物酶系的活性。研究发现花色苷代谢产物儿茶素能结合在旋转酶 B (GryB) 亚单位的 ATP 结合位点上来抑制了大肠杆菌 DNA 旋转酶 (DNA gyrase) 的活性 [41]。多酚通过调节肠道微生物的种类和数量来使微生物代谢酶种类数量发生改变, 最终影响到酶参与的代谢反应。

另外有研究发现多种多酚物质混合在一起时对肠道微生物种类和数量的调节作用更显著。在体外发酵实验中, 锦葵-3-葡萄糖苷与其他花色苷一起混合作用时, 与单独的锦葵-3-葡萄糖苷比较, 有益菌群生长增加 [42]。研究表明, 多酚类会影响肠道菌群的活性, 即重塑肠道微生物群落的同时也可以增强宿主与微生物之间的相互作用 [35]。高纯度蓝莓花青素 (blueberry anthocyanidin, BA) 对肠道微生物群的影响研究结果表明 BA 可以显著调节肠道微生物的组成和丰度。Chen 等实验表明冻干黑树莓 (*rubus occidentalis*, BRB) 花青素可以

通过维持有益微生物的生长，以及调节肠道微生物群的组成和共生来充当有效的益生元 [43]。

2.2. 花色苷对有害菌的抑制作用

花色苷可以抑制肠道致病菌。动物实验证明，低剂量玉米紫色植株花色苷明显抑制大肠杆菌生长，紫薯花色苷对伤寒沙门氏菌 (*Salmonella*) 和志贺氏菌 (*Shigella Castellani*) 具有良好的抑制效果 [44]。“苦水玫瑰”花色苷对金黄色葡萄球菌产生抑制 [45]。黑莓中总花色苷对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均有不同程度的抑制作用，并且对大肠杆菌的抑制作用强于对金黄色葡萄球菌 [46]，黑米中的花色苷也有相同的作用效果 [47]。蓝靛果花色苷可通过抑制细菌的酶活，影响其代谢，从而抑制大肠杆菌及金黄色葡萄球菌生长 [48]。仙人掌果实花色苷干预可以改变肠道微生物群的多样性和组成，在门水平上，主要是减少了变形菌门；在属水平上，降低了大肠埃希菌和脱硫弧菌属肠道有害菌的相对丰度 [31]。黑米花色苷对大肠杆菌的抑制作用强于金黄色葡萄球菌，二者的最小抑菌浓度分别为 1.5 mg/mL 和 6 mg/mL，且抑菌效果随着花色苷浓度的增加而增强 [33]。

王永刚等 [49]和王奕丁等 [50]的文献报道，抑制微生物生长的机制为：抑制剂和细胞膜上的蛋白质发生反应，使细胞膜变形，破坏 DNA 结构以及酶的活性，使得致病菌代谢紊乱失衡，最后导致细菌失去了生长繁殖的能力；破坏部分微生物细胞壁，使其死亡。

2.3. 花色苷对有益菌的促进作用

花色苷能够改变肠道微生物的组成，增加肠道菌群的多样性，使有益菌群如双歧杆菌等占优势。因此花色苷可通过改变肠道微生物组成，增强有益菌群的代谢，增加如短链脂肪酸、醋酸盐等有利代谢产物的产出增加来干预结肠癌。葡萄酒中的花色苷可以促进乳杆菌和梭杆菌等益生菌生长，并且对梭杆菌属和副杆菌属的生长有促进作用 [51]。紫甘薯酰化花色苷也有类似的作用。研究发现 [52]，枸杞花色苷会影响肠道菌群的丰富度。实验证实，花青素可以增加双歧杆菌、乳杆菌和脱硫弧菌属在肠道内的丰度。因此可以看出，花青素可以代谢形成短链脂肪酸，来发挥功能促进乳杆菌、双歧杆菌等有益微生物的丰度。同时还能被肠道益生菌水解，水解产物与肠道益生菌相互促进而具有更稳定更高效的抗氧化作用 [53]。试验结果证明，葡萄酒花色苷和二甲花翠素-3-O-葡萄糖苷对肠道菌群的影响均具有浓度效应，浓度越高，对肠道菌群的影响时间越长，效果越明显 [32]。

总的来说，花色苷能够通过作用于肠道微生物的酶类，来使肠道微生物菌群达到平衡，促使有害细菌群减少（图 4），增加有益细菌的数量和多样性，从而维持肠道微生物稳态，有利于肠道健康。

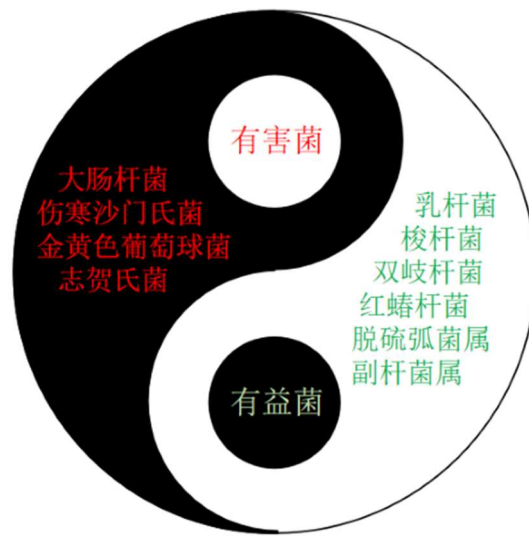


图 4. 花色苷可调节的肠道微生物。

Figure 4. Anthocyanin-regulated intestinal microorganisms.

3. 结论与展望

花色苷是一类广泛存在于多种植物源性食品中的类黄酮类活性成分。我国拥有非常丰富花色苷食用色素资源，如葡萄、蔓越橘、荔枝、芥菜、桑椹、樱桃、血橙、紫苏、紫甘薯、茄子皮、黑（红）米等植物和一些紫色杂粮及其副产物中花色苷含量丰富。流行病学研究表明，食用富含花青素的食物，产生的代谢物可能有助于健康。花色苷主要通过上消化道吸收和内源性酶的直接代谢，以及花色苷在结肠中代谢后的代谢物会被结肠上皮细胞吸收进入血液循环或分泌进入胆汁及尿液。花色苷在肠道的生物利用度是评价其体内生物活性的关键。食用富含花青素的植物性食物有助于平衡肠道微生物菌群，从而有助于预防和改善胃肠道相关疾病，增强宿主健康。同时，花色苷类植物化学物有助于改善心血管疾病（Cardiovascular disease, CVD）相关的氧化应激和慢性炎症等多种生物标志物病理指标，抑制动脉粥样硬化斑块的形成，延缓病程进展。人们可以通过食用深色植物性食品来增加花色苷的摄入量，促进心血管系统健康，预防 CVD 的发生。总体而言，花色苷生物利用度的研究将对人类膳食指南及流行病学的推动具有重要意义。

但依据现有研究表明，花色苷类物质的生物利用度还较低，使得其功能活性的发挥受到一定影响，因此如何提高其生物利用度是未来的重要研究方向。据研究表明花色苷自身结构和性质的稳定性影响着产品的感官、营养及功能性，因此可以通过提高其稳定性来提高花色苷生物利用度。花色苷对肠道微生物有显著的影响，可通过调控肠道菌群的结构，影响人体健康。但目前对花色苷对健康的影响，尤其是通过作用于肠道菌群影响人体健康方面的研究相对较少，后期的研究可针对起作用机制展开，从而更加深刻地理解花色苷的菌群代谢产物以及菌群组成在保护心血管健康上的潜在作用机制，使花色苷能够更有效地应用到预防和辅助治疗 CVD 中。

利益冲突: 作者声明没有潜在的利益冲突。

参考文献

1. Castaldo L, Narváez A, Izzo L, et al. Red wine consumption and cardiovascular health. *Molecules*. 2019; 24(19): 3626. doi: 10.3390/molecules24193626
2. 李琴, 周梦舟, 汪超, 等. 莲原花青素与金属离子相互作用对抗氧化的影响. *中国食品学报*. 2019; 19(2): 37-46. doi: 10.16429/j.1009-7848.2019.02.006
Li Q, Zhou M, Wang C, et al. Effects of interaction between lotus proanthocyanidins and metal ions on antioxidant properties (Chinese). *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*. 2019; 19(2): 37-46. doi: 10.16429/j.1009-7848.2019.02.006
3. 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. *食品与发酵工业*. 2019; 45(12): 83-88. doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.019217
Ren J, Li F, Lei L, et al. Effects of interactions between procyanidins and pectins on processing properties of fruits and vegetables: A review (Chinese). *Food and Fermentation Industries*. 2019; 45(12): 83-88. doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.019217
4. 郑红岩, 刘建兰, 高梦, 等. 蓝莓花青苷的研究现状与展望. *贵州农业科学*. 2014; 42(1): 59-64. doi: 10.3969/j.issn.1001-3601.2014.01.016
Zheng H, Liu J, Gao M, et al. Research status and prospects of blueberry anthocyanins (Chinese). *Guizhou Agricultural Sciences*. 2014; 42(1): 59-64. doi: 10.3969/j.issn.1001-3601.2014.01.016
5. Fang J. Bioavailability of anthocyanins. *Drug Metabolism Reviews*. 2014; 46(4): 508-520. doi: 10.3109/03602532.2014.978080
6. Sui X, Sun H, Qi B, et al. Functional and conformational changes to soy proteins accompanying anthocyanins: Focus on covalent and non-covalent interactions. *Food Chemistry*. 2018; 245: 871-878. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.11.090
7. 王晗, 朱华平, 李文钊, 阮美娟. 桑葚提取物中花青素分析及其体外抗氧化活性研究. *食品与发酵工业*. 2019; 45(15): 170-175. doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.020489
Wang H, Zhu H, Li W, Ruan M. Anthocyanins in mulberry extract and their *in vitro* antioxidant activity (Chinese). *Food and Fermentation Industries*. 2019; 45(15): 170-175. doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.020489
8. Tharrey M, Mariotti F, Mashchak A, et al. Patterns of plant and animal protein intake are strongly associated with cardiovascular mortality: The Adventist Health Study-2 cohort. *International Journal of Epidemiology*. 2018; 47(5): 1603-1612. doi: 10.1093/ije/dyy030
9. Delgado Cuzmar P, Salgado E, Ribalta-Pizarro C, et al. Phenolic composition and sensory characteristics of Cabernet Sauvignon wines: effect of water stress and harvest date. *International Journal of Food Science & Technology*. 2018; 53(7): 1726-1735. doi: 10.1111/ijfs.13757
10. Xie Y, Zhu X, Li Y, et al. Analysis of the pH-Dependent Fe(III) Ion chelating activity of anthocyanin extracted from black soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] coats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2018; 66(5): 1131-1139. doi: 10.1021/acs.jafc.7b04719
11. 王欢, 譙顺彬, 田辉, 等. 高效液相色谱法测定蓝莓酒中六种花青素含量. *食品与发酵工业*. 2020; 46(8): 280-284. doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022040
Wang H, Qiao S, Tian H, et al. Determination of anthocyanins in blueberry wine by high-performance liquid chromatography (Chinese). *Food and Fermentation Industries*. 2020; 46(8): 280-284. doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022040
12. Baron G, Altomare A, Regazzoni L, et al. Pharmacokinetic profile of bilberry anthocyanins in rats and the role of glucose transporters: LC-MS/MS and computational studies. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2017; 144: 112-121. doi: 10.1016/j.jpba.2017.04.042
13. 张娟, 王晓宇, 田呈瑞, 等. 基于酚类物质的酿酒红葡萄品种特性分析. *中国农业科学*. 2015; 48(7): 1370-1382. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2015.07.12
Zhang J, Wang X, Tian C, et al. Analysis of phenolic compounds in red grape varieties (Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*. 2015; 48(7): 1370-1382. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2015.07.12

14. 张毅, 孔秀林, 王洪云, 等. 不同品种紫甘薯花色苷含量与组分分析. 江苏师范大学学报(自然科学版). 2019; 37(2): 26-30. doi: 10.3969/j.issn.2095-4298.2019.02.006
Zhang Y, Kong X, Wang H, et al. Analysis of anthocyanin content and components of different varieties of purple sweet potato (Chinese). Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition). 2019; 37(2): 26-30. doi: 10.3969/j.issn.2095-4298.2019.02.006
15. 杨晓慧, 陈为凯, 何非, 王军. 5个红色酿酒葡萄品种花色苷组成差异分析. 西北农业学报. 2017; 26(11): 1648-1654. doi: 10.7606/j.issn.1004-1389.2017.11.011
Yang X, Chen W, He F, Wang J. Analysis of differences in anthocyanin composition of five red wine grape varieties (Chinese). Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica. 2017; 26(11): 1648-1654. doi: 10.7606/j.issn.1004-1389.2017.11.011
16. 殷丽琴, 彭云强, 钟成, 等. 高效液相色谱法测定8个彩色马铃薯品种中花青素种类和含量. 食品科学. 2015; 36(18): 143-147. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201518026
Yin L, Peng Y, Zhong C, et al. Determination of anthocyanidin composition of different pigmented potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars by HPLC (Chinese). Food Science. 2015; 36(18): 143-147. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201518026
17. 殷丽琴, 韦献雅, 钟成, 等. 不同品种彩色马铃薯总花色苷含量与总抗氧化活性. 食品科学. 2014; 35(5): 96-100. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201405019
Yin L, Wei X, Zhong C, et al. Total anthocyanin content and total antioxidant activity of different varieties of colored potatoes (Chinese). Food Science. 2014; 35(5): 96-100. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201405019
18. Ajay K P, Sivakumar T R, Jin C, et al. Antioxidant and hemolysis protective effects of polyphenol-rich extract from mulberry fruits. Pharmacognosy Magazine, 2018, 14(53): 103-109. doi: 10.4103/pm.pm_491_16
19. 陈亮, 辛秀兰, 王彦辉, 袁其朋. 红树莓花色苷含量测定及成分分析. 食品与发酵工业. 2011; 37(05): 166-169. doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2011.05.018
Chen L, Xin X, Wang Y, Yuan Q. Analysis of content and compositions of anthocyanins in red raspberry (Chinese). Food and Fermentation Industries. 2011; 37(05): 166-169. doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2011.05.018
20. 赵珊, 席清清, 李曦, 等. 超高效液相色谱法测定有色稻米中花色苷的含量. 食品与发酵工业; 2018; 44(11): 301-306.
Zhao S, Xi Q, Li X, et al. Determination of anthocyanins in colored rice by ultra-high performance liquid chromatography (Chinese). Food and Fermentation Industries. 2018; 44(11): 301-306. doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.016228
21. 连悦汝, 孟志云, 顾若兰, 等. 蓝莓花色苷的定量分析与吸收代谢研究进展. 军事医学. 2021; 45(02): 156-161. doi: 10.7644/j.issn.1674-9960.2021.02.015
Lian Y, Meng Z, Gu R, et al. Research progress on quantitative analysis and absorption metabolism of blueberry anthocyanins (Chinese). Military Medical Sciences. 2021; 45(02): 156-161. doi: 10.7644/j.issn.1674-9960.2021.02.015
22. 段宙位, 窦志浩, 何艾, 等. 青金桔皮中多酚的提取及其抗氧化性研究. 食品工业科技. 2015; 36(10): 244-248. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.10.043
Duan Z, Dou Z, He A, et al. Extraction and antioxidant activity of polyphenols from green kumquat peel (Chinese). Science and Technology of Food Industry. 2015; 36(10): 244-248. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.10.043
23. 陈亮, 辛秀兰, 袁其朋. 野生桑葚中花色苷成分分析. 食品工业科技. 2012; 33(15): 307-310.
Chen L, Xin X, Yuan Q. Analysis of anthocyanin components in wild mulberries (Chinese). Science and Technology of Food Industry. 2012; 33(15): 307-310.
24. Kalt W, Blumberg JB, McDonald JE, et al. Identification of Anthocyanins in the Liver, Eye, and Brain of Blueberry-Fed Pigs. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2008; 56(3): 705-712. doi: 10.1021/jf071998l
25. Gill CIR, McDougall GJ, Glidewell S, et al. Profiling of Phenols in Human Fecal Water after Raspberry Supplementation. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2010; 58(19): 10389-10395. doi: 10.1021/jf1017143
26. 石翠, 孔东升, 徐才志, 等. 黑果枸杞体外模拟消化及抗氧化研究. 甘肃农业大学学报. 2023; 58(5): 149-155, 162. doi: 10.13432/j.cnki.jgsau.2023.05.017
Shi C, Kong D, Xu C, et al. Study on *in vitro* simulated digestion and antioxidant properties of black wolfberry (Chinese). Journal of Gansu Agricultural University. 2023; 58(5): 149-155, 162. doi: 10.13432/j.cnki.jgsau.2023.05.017
27. 彭珍珍. 黑米花色苷调控内质网应激增强 RPE 细胞屏障功能机制研究 [硕士学位论文]. 中南林业科技大学; 2023. doi: 10.27662/d.cnki.gznlc.2022.000771

- Peng Z. Study on the mechanism of black rice anthocyanins regulating endoplasmic reticulum stress and enhancing RPE cell barrier function [Master's thesis] (Chinese). Central South University of Forestry and Technology; 2023. doi: 10.27662/d.cnki.gznlc.2022.000771
28. 李占龙. 黑果枸杞花色苷 Pt3G 对前列腺癌细胞 ROS/PTEN/PI3K/Akt 信号通路作用机制的研究 [硕士学位论文]. 宁夏医科大学; 2022. doi: 10.27258/d.cnki.gnxyc.2021.000035
- Li Z. Study on the mechanism of action of black fruit and wolfberry anthocyanins Pt3G on ROS/PTEN/PI3K/Akt signaling pathway in prostate cancer cells [Master's thesis] (Chinese). Ningxia Medical University; 2022. doi: 10.27258/d.cnki.gnxyc.2021.000035
29. 刘翼翔, 吴永沛, 籍保平. 蓝莓多酚在胃肠消化过程中的成分变化与抗氧化活性. 中国食品学报. 2016; 16(10): 197-203. doi: 10.16429/j.1009-7848.2016.10.027
- Liu Y, Wu Y, Ji B. Composition changes and antioxidant activity of blueberry polyphenols during gastrointestinal digestion (Chinese). Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology. 2016; 16(10): 197-203. doi: 10.16429/j.1009-7848.2016.10.027
30. 刘琪, 欧雅文, 周倩, 等. 花色苷的营养吸收及对结肠癌的影响研究进展. 食品科学. 2017; 38(17): 301-305. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201717048
- Liu Q, Ou Y, Zhou Q, et al. Nutrient uptake of anthocyanins and their impacts on colon cancer (Chinese). Food Science. 2017; 38(17): 301-305. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201717048
31. 邵帅, 赵晶, 张岚, 等. 基于体外发酵研究仙人掌果实花色苷对肠道菌群及代谢物 SCFAs 的影响. 食品工业科技. 2022; 43(24): 377-385. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030122
- Shao S, Zhao J, Zhang L, et al. Effects of anthocyanins from *Opuntia ficus-indica* on gut microbiota and metabolites SCFAs based on fermentation in vitro (Chinese). Science and Technology of Food Industry. 2022; 43(24): 377-385. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030122
32. 岳文秀, 吴璐璐, 韩富亮. 葡萄酒干物质和花色苷对人体肠道菌群的影响: 基于体外模拟发酵法. 食品科学. 2022; 43(11): 121-129. doi: 10.7506/spkx1002-6630-20210506-044
- Yue W, Wu L, Han F. In Vitro simulated fermentation evaluation of effects of dry matter and anthocyanins in red wine on intestinal microbiota (Chinese). Food Science. 2022; 43(11): 121-129. doi: 10.7506/spkx1002-6630-20210506-044
33. 赵丽艳, 陈宇飞. 黑米花色苷体外抑菌作用研究. 食品安全导刊. 2019; 24: 176. doi: 10.16043/j.cnki.cfs.2019.24.142
- Zhao L, Chen Y. Study on the antibacterial effect of black rice anthocyanins in vitro (Chinese). China Food Safety Magazine. 2019; 24: 176. doi: 10.16043/j.cnki.cfs.2019.24.142
34. Woodward G, Kroon P, Cassidy A, et al. Anthocyanin stability and recovery: implications for the analysis of clinical and experimental samples. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2009; 57(12): 5271-5278. doi: 10.1021/jf900602b
35. Faria A, Fernandes I, Norberto S, et al. Interplay between anthocyanins and gut microbiota. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2014; 62(29): 6898-6902. doi: 10.1021/jf501808a
36. Peixoto FM, Senna Gouvêa ACM, et al. Characterization and bioaccessibility of anthocyanins from blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) after simulated gastro-intestinal digestion: A positive effect on malvidin derivatives. Fruits. 2018; 73(2): 101-109. doi: 10.17660/th2018/73.2.2
37. 位路路, 林杨, 王月华, 孟宪军. 黑果腺肋花楸花色苷提取工艺优化及其抗氧化活性和组成鉴定. 食品科学. 2018; 39(12): 239-246. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201812037
- Wei L, Lin Y, Wang Y, Meng X. Optimization of extraction of anthocyanins from berries of aronia *melanocarpa* and their antioxidant activity and composition (Chinese). Food Science. 2018; 39(12): 239-246. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201812037
38. Chen Y, Li Q, Zhao T, et al. Biotransformation and metabolism of three mulberry anthocyanin monomers by rat gut microflora. Food Chemistry. 2017; 237: 887-894. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.06.054
39. Hahm TH, Tanaka M, Nguyen HN, et al. Matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry-guided visualization analysis of intestinal absorption of acylated anthocyanins in Sprague-Dawley rats. Food Chemistry. 2021; 334: 127586. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127586
40. Sekirov I, Russell SL, Antunes LCM, et al. Gut microbiota in health and disease. Physiological Reviews. 2010; 90(3): 859-904. doi: 10.1152/physrev.00045.2009

41. Zhou L, Xie M, Yang F, et al. Antioxidant activity of high purity blueberry anthocyanins and the effects on human intestinal microbiota. *LWT-Food Science and Technology*. 2020; 117: 108621. doi: 10.1016/j.lwt.2019.108621
42. Hidalgo M, Oruna-Concha MJ, Kolida S, et al. Metabolism of anthocyanins by human gut microflora and their influence on gut bacterial growth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012; 60(15): 3882-3890. doi: 10.1021/jf3002153
43. Chen L, Jiang B, Zhong C, et al. Chemoprevention of colorectal cancer by black raspberry anthocyanins involved the modulation of gut microbiota and SFRP2 demethylation. *Carcinogenesis*. 2018; 39(3): 471-481. doi: 10.1093/carcin/bgy009
44. 蒋丽施, 孟晓, 杨凡. 紫薯花色苷色素抑菌作用的探究. *中国食品添加剂*. 2017; 3: 106-110. doi: 10.3969/j.issn.1006-2513.2017.03.009
Jiang L, Meng X, Yang F. Study on the antibacterial effect of purple sweet potato anthocyanin pigments (Chinese). *China Food Additives*. 2017; 3: 106-110. doi: 10.3969/j.issn.1006-2513.2017.03.009
45. 龚祥, 王波, 陆秀云, 等. ‘苦水玫瑰’花色苷的提纯及其抑菌活性. *甘肃农业大学学报*. 2018; 53(4): 168-176. doi: 10.13432/j.cnki.jgsau.2018.04.02
Gong X, Wang B, Lu X, et al. Purification of anthocyanins from ‘Bitter Water Rose’ and its antibacterial activity (Chinese). *Journal of Gansu Agricultural University*. 2018; 53(4): 168-176. doi: 10.13432/j.cnki.jgsau.2018.04.02
46. 吴映梅, 徐龙泉, 浦绍敏, 等. 黑莓中总花色苷的提取工艺优化及其抗氧化性和抑菌性的研究. *食品研究与开发*. 2021; 42(11): 95-102. doi: 10.12161/j.issn.1005-6521.2021.11.016
Wu Y, Xu L, Pu S, et al. Optimization of the extraction process of total anthocyanins in blackberries and research on their antioxidant and antibacterial properties (Chinese). *Food Research and Development*. 2021; 42(11): 95-102. doi: 10.12161/j.issn.1005-6521.2021.11.016
47. 陆俊, 敦惠瑜, 向孝哲, 等. 体外模拟胃、肠消化对 6 种黑色食品抗氧化成分及其活性的影响. *食品科学*. 2018; 39(5): 47-56. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201805008
Lu J, Dun H, Xiang X, et al. Effect of in vitro simulated gastrointestinal digestion on bioactive components and antioxidant activities of six kinds of black foods (Chinese). *Food Science*. 2018; 39(5): 47-56. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201805008
48. 唐敬思, 王红梅, 佟锰, 等. 蓝靛果忍冬花色苷的研究进展. *食品研究与开发*. 2020; 41(16): 220-224. doi: 10.12161/j.issn.1005-6521.2020.16.037
Tang J, Wang H, Tong M, et al. Research progress on anthocyanins of *Lonicera caerulea* L. (Chinese). *Food Research and Development*. 2020; 41(16): 220-224. doi: 10.12161/j.issn.1005-6521.2020.16.037
49. 王永刚, 杨光瑞, 马雪青, 等. 内生真菌链格孢菌醋酸乙酯提取物对大肠杆菌抑菌机制的研究. *中草药*. 2018; 49(2): 374-381.
Wang Y, Yang G, Ma X, et al. Study on the antibacterial mechanism of endophytic fungus *Alternaria* ethyl acetate extract against *Escherichia coli* (Chinese). *Chinese Traditional and Herbal Drugs*. 2018; 49(2): 374-381.
50. 王奕丁, 姜婷婷, 王全. 棉花黄萎病拮抗细菌 *Bacillus subtilis* ZL2-70 抗菌蛋白的理化性质和抑菌机理. *棉花学报*. 2017; 29(6): 560-569. doi: 10.11963/1002-7807.wydwq.20171011
Wang Y, Jiang T, Wang Q. Physical and chemical properties and antifungal mechanism of antifungal protein produced by antagonistic strain *Bacillus subtilis* ZL2-70 against *Verticillium dahliae* (Chinese). *Cotton Science*. 2017; 29(6): 560-569. doi: 10.11963/1002-7807.wydwq.20171011
51. Vendrame S, Del Bo’ C, Ciappellano S, et al. Berry fruit consumption and metabolic syndrome. *Antioxidants*. 2016; 5(4): 34. doi: 10.3390/antiox5040034
52. Peng Y, Yan Y, Wan P, et al. Effects of long-term intake of anthocyanins from *Lycium ruthenicum* Murray on the organism health and gut microbiota in vivo. *Food Research International*. 2020; 130: 108952. doi: 10.1016/j.foodres.2019.108952
53. Ali HM, Almagribi W, Al-Rashidi MN. Antiradical and reductant activities of anthocyanidins and anthocyanins, structure-activity relationship and synthesis. *Food Chemistry*. 2016; 194: 1275-1282. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.09.003

Review

Research progress of anthocyanins regulating intestinal microorganisms

Yixin Li, Rui Zhang, Jiadan Du, Yushan Liu, Yumeng Zhang, Jiayi Liu, Min Wang, Lin Han*

College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Xianyang 712100, Shaanxi Province, China

* **Corresponding authors:** Lin Han, hanlin2019@nwsuaf.edu.cn

Abstract: Anthocyanins are a kind of glycoside derivatives with C₆-C₃-C₆ as the skeleton widely existing in various fruits and vegetables. In addition to giving food its bright color, anthocyanins have a variety of biological health effects on the human body. In this paper, the structure, distribution, and content of anthocyanins and the research progress of anthocyanins and their metabolites on intestinal microbiological regulation in recent years were reviewed in order to provide a theoretical basis for further development of nutritive and healthy food rich in anthocyanins.

Keywords: anthocyanin; intestinal microorganism