

茶多酚在模拟胃肠消化过程中含量及活性的变化规律

李玉壬, 王瑞, 王旭捷, 陈春风, 杨慧, 罗忠芳, 杨晓萍

(华中农业大学园艺林学学院, 园艺植物生物学教育部重点实验室, 湖北武汉 430070)

摘要: 通过模拟消化模型分析茶多酚在胃肠消化过程中成分和抗氧化活性的变化规律, 及其对肠道细菌生长的影响。结果表明, 与胃部相比, 茶多酚在肠部降解能力更为显著; 经过模拟胃消化, 茶多酚含量降低了 12.00%, GCG 显著降低了 32.50%, EGC 增加了 13.80%; 模拟肠消化后, 茶多酚含量大幅度地降低了 35.90%~46.10%, EGCG 显著降低了 98.40%~98.70%, GC 则显著增加了 97.00%~114.00%; 模拟胃肠消化后, 茶多酚的总抗氧化能力、DPPH· 和 ABTS⁺ 的清除能力均大幅度降低 ($p < 0.05$), 除肠消化阶段清除 ABTS⁺ 的能力外, 其余消化阶段的抗氧化能力均与茶多酚含量呈正相关; 此外, 研究模拟消化前后茶多酚对肠道细菌生长的影响, 发现消化前其具有显著抑制大肠杆菌和增殖嗜酸乳杆菌生长的作用, 模拟胃肠消化后, 茶多酚对大肠杆菌抑菌效果增强, 但对嗜酸乳杆菌无显著作用。

关键词: 茶多酚; 模拟胃肠消化; 抗氧化活性; 肠道细菌

文章编号: 1673-9078(2021)07-115-120

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.7.0025

Changes in Content and Antioxidant Activity of Tea Polyphenols during *in Vitro* Simulated Gastrointestinal Digestion

LI Yu-ren, WANG Rui, WANG Xu-jie, CHEN Chun-feng, YANG Hui, LUO Zhong-fang, YANG Xiao-ping

(Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Ministry of Education, College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The composition and antioxidant activity of tea polyphenols *in vitro* were evaluated using gastric intestinal digestion model. Their effect on the growth of intestinal bacteria was also investigated. Results showed that the degradability of tea polyphenols in simulated gastrointestinal digestion was more significant than that of after simulated gastric digestion. During the simulated gastric digestion, the content of tea polyphenols decreased by 12.00%, GCG decreased significantly by 32.50%, EGC increased by 13.80%. During the simulated gastrointestinal digestion, the content of tea polyphenols decreased significantly by 35.90%~46.10%, EGCG decreased significantly by 98.40%~98.70%, GC increased significantly by 97.00%~114.00%. The total antioxidant capacity, DPPH· radical scavenging capacity and ABTS⁺ radical scavenging capacity of tea polyphenols were significantly decreased after simulated gastrointestinal digestion ($p < 0.05$). During the simulated gastrointestinal digestion, the antioxidant capacity was positively correlated with the content of tea polyphenols, except ABTS⁺ radical scavenging capacity. Effect of tea polyphenols on intestinal bacterial growth during the simulated gastrointestinal digestion was evaluated. Results showed that tea polyphenols significantly inhibited the growth of *Escherichia coli* and proliferated the growth of *Lactobacillus acidophilus*. After simulated gastrointestinal digestion, bacteriostatic effect of tea polyphenols on *Escherichia coli* enhanced, but had no significant effect on *Lactobacillus acidophilus*.

Key words: tea polyphenols; simulated gastrointestinal digestion; antioxidant activity; intestinal bacteria

引文格式:

李玉壬,王瑞,王旭捷,等.茶多酚在模拟胃肠消化过程中含量及活性的变化规律[J].现代食品科技,2021,37(7):115-120,+22

LI Yu-ren, WANG Rui, WANG Xu-jie, et al. Changes in content and antioxidant activity of tea polyphenols during *in vitro* simulated gastrointestinal digestion [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 115-120, +22

收稿日期: 2021-01-08

基金项目: 湖北省自然科学基金项目 (2017CFB695)

作者简介: 李玉壬 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 茶叶深加工

通讯作者: 杨晓萍 (1971-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 茶叶生物化学、

茶叶深加工与综合利用

茶多酚 (TP) 是茶叶中的一种天然活性成分, 具有抗氧化、清除自由基、抑制脂质过氧化、提高膜稳定性等活性^[1]; 同时, TP 还能通过调节肠道微生物菌群的组成、改善肠道微环境, 被广泛应用于改善肠道健康等方面, 成为了代谢综合征治疗的热点选择^[2]。

然而,有研究发现 TP 在人体胃肠环境中的利用率并不可观。Henning 等^[3]发现 TP 在生物体内经过胃肠消化后仅有 10.00% 的有效成分被吸收;赵超艺^[4]等通过研究小鼠胃肠消化过程中 TP 的变化情况,发现儿茶素在小肠内的损失率高达 30.00%。这些现象是由 TP 在消化过程中的不稳定性 and 肠道的低吸收率导致的^[5]。胃酸和蛋白酶等物质能促进 TP 中的没食子酸酯和没食子酸降解成酚酸及其甘氨酸结合物等简单复合物^[6],降解产物一部分先在胃部被吸收,接着在小肠被少量吸收,剩余部分被结肠中的微生物分解释放,最终导致 TP 的生物利用度大幅度降低^[7]。这使得与 TP 相关的深加工制品在人体消化过程中难以保持活性,无法充分发挥其原有特性。因此,如何提高胃肠消化后 TP 的生物利用率,成为 TP 深加工产品急需解决的问题。

探究模拟消化过程中 TP 成分含量和活性的变化情况对研究如何提高其在胃肠中的生物利用率极为重要。本研究通过构建模拟消化模型,探究 TP 在不同消化阶段的含量和抗氧化活性的变化情况,同时选取具有代表性的肠道细菌作为研究对象,分析模拟消化前后 TP 对主要肠道细菌生长的影响,为提高 TP 在胃肠中的生物利用度提供新的试验依据,并为进一步开发体内高活性的 TP 深加工制品提供新的思路 and 方向。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

TP ($\geq 98\%$),安徽红星药业股份有限公司;大肠杆菌 (*Escherichia coli*) ATCC8739;嗜酸乳杆菌 (*Lactobacillus acidophilus*) ATCC4356 均购买于广东省微生物研究所。

胃蛋白酶 (Pepsin 1:3000) 和福林酚, Biosharp 公司;胰酶、粘蛋白、1,1-二苯基-2-苦基肼 (DPPH, BR) 和 2,2'-联氨-双-3-乙基苯丙噻唑琳-6-磺酸二铵盐 (ABTS, 98%), 上海源叶生物科技有限公司;脂肪酶 (10 万 U/g) 和 2,4,6-三吡啶基三嗪 (TPTZ, 99%), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;猪胆盐, 国药集团化学试剂有限公司;浓盐酸等其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

722N 型可见分光光度计, 上海菁华科技仪器有限公司; IS-RDD3 型台式恒温振荡器, 美国 Crystal 公司; HH-6 型数显恒温水浴锅, 国华电器有限公司; TDL-5-A 型离心机, 上海安亭科学仪器厂; 生化培养箱, 天津市莱伯特瑞仪器设备有限公司; 超净工作台, 苏信净化设备厂。

1.3 试验方法

1.3.1 模拟消化样品制备

分别按王瑞等^[8]的方法配制模拟胃液、模拟十二指肠液和模拟胆汁及构建模拟消化模型。模拟胃肠消化过程具体操作如下:取 TP 0.040 g 置于三角瓶中,加入 20 mL 现配的人工模拟胃液,于 37 °C 恒温, 110 r/min 振荡器中分别进行不同时间 (0.5、1.0、1.5、2.0 h) 的模拟胃消化处理;胃消化后,先用 0.9 mol/L NaHCO_3 将模拟胃消化液 pH 值调至 6.0 ± 0.2 , 然后加入 30 mL 模拟肠液 (20 mL 现配的模拟十二指肠液和 10 mL 现配的模拟胆汁组成), 混合均匀后于 37 °C 恒温, 110 r/min 振荡器中再分别进行不同时间 (0.5、1.0、1.5、2.0 h) 的模拟肠消化处理。分别取不同消化时间的胃消化液、肠消化液,于冰浴条件下钝化酶的活性、离心 (4500 r/min) 10 min, 取上清液分别用于测定 TP 的含量、主要儿茶素组分及其抗氧化活性。

1.3.2 TP 含量测定

参考 GB/T 8313-2008 测定^[9],以没食子酸为标准品。分别测定不同消化阶段的样品溶液于 765 nm 处的吸光值,计算求得 TP 含量,结果以没食子酸当量 (g GAE/g TP) 表示。

1.3.3 高效液相色谱法 (HPLC) 检测儿茶素主要组成物质

参考 GB/T 8313-2008^[10]和 Wu 等^[11]采用 HPLC 法测定儿茶素组分及含量。使用 Agilent TC-C18 分离柱 (0.45 μm), 在 35 °C 柱温下通过流动相 A (0.1% Formic acid 和超纯水溶剂) 和 B 相 (0.1% Formic acid 和 Methanol 溶剂) 进行色谱分离,在 278 nm 处检测各组分含量。

1.3.4 抗氧化活性

1.3.4.1 总抗氧化能力

参考 Benzie 等人^[12]的方法,取 10.0 mM TPTZ 溶液、20.0 mM 氯化高铁溶液、0.3 M 醋酸钠缓冲溶液 (pH 3.6) 以 1:1:10 的比例均匀混合,此溶液即为 TPTZ 反应液。取 100 μL 待测液,加入 37 °C 水浴加热的 TPTZ 反应液 3 mL,恒温水浴反应 30 min 后,在 593 nm 处的吸光度。以不同浓度 (0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mM) 的硫酸亚铁绘制标准曲线,结果以 FeSO_4 当量摩尔数 ($\text{mmol Fe}^{2+}/\text{g TP}$) 表示。

1.3.4.2 DPPH·清除能力

参考 Blois^[13]测定方法,取 2.0 mL 待测液加入 2.0 mL DPPH 乙醇溶液,摇匀后置于黑暗中室温下反应 30 min,并在波长 517 nm 处测定反应液的吸光度 (A_x)。按下式计算 DPPH·清除率 (I_{DPPH} , %):

$$I_{\text{DPPH}} / \% = \frac{A_0 - (A_x - A_y)}{A_0} \times 100\%$$

式中: A_0 , 空白对照吸光值; A_x , 样品吸光值; A_y , 参比液吸光值。

以不同质量浓度 (3、5、10、15、20 $\mu\text{g/mL}$) 的抗坏血酸绘制标准曲线, 结果以抗坏血酸当量 (g VCE/g TP) 表示。

1.3.4.3 ABTS⁺清除能力

参考 Re 等^[14]和 Thaipong 等^[15]方法, 具体操作如下: 7.0 mM ABTS 水溶液与 2.45 mM KPS 溶液以 1:1 体积比例混合均匀, 黑暗中静置 16 h 以上, 得 ABTS⁺储备液。用 95%乙醇溶液在避光条件下稀释 ABTS⁺储备液, 使其在 734 nm 处的吸光值为 0.7 ± 0.05 , 即 ABTS⁺反应液。依次取 200 μL 待测液, 加入 3.0 mL ABTS⁺反应液混合均匀, 室温于黑暗中反应 1.0 h, 在 734 nm 波长处测定其吸光度。按下式计算样品 ABTS⁺清除能力 (I_{ABTS} , %):

$$I_{\text{ABTS}} / \% = \frac{A_0 - A_x}{A_0} \times 100\%$$

式中: A_0 , 空白对照吸光值; A_x , 样品的吸光值。

以不同质量浓度 (0、16.0、32.0、48.0、64.0、80.0 $\mu\text{g/mL}$) 的抗坏血酸绘制标准曲线, 结果以抗坏血酸当量 (g VCE/g TP) 表示。

1.3.5 TP 对肠道细菌生长的影响

1.3.5.1 菌种的活化和菌悬浮液的制备

将大肠杆菌接种到斜面培养基中, 37 $^{\circ}\text{C}$ 培养 48 h, 活化后的大肠杆菌转接于 LB 液体培养基中, 在 37 $^{\circ}\text{C}$ 、150 r/min 恒温振荡器中培养 20 h, 制备含菌量为 10^5 CFU/mL 的菌悬液, 备用; 将嗜酸乳杆菌接种到 MRS 液体培养基中, 37 $^{\circ}\text{C}$ 培养 72 h, 活化后的嗜酸乳杆菌接种于 MRS 液体培养基中, 37 $^{\circ}\text{C}$ 静置培养 48 h, 制备含菌量为 $10^8 \sim 10^9$ CFU/mL 的菌悬液, 备用。

1.3.5.2 大肠杆菌抑菌试验

分别向 1.0 mL 无菌水、无菌未消化 TP 溶液、无菌肠液和消化液中加入 100 μL 大肠杆菌菌液, 置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 、150 r/min 恒温振荡器中培养 12 h, 平板计数^[16]。

1.3.5.3 对嗜酸乳杆菌增殖的影响

分别向 1.0 mL 无菌水、无菌未消化 TP 溶液、无菌肠液和消化液中加入 100 μL 嗜酸乳杆菌菌液, 置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 静置 24 h, 平板计数^[17]。

1.4 数据统计分析

所有试验均为 3 次重复, 结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用 SPSS 19.0 软件中的单因素分析方法, 对数据间的差异显著性进行分析, 通过 LSD 检验进行组间比较。

2 结果与分析

2.1 模拟消化对 TP 含量与主要成分的影响

2.1.1 模拟消化对 TP 含量的影响

如图 1 所示, 模拟胃肠消化后, TP 含量显著降低 ($p < 0.05$)。与未消化相比, 胃消化后 TP 含量明显降低了 12%, 但消化时间对含量变化无显著影响 ($p > 0.05$)。肠消化后 TP 含量大幅度地降低了 35.90%~46.10%, 且在 0.5~1.5 h 之间含量存在显著性差异 ($p < 0.05$), 1.5 h 后含量变化趋于稳定。比较发现, TP 在肠消化后损失量是胃部的 3.60~4.20 倍, 说明相较于肠部环境, TP 在胃部环境中更加稳定。这与 Tenore 等^[18]研究结果一致。造成这种差异的原因可能是 TP 在肠道的弱碱性环境下会发生氧化、聚合、降解等反应, 导致其含量降低; 同时, 溶液中的氧气也会促进上述反应的发生, 使得 TP 的损失率进一步的提高^[19]。

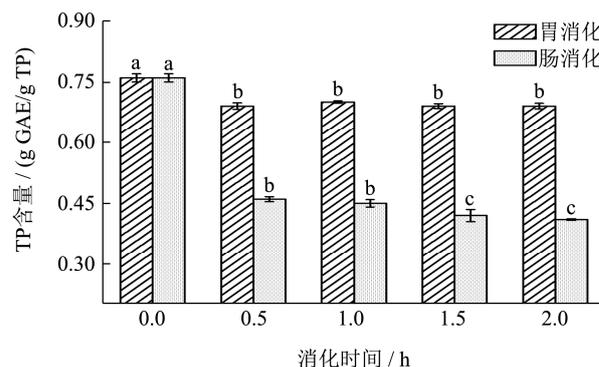


图 1 模拟消化对 TP 含量的影响

Fig.1 Effect of simulated digestion on the content of tea polyphenols

注: 图中同一图例具有不同小写字母表示在 0.05 水平达到显著性差异。下同。

2.1.2 模拟消化对儿茶素主要成分的影响

儿茶素是 TP 的主要成分, 约占 TP 总量的 65.00%~80.00%, 主要包括 EGCG、ECG、EGC、EC、GC、GCG、C 等^[20]。由表 1 可知, 模拟消化后儿茶素各组均发生显著变化。儿茶素总量降低了 86.40%~91.80%; 胃消化后, 儿茶素类含量降低了 19.90%, 其中 GCG 降低幅度最大, 为 32.50%, 但 EGC 增加了 13.80%。肠消化后, 儿茶素类含量显著降低了 86.40%~91.80%, 其中 EGCG 降低幅度最大, 为 98.40%~98.70%, 而 GC 显著增加, 为 97%~114%, 这可能与 ECG 和 EGC 在消化中的异构化作用有关^[19,21]。以上结果说明胃肠消化对儿茶素稳定性具有显著影响, EGCG 和 EGC 对肠液 pH 环境更为敏感, 这与 Tenore 等^[18]报道结果一致。

表 1 模拟肠消化前后儿茶素主要成分含量的变化

Table 1 Changes on the content of the major components of tea polyphenols before and after simulated gastrointestinal digestion

组分含量/(mg/g)	TP 原材料	模拟胃消化 (2.0 h)	模拟肠消化			
			0.5 h	1.0 h	1.5 h	2.0 h
GC	24.29±0.58 ^b	20.32±1.02 ^b	51.11±2.96 ^a	51.95±4.03 ^a	51.34±3.78 ^a	47.86±2.45 ^a
EGC	112.38±2.16 ^b	130.39±4.97 ^a	nd	nd	nd	nd
C	20.20±0.62 ^a	15.20±3.00 ^b	10.14±1.07 ^c	10.10±1.72 ^c	6.65±0.48 ^d	nd
EGCG	357.39±9.83 ^a	254.09±38.16 ^b	4.82±0.04 ^c	5.62±1.23 ^c	4.71±0.12 ^c	4.61±0.08 ^c
EC	52.11±1.20 ^a	44.06±2.80 ^b	12.22±1.78 ^c	7.04±6.15 ^b	nd	nd
GCG	21.64±0.59 ^a	14.60±2.37 ^b	nd	nd	nd	nd
ECG	73.22±2.23 ^a	51.04±8.95 ^b	11.66±3.60 ^c	12.00±5.38 ^c	7.05±0.92 ^{cd}	1.72±2.99 ^d
儿茶素总量	661.23±17.10 ^a	529.68±55.60 ^b	89.95±6.24 ^c	86.71±10.00 ^c	69.76±2.48 ^c	54.19±2.53 ^c
GA	10.83±0.28 ^a	10.43±0.22 ^a	2.30±0.07 ^d	2.75±0.28 ^{cd}	3.12±0.44 ^{bc}	3.28±0.02 ^b
CAF	29.26±0.38 ^a	28.01±0.21 ^b	29.70±0.73 ^a	29.62±0.27 ^a	29.72±0.12 ^a	29.80±0.96 ^a

注：表中不同小写字母表示同一行在 0.05 水平下显著性差异，nd 表示未检测出该物质。

2.2 模拟消化对 TP 抗氧化活性的影响

2.2.1 总抗氧化能力

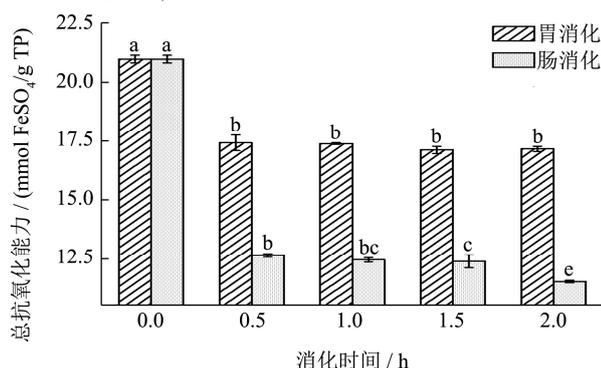


图 2 模拟消化对 TP 总抗氧化能力的影响

Fig.2 Effects of simulated digestion on the FRAPs of tea polyphenols

如图 2 所示，模拟胃肠消化后，TP 的总抗氧化能力 (FRAP) 显著降低 ($p < 0.05$)。胃消化后，FRAP 显著降低了 17.10%~18.30%；肠消化后显著降低了 40%~45%；随着模拟消化时间的延长，FRAP 逐渐降低；不同时间处理对胃消化 TP 的 FRAP 无明显作用 ($p > 0.05$)，但对肠消化有显著差异 ($p < 0.05$)；通过相关性分析可知，在模拟胃肠消化的不同阶段，FRAP 随着 TP 含量的增加而增加。相对于胃消化阶段，肠消化后 TP 的 FRAP 大幅度降低 ($p < 0.05$)，这可能是 pH 的影响，由 FRAP 法的 pH 环境可知 pH=3.6 是测定时的最适条件，与胃消化液的 pH 相近，但肠消化液的 pH 偏碱性，会对 FRAP 的测定产生不利影响^[22]。

2.2.2 DPPH·清除能力

如图 3 所示，模拟胃肠消化后，TP 的 DPPH·清除能力显著降低 ($p < 0.05$)。胃消化后，TP 的 DPPH·清

除能力降低了 6.40%~7.70%；肠消化后显著降低了 58.30%~64.40%；通过相关性分析可知，在模拟胃肠消化的不同阶段，DPPH·清除能力随着 TP 含量的增加而增加。此外，经过模拟消化后，肠消化阶段 TP 对 DPPH·清除能力的降低幅度是胃消化阶段的 8.37 倍，说明相对于胃消化，肠部环境对 TP 的 DPPH·清除能力的影响更为显著。

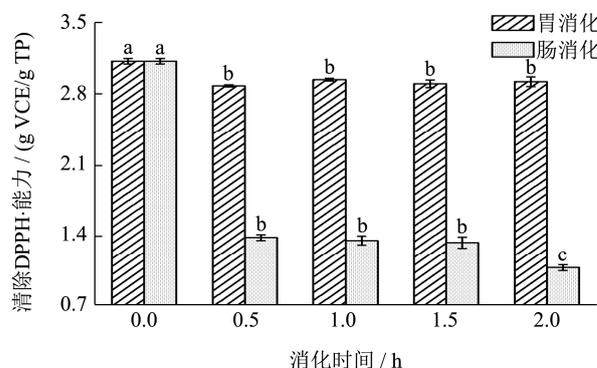


图 3 模拟消化对 TP 清除 DPPH· 能力的影响

Fig.3 Effects of simulated digestion on the DPPH· scavenging abilities of tea polyphenols

2.2.3 ABTS⁺·清除能力

如图 4 所示，模拟胃肠消化后，TP 的 ABTS⁺·清除能力显著降低 ($p < 0.05$)。胃消化后，ABTS⁺·清除能力显著降低了 38.60%~39.60%；肠消化后降低了 10.80%~18.10%；在胃消化阶段，ABTS⁺·清除能力与 TP 含量变化趋势相同，二者呈正相关 ($R^2=0.97$)，但在肠消化阶段，ABTS⁺·清除能力在 1.0 h 后开始呈现下降趋势，与 TP 含量变化趋势不同，二者相关性不明显 ($R^2=0.29$)。比较胃肠消化结果可知，肠消化后 ABTS⁺·清除率的降低幅度远小于胃消化阶段，仅是胃消化的 0.46 倍。说明多酚类 ABTS⁺·清除率呈现 pH

依赖性,随着 pH 升高,清除能力变强。这与多酚化合物芳香环酚性羟基在弱碱性 pH 环境下去质子化有关^[23],在肠液 pH 环境中 TP 的去质子化更易发生,从而增强了 TP 的 ABTS⁺清除率。此外,研究结果还表明胃消化后,TP 清除 ABTS⁺能力的降低幅度是清除 DPPH 能力的 5.10 倍,是 FRAP 的 2.20 倍,由此可知胃消化对 TP 各抗氧化活性的影响不同。

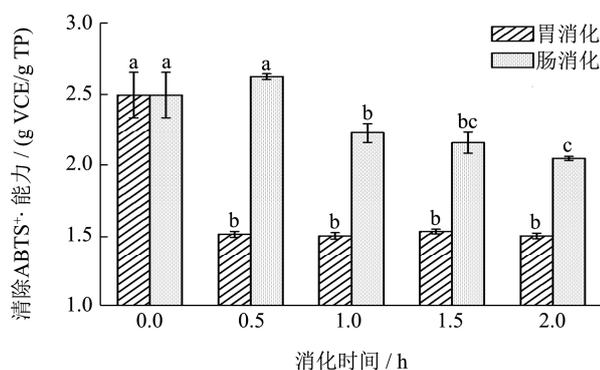


图4 模拟消化对 TP 清除 ABTS⁺ 能力的影响

Fig.4 Effect of simulated digestion on the ABTS⁺ scavenging abilities of tea polyphenols

2.3 TP 模拟消化前后对肠道细菌生长的影响

大肠杆菌是肠道中常见的致病性细菌,其在机体内会促使蛋白质分解产生胺、氨等有害物质,对肠道带来直接损伤,同时分解产物一部分被吸收,对人体产生不利影响^[24]。由表 2 可知,TP 在模拟胃肠消化前后均能明显抑制大肠杆菌的生长,具有显著的抑菌活性,并且消化后 TP 的抑菌效果优于消化前。这可能与儿茶素经过消化后转化为乳酸 I 型代谢产物和 II 型代谢产物等同样具有一定抑菌活性的物质有关^[25]。

表 2 模拟肠消化前后 TP 对肠道细菌生长的影响

Table 2 Effect of tea polyphenols on the gut bacteria before and after simulated gastrointestinal digestion

处理	菌落数/(CFU/mL)	
	大肠杆菌	嗜酸乳杆菌
对照	1.30×10 ⁴	2.00×10 ⁴
消化前 TP	19.00	7.00×10 ⁵
消化后 TP	-	-

注:“-”表示没有菌落生长。

嗜酸乳杆菌作为肠道有益菌,在一定范围内可以改善人体肠道微生物菌群的平衡,从而提高机体的健康水平^[26]。试验结果发现消化前的 TP 能明显促进嗜酸乳杆菌的增殖,但在模拟消化后 TP 对嗜酸乳杆菌的生长没有促进作用,这可能与肠液 pH 有关。有研究指出嗜酸乳杆菌的最适生长 pH 为 5.5~6.5,随着 pH 值的升高,偏碱性环境会对嗜酸乳杆菌产生抑制作用,

降低其存活率^[27],而模拟肠液呈弱碱性不利于其生长,试验对对照(嗜酸乳杆菌在不加 TP 的肠液中培养)中同样没有看到菌落的生长,进一步说明肠液 pH 是影响其生长的主要因素。

3 结论

3.1 本文通过体外模拟消化的方法,分析了在此过程中 TP 的含量、主要成分和抗氧化活性的变化情况,以及对肠道主要细菌生长的影响。结果发现,TP 经过模拟消化后含量显著降低 ($p < 0.05$);其中,EGCG、GCG 等儿茶素类物质含量大幅度降低,而 EGC 和 GC 含量相对增加;比较胃肠消化结果,发现 TP 在胃部环境相对稳定,含量降低了 12%,而在肠部极易分解,大幅度下降了 35.90%~46.10%;模拟胃肠消化显著降低了 TP 的 FRAP,以及对 DPPH 和 ABTS⁺的清除能力 ($p < 0.05$),且不同消化阶段 TP 的抗氧化能力与含量呈正相关,但肠消化阶段的 ABTS⁺清除能力与 TP 含量相关性并不明显;TP 对大肠杆菌具有显著抑菌效果,经过模拟消化后抑制作用增强,但消化后的 TP 对嗜酸乳杆菌的生长不再产生影响,产生这种现象是因为肠道的偏碱性环境不满足嗜酸乳杆菌的生长条件。

3.2 在人体胃肠消化过程中,不同 pH 环境、消化酶、肠道微生态以及食品基质之间存在互相影响,这些因素的综合作用会导致 TP 的含量和生物活性发生不同的变化。因此,探究人体消化过程对 TP 含量和活性的影响时,需要综合考虑胃肠环境的多样性,这些问题还有待进一步的研究。

参考文献

[1] 杨宽,钱卫东,秦蓓.茶多酚对高脂血症大鼠血脂代谢和肝组织 MDA、T-SOD 含量的影响[J].中国油脂,2019,44(1):70-73,96
YANG Kuan, QIAN Wei-dong, QING Bei. Effects of tea polyphenols on blood lipid metabolism and contents of MDA and T-SOD in liver tissue of hyperlipidemia rat [J]. China Oils and Fats, 2019, 44(1): 70-73, 96

[2] 周方,欧阳建,黄建安.茶多酚对肠道微生物的调节作用研究进展[J].茶叶科学,2019,39(6):619-630
ZHOU Fang, OUYANG Jian, HUANG Jian-an. Advances in research on the regulation of tea polyphenols and effects on intestinal flora [J]. Journal of Tea Science, 2019, 39(6): 619-630

[3] Henning S M, Niu Y, Lee N H, et al. Bioavailability and antioxidant activity of tea flavanols after consumption of

- green tea, black tea, or a green tea extract supplement [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2004, 80(6): 1558-1564
- [4] 赵超艺,潘顺顺,孙世利,等. 茶儿茶素类体内代谢动力学研究进展[J]. 生物技术通报, 2009, S1: 33-35, 50
ZHAO Chao-yi, PAN Shun-shun, SUN Shi-li, et al. Research progress on pharmacokinetics of catechins *in vivo* [J]. Biotechnology Bulletin, 2009, S1: 33-35, 50
- [5] Meng S, Long Y H, Ning N. Binding of tea catechins to rice bran protein isolate: interaction and protective effect during *in vitro* digestion [J]. Food Research International, 2017, 93: 1-7
- [6] 张梁,陈欣,陈博. 茶多酚体内吸收、分布、代谢和排泄研究进展[J]. 安徽农业大学学报, 2016, 59(5): 667-675
ZHANG Liang, CHEN Xin, CHEN Bo. Research progress in the absorption, distribution, metabolism and excretion of tea polyphenols *in vivo* [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2016, 59(5): 667-675
- [7] Zhou L, Wang W, Huang J, et al. *In vitro* extraction and fermentation of polyphenols from grape seeds (*Vitis vinifera*) by human intestinal microbiota [J]. Food Function, 2016, 7(4): 1959-1967
- [8] 王瑞,陈波伟,杨晓萍,等. 食物基质对模拟消化茶多酚含量及抗氧化活性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(6): 105-112
WANG Rui, CHEN Bo-wei, YANG Xiao-ping, et al. Effects of food matrix on content and antioxidant activity of tea polyphenols during simulated gastrointestinal digestion [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(6): 105-112
- [9] 骆慧敏,宁敏,徐迎波,等. 多孔淀粉对茶多酚的吸附性能及其复合物抗氧化能力的研究[J]. 茶叶科学, 2015, 5: 473-480
LUO Hui-min, NING Min, XU Ying-bo, et al. Adsorption properties of porous starch on tea polyphenols and antioxidative capacity of the vomplex [J]. Journal of Tea Science, 2015, 5: 473-480
- [10] GB/T 8313-2008. 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法[S]
GB/T 8313-2008. Determination of Total Polyphenols and Catechins Content in Tea [S]
- [11] Wu C, Xu H, Heiter J, et al. Determination of catechins and flavanol glycosides in Chinese tea varieties [J]. Food Chemistry, 1996, 239(1): 144-149
- [12] Benzie I F, Strain J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": the FRAP assay [J]. Analytical Biochemistry, 1996, 239(1): 70-76
- [13] Blois M S. Antioxidant determinations by the use of a stable free radical [J]. Nature, 1958, 181(4617): 1199-1200
- [14] Re R, Pellegrini N, Proteggente A, et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay [J]. Free Radical Biology & Medicine, 1999, 26(9-10): 1231-1237
- [15] Thaipng K, Boonprakob U, Kevin CK, et al. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2006, 19(6-7): 667-675
- [16] GB 4789.38-2012. 大肠埃希氏菌计数[S]
GB 4789.38-2012. Plate Counting of *Escherichia coli* [S]
- [17] GB/T 20191-2006. 饲料中嗜酸乳杆菌的微生物学检验[S]
GB/T 20191-2006. Microbiological Examination of *Lactobacillus acidophilus* in Feeds [S]
- [18] Tenore G C, Campiglia P, Giannetti D, et al. Simulated gastrointestinal digestion, intestinal permeation and plasma protein interaction of white, green, black tea polyphenols [J]. Food Chemistry, 2015, 169: 320-326
- [19] Shim S, Yoo S, Ra C, et al. Digestive stability and absorption of green tea polyphenols: influence of acid and xylitol addition [J]. Food Research International, 2012, 45(1): 204-210
- [20] 乔小燕,操君喜,车劲,等. 不同贮藏年份康砖茶主要成分差异及其抗氧化活性比较[J]. 现代食品科技, 2020, 36(8): 48-55, 264
QIAO Xiao-yan, CAO Jun-xi, CHE Jing, et al. Comparative analysis on chemical components and antioxidant activity for different aged kangbricks teas [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(8): 48-55, 264
- [21] Neilson A P, Hopf A S, Cooper B R, et al. Catechin degradation with concurrent formation of homo- and heterocatechin dimers during *in vitro* digestion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(22): 8941-8949
- [22] 彭雪梦,从彦丽,刘冬. 模拟消化评价苹果多酚、黄酮及抗氧化活性的相关性[J]. 现代食品科技, 2016, 32(1): 122-128
PENG Meng-xue, CONG Yan-li, LIU Dong. Determination of antioxidant activity and the contents of polyphenols and flavonoids of apples by simulated gastrointestinal digestion [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(1): 122-128

(下转第 22 页)