

食物基质对模拟消化茶多酚含量 及抗氧化活性的影响

王瑞 陈波伟 杨晓萍 王燕 宋晓维 黄鑫 殷佳雅

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, 武汉 430070

摘要 采用模拟胃肠消化模型研究食物基质对茶多酚含量及抗氧化活性的影响。结果表明:与茶多酚模拟胃消化比较,添加牛奶、糊化淀粉和食用油后,茶多酚含量分别降低 21.7%、15.0% 和 3.3%,白砂糖或柠檬酸的添加对其含量无明显影响。添加柠檬酸后,茶多酚清除 DPPH 自由基(DPPH·)能力显著增强,清除 ABTS 自由基(ABTS⁺·)能力显著降低,总抗氧化能力无明显变化;添加白砂糖后其清除 ABTS⁺·能力显著降低,其他抗氧化活性无明显变化;添加糊化淀粉或牛奶后,其抗氧化活性显著降低;添加食用油后其抗氧化活性无明显变化。与茶多酚模拟肠消化比较:添加牛奶后茶多酚含量显著降低 7.7%,其他食物基质的添加则对其含量无明显影响。添加柠檬酸后,茶多酚的总抗氧化能力与清除 ABTS⁺·能力显著增强,清除 DPPH·能力无明显变化;添加食用油后其清除 DPPH·和 ABTS⁺·能力显著增强,总抗氧化能力无明显变化;添加糊化淀粉或牛奶后,其清除 ABTS⁺·能力显著增强,其他则无明显变化;添加白砂糖后其抗氧化活性无明显变化。

关键词 茶多酚; 食物基质; 模拟胃肠消化; 总抗氧化能力; DPPH 自由基; ABTS 自由基

中图分类号 TS 201.2; TS 272 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2017)06-0105-08

茶多酚(tea polyphenols, TP)是茶叶中多元酚的混合物,主要包括儿茶素等类黄酮物质如 EGCG、EGC、EC、C 以及少量酚酸如没食子酸等,因结构中存在多个酚羟基而具有强抗氧化活性^[1]。茶多酚不仅大量存在于茶中,还可作为一种天然抗氧化剂被广泛应用于食品和保健品中^[2]。无论是以饮用的方式还是以食用的方式被摄入人体,茶多酚都需要经过人体胃肠消化过程。目前,多采用化学浸提法评价茶叶中的茶多酚含量及抗氧化活性,但忽略了胃肠消化对茶多酚消化稳定性的影响。

体外模拟肠胃消化试验多以茶汤或是茶叶提取物为主,如 Tenore 等^[3]研究发现茶汤经模拟胃肠消化后,茶多酚主要组分发生氧化、聚合、降解等反应,其含量显著降低。Shim 等^[4]研究茶叶提取物模拟消化后茶多酚含量亦显著降低。Record 等^[5]发现茶汁经模拟胃肠消化后,茶多酚不仅含量显著降低,而且其抗氧化活性也显著降低。同时,研究表明 Vc、柠檬酸可显著减缓模拟消化中茶多酚含量的损失^[4]。因此,摄入食物等在一定程度上也会影响消

化过程中茶多酚在胃肠液中的含量及抗氧化活性。而茶汤或茶叶提取物的成分较多,对于准确揭示茶多酚经模拟消化后的含量和抗氧化活性的变化,可能会有一定的影响;另一方面,当前有关食物基质对模拟消化茶多酚含量及抗氧化活性影响的研究相对较少。因此,本研究以茶多酚为研究对象,通过模拟人体胃肠道消化的方法研究茶多酚消化前后其含量及抗氧化活性的变化,同时,采用牛奶、糊化淀粉、白砂糖、柠檬酸和食用油等 5 种食物基质分别研究其对模拟胃肠消化茶多酚含量及抗氧化活性的影响,以期阐明模拟胃肠道消化对茶多酚稳定性的影响及牛奶、糊化淀粉等 5 种食物基质分别与茶多酚共存时对其消化稳定性的影响,从而为进一步阐明茶多酚对人体的潜在功效及其营养价值和药用价值提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

1) 试验材料。茶多酚(≥98%, TP, 安徽红星药

收稿日期: 2017-02-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2662017PY054)

王瑞, 硕士. 研究方向: 茶叶深加工与综合利用. E-mail: 535571747@qq.com

通信作者: 杨晓萍, 博士, 副教授. 研究方向: 茶叶生物化学及深加工. E-mail: yangxp@mail.hzau.edu.cn

业股份有限公司);脱脂牛奶、白砂糖、食用柠檬酸、食用油(金龙鱼大豆油)、马铃薯淀粉均为市售。

2)主要试剂。胃蛋白酶(Pepsin 1:3 000)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-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸二胺盐(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。

3)主要仪器。722N 型可见分光光度计, 上海菁华科技仪器有限公司;HH-6 型数显恒温水浴锅, 国华电器有限公司;IS-RDD3 型台式恒温振荡器, 美国 Crystal 公司;TDL-5-A 型离心机, 上海安亭科学仪器厂。

1.2 样品处理

将质量分数为 2% 的淀粉糊化后冷却待用。依据日常生活、茶饮料标准及食品添加剂标准等, 在总体积为 10 mL 的消化样品中添加一定量的食物基质, 具体如下: 分别向锥形瓶中加入 7 mL 糊化淀粉、2 mL 食用油、3 mL 牛奶、0.4 g 柠檬酸和 0.6 g 白砂糖, 各加入一定体积的蒸馏水, 再各加入 0.04 g 茶多酚, 则最终的混合液中以上食物基质的添加量分别为糊化淀粉 70%、食用油 20% (体积分数)、牛奶 30% (体积分数)、柠檬酸 4% (质量分数) 和白砂糖 6% (质量分数)。以纯茶多酚溶液为未消化样。

1.3 模拟消化样品制备

1)人工胃肠液配制。采用 Hur 等^[6]的方法, 建立模拟消化模型。按文献所述先配好胃原液、十二指肠原液和胆原液。模拟胃液: 胃蛋白酶、粘蛋白、胃原液分别为 0.5 g、0.6 g、100 mL, 混合均匀, 并调 pH 至 1.3±0.2。模拟十二指肠液: 胰酶粉、脂肪酶、十二指肠原液分别为 1.8 g、0.3 g、100 mL, 混合均匀, 并调 pH 至 8.1±0.2。模拟胆汁: 猪胆盐、胆原液分别为 6.0 g、100 mL, 混合均匀, 并调 pH 至 8.2±0.2。

2)模拟胃消化过程。向 10 mL 上述样品中分别加入 20 mL 模拟胃液, 置于恒温振荡器中 37℃、100 r/min 震荡 2.0 h 后将此消化液置于冰浴中钝化酶活, 15~20 min 后 4 500 r/min 离心 10 min, 取上清液用于测定茶多酚含量及其抗氧化活性。在测定吸光度时, 分别以空白胃液、无茶多酚的食物基质

胃消化样为参比, 用以消除模拟胃液及食物基质自身对测定结果造成的影响。

3)模拟肠消化过程。将模拟胃消化后的消化液, 先用 1.0 mol/L NaHCO₃ 调 pH 至 6.0±0.2, 然后加入 30 mL 模拟肠液(20 mL 模拟十二指肠液和 10 mL 模拟胆汁), 混合均匀后置于恒温振荡器中 37℃、100 r/min 震荡 2.0 h, 再将此消化液置于冰浴中钝化酶活, 4 500 r/min 离心 10 min, 取上清液用于测定茶多酚含量及其抗氧化活性。在测定吸光度时, 分别以空白胃肠液、无茶多酚的食物基质胃肠消化样为参比, 消除模拟胃肠液及食物基质自身对测定结果造成的影响。

1.4 茶多酚含量的测定

参照国标 GB/T 8313—2008 测定^[7], 绘制没食子酸浓度-吸光度标准曲线, 结果表示为每克茶多酚相当于没食子酸的质量(g), g GAE/g TP。

1.5 抗氧化活性的测定

1)总抗氧化能力。采用 FRAP 法测定^[8]。TPTZ 反应液: 10 mmol/L TPTZ 溶液(用 40 mmol/L HCl 溶液定容)、20 mmol/L 氯化铁溶液、0.3 mol/L 醋酸钠缓冲溶液(pH 3.6)以体积比 1:1:10 混匀, 并于 37℃ 恒温水浴 10~15 min 后待用; 准确吸取稀释样品溶液 100 μL, 加入 3.0 mL TPTZ 反应液, 37℃ 水浴 30 min, 于 593 nm 处测定吸光度。以不同浓度(0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mmol/L)的硫酸亚铁绘制标准曲线。样品的总抗氧化能力(FRAP)就表示为每克茶多酚相当于 Fe²⁺ 的物质的量, mmol Fe²⁺/g TP。

2)DPPH·清除能力。参考 Blois^[9]的方法测定。取 2.0 mL 待测液, 加入 2.0 mL DPPH 乙醇溶液, 摇匀后室温下暗处静置 30 min, 于 517 nm 处测定吸光度(A_x); 同时测定 2.0 mL 待测液与 2.0 mL 95% 乙醇溶液混合液的吸光度(A_y), 以排除待测液对测定的影响; 测定 2.0 mL 待测液溶剂与 2.0 mL DPPH 乙醇溶液混合液的吸光度(A₀)。按下式计算 DPPH·清除率:

$$\text{DPPH} \cdot \text{清除率} = [A_0 - (A_x - A_y)] / A_0 \times 100\%$$

以不同质量浓度(3、5、10、15、20 μg/mL)抗坏血酸的清除率为纵轴, 抗坏血酸浓度为横纵绘制标准曲线, 结果表示为每克茶多酚相当于抗坏血酸的质量(g), g VCE/g TP。

3)ABTS⁺·清除能力。根据 Re 等^[10]和 Thaipong 等^[11]的方法稍有调整, 具体如下。ABTS 储

备液:7.0 mmol ABTS 水溶液与 2.45 mmol 过硫酸钾溶液以体积比 1:1 混合均匀,暗处静置 16 h 以上。ABTS 反应液:取储备液用 95% 乙醇溶液稀释,使稀释液在 734 nm 处的吸光值为 0.70 ± 0.05 。测定:取稀释样品 200 μL ,加入 3.0 mL ABTS 反应液,暗处反应 1.0 h 后在 734 nm 处测定吸光值。 ABTS^+ 清除率 = $(A_0 - A_x) / A_0 \times 100\%$,其中, A_0 为空白对照的吸光值; A_x 为样品的吸光值。

以不同质量浓度(0、16、32、48、64、80 $\mu\text{g}/\text{mL}$)抗坏血酸的清除率为纵轴,抗坏血酸浓度为横纵绘制标准曲线,结果表示为每克茶多酚相当于抗坏血酸的质量(g),g VCE/g TP。

1.6 数据分析

所有试验均为 3 次重复,结果表示为 $\bar{x} \pm S$ 。数据用 SPSS 19.0 软件中的 One-way ANOVA 分析,通过 LSD 检验进行组间比较, $P < 0.05$ 表示差异显著。

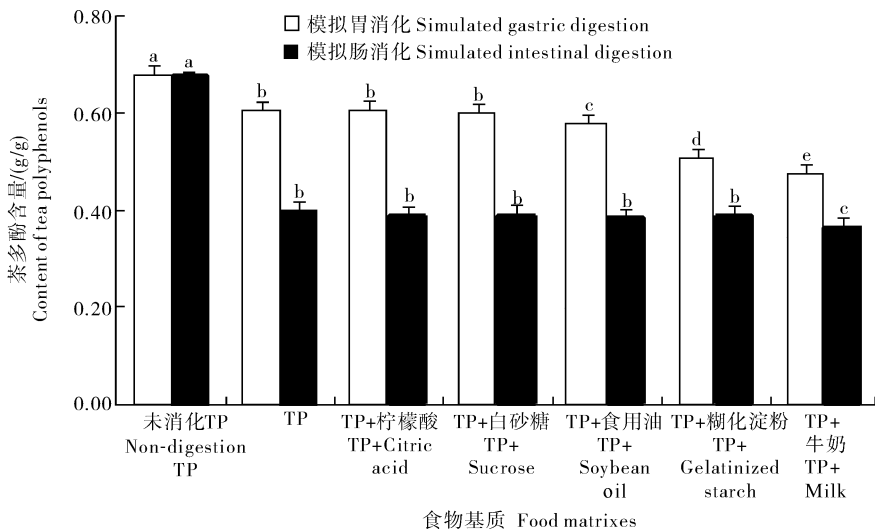
2 结果与分析

2.1 模拟胃肠消化对茶多酚含量的影响

由图 1 可知,茶多酚经过模拟胃肠消化后其含量均显著降低。茶多酚经模拟胃消化后其含量显著降低了 10.4%,模拟肠消化后其含量显著降低了 41.7%。结果表明,模拟胃肠消化过程中,茶多酚对肠液更为敏感,而在胃液中相对较为稳定。

2.2 食物基质对模拟胃肠消化茶多酚含量的影响

由图 1 可知,不同食物基质分别与茶多酚共存模拟胃肠消化对其含量的影响存在差异。其中,牛奶、糊化淀粉和食用油的添加分别显著增加了模拟胃消化后茶多酚含量的降低,柠檬酸或白砂糖的添加则对其模拟胃消化后的含量没有明显影响;牛奶的添加显著增加了模拟肠消化后茶多酚含量的降低,柠檬酸、白砂糖、糊化淀粉或食用油的添加对茶多酚模拟肠消化后其含量的影响不显著。这表明部分食物基质能够显著影响茶多酚在模拟胃肠消化



图中不同小写字母表示在 0.05 水平达显著性差异 ($P < 0.05$)。Different lowercase alphabets represented significant difference at 0.05 levels; 未消化 TP: 未经模拟胃肠消化处理的 TP 样品 TP without simulated digestion; TP: 经模拟胃肠消化后的 TP 样品 TP after simulated digestion; TP+柠檬酸/白砂糖/食用油/糊化淀粉/牛奶: 茶多酚分别与柠檬酸/白砂糖/食用油/糊化淀粉/牛奶共存模拟胃肠消化后的 TP 样品 TP after simulated digestion with presence of citric acid/sucrose/soybean oil/gelatinized starch/milk. 下同 The same as below.

图 1 共存食物基质对模拟胃肠消化茶多酚含量的影响

Fig.1 Effects of coexistence food matrixes on the contents of tea polyphenols after simulated digestion

过程中的稳定性。

与茶多酚单独模拟胃消化比,牛奶、糊化淀粉和食用油与茶多酚共存模拟胃消化后,茶多酚含量分别显著降低了 21.7%、15.0% 和 3.3%。与茶多酚单

独模拟肠消化比,牛奶与茶多酚共存模拟肠消化后,茶多酚含量显著降低了 7.7%。结果表明,模拟肠消化在一定程度上缓解了牛奶、糊化淀粉以及食用油分别与茶多酚共存消化时对茶多酚含量的影响。

2.3 食物基质对模拟胃肠消化茶多酚抗氧化活性的影响

1) 食物基质对茶多酚总抗氧化能力的影响。由图 2 可知, 茶多酚经过模拟胃肠消化后, 其总抗氧化能力 (FRAP) 均显著降低。茶多酚经模拟胃消化后其 FRAP 显著降低了 5.4%, 模拟肠消化后其 FRAP 显著降低了 56.9%, 表明茶多酚模拟肠消化后的 FRAP 明显低于模拟胃消化后的 FRAP, 这与模拟消化后茶多酚含量的变化趋势一致, 说明茶多酚经过模拟消化后其含量的改变也导致了抗氧化活性的改变。

图 2 表明, 不同食物基质与茶多酚共存模拟消

化对其 FRAP 的影响存在差异。模拟胃消化后, 糊化淀粉和牛奶的添加分别显著增加了茶多酚 FRAP 的降低, 分别添加柠檬酸、白砂糖和食用油时对茶多酚 FRAP 没有显著影响; 模拟肠消化后, 柠檬酸的添加显著减缓了茶多酚 FRAP 的降低, 分别添加白砂糖、食用油、糊化淀粉和牛奶时对茶多酚 FRAP 没有显著影响。如图 2 所示, 与茶多酚单独模拟胃消化相比, 糊化淀粉和牛奶与茶多酚共存模拟胃消化后, 茶多酚 FRAP 分别显著降低了 13.5% 和 16.3%; 与茶多酚单独模拟肠消化比, 柠檬酸与茶多酚共存模拟肠消化后, 茶多酚 FRAP 显著增加了 48.3%。

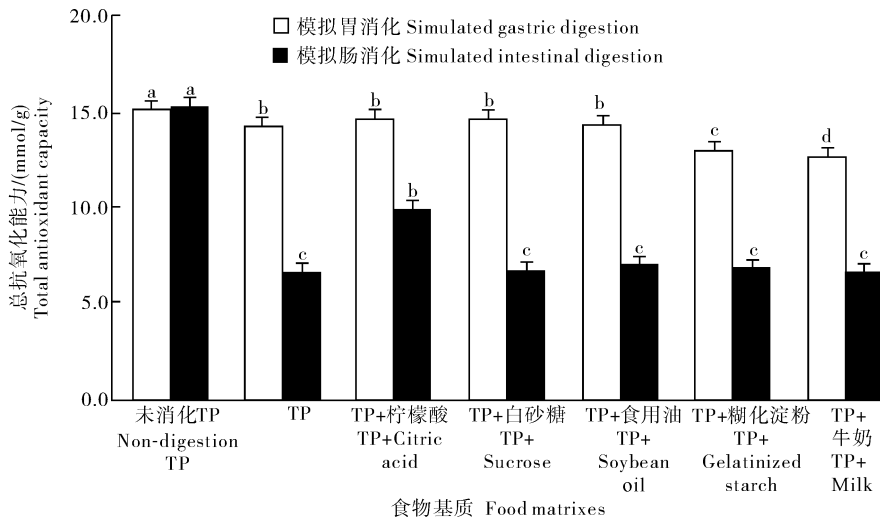


图 2 共存食物基质对模拟消化茶多酚总抗氧化能力的影响

Fig.2 Effects of coexistence food matrixes on FRAPs of tea polyphenols after simulated digestion

综上所述, 柠檬酸与茶多酚共存模拟肠消化, 虽然对茶多酚含量没有显著影响, 但却显著减缓了茶多酚 FRAP 的降低; 食用油与茶多酚共存模拟胃消化, 虽然显著增加了茶多酚含量的降低, 但对其 FRAP 没有明显影响; 牛奶与茶多酚共存模拟肠消化, 虽然显著增加了茶多酚含量的降低, 但却对其 FRAP 没有显著影响。由此可见, 在模拟消化中柠檬酸、食用油以及牛奶均可对茶多酚 FRAP 起到协同增效作用, 而白砂糖对茶多酚模拟消化后的 FRAP 没有明显影响。

2) 食物基质对茶多酚清除 DPPH· 能力的影响。如图 3 所示, 茶多酚经过模拟胃消化后其清除 DPPH· 能力显著增加了 40.9%, 说明茶多酚经模拟胃消化后可能生成了具有更强清除 DPPH· 能力的物质; 模拟肠消化后其清除 DPPH· 能力显著降低了 46.2%。

图 3 表明, 不同食物基质与茶多酚共存模拟对其清除 DPPH· 能力的影响存在差异。模拟胃消化后, 柠檬酸的添加显著减缓了茶多酚清除 DPPH· 能力的降低, 糊化淀粉和牛奶的添加分别显著增加了茶多酚清除 DPPH· 能力的降低, 白砂糖或食用油的添加对茶多酚清除 DPPH· 能力没有明显影响; 模拟肠消化后, 食用油的添加显著减缓了茶多酚清除 DPPH· 能力的降低, 分别添加柠檬酸、白砂糖、糊化淀粉和牛奶时对茶多酚清除 DPPH· 的能力没有明显影响。如图 3 所示, 与茶多酚单独模拟胃消化相比, 柠檬酸与茶多酚共存模拟胃消化清除 DPPH· 能力显著增加了 19.4%; 糊化淀粉和牛奶与茶多酚共存模拟胃消化后其清除 DPPH· 能力分别显著降低了 15.4% 和 14.9%; 与茶多酚单独模拟肠消化比, 食用油与茶多酚共存模拟肠消化后其清除 DPPH· 能力显著增加了 9.3%。

结果表明,在模拟消化中柠檬酸、食用油以及牛奶均可对清除 DPPH· 能力起到协同增效作用,而白砂糖对茶多酚模拟消化后清除 DPPH· 的能力没有明显影响。

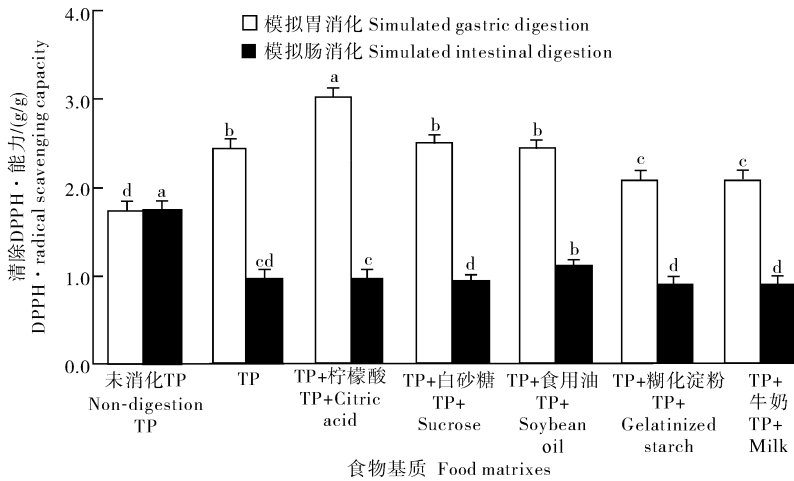


图 3 共存食物基质对模拟消化茶多酚清除 DPPH· 能力的影响

Fig.3 Effects of coexistence food matrixes on DPPH radical scavenging capacities of tea polyphenols after simulated digestion

3)食物基质对茶多酚清除 ABTS⁺· 能力的影响。如图 4 所示,茶多酚经过模拟胃消化后其清除 ABTS⁺· 能力为 2.30±0.03 g VCE/g TP,消化前后没有明显变化;模拟肠消化后其清除 ABTS⁺· 能力显著降低了 37.6%。这说明茶多酚经模拟胃消化后其清除 ABTS⁺· 能力相对较强。

图 4 结果表明,不同食物基质与茶多酚共存模拟消化对其清除 ABTS⁺· 能力的影响存在差异。模拟胃消化后,柠檬酸、白砂糖、糊化淀粉和牛奶的添加分别显著促进了茶多酚清除 ABTS⁺· 能力的降低,食用油的添加则对茶多酚清除 ABTS⁺· 能

力没有明显影响;模拟肠消化后,柠檬酸、食用油、糊化淀粉和牛奶的添加分别显著减缓了茶多酚清除 ABTS⁺· 能力的降低,白砂糖的添加则对茶多酚清除 ABTS⁺· 能力的影响不明显。如图 4 所示,与茶多酚单独模拟胃消化相比,柠檬酸、白砂糖、糊化淀粉和牛奶与茶多酚共存模拟胃消化后,茶多酚清除 ABTS⁺· 能力分别显著降低了 8.3%、5.2%、11.3%和 10.0%;与茶多酚单独模拟肠消化比,柠檬酸、食用油、糊化淀粉和牛奶与茶多酚共存模拟肠消化后,茶多酚清除 ABTS⁺· 能力分别显著增加了 27.0%、31.1%、24.3%和 14.9%。

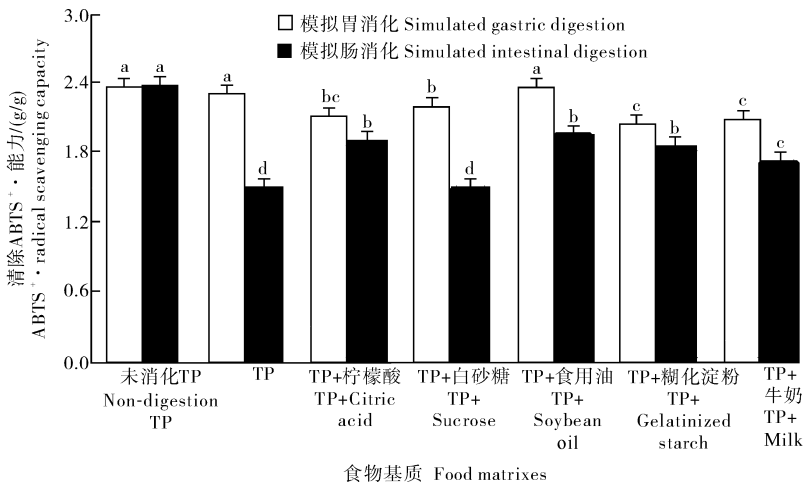


图 4 共存食物基质对模拟消化茶多酚清除 ABTS⁺· 能力的影响

Fig.4 Effects of coexistence food matrixes on ABTS⁺ radical scavenging capacities of tea polyphenols after simulated digestion

结果表明,在消化过程中柠檬酸、食用油、糊化淀粉以及牛奶均可对清除 $ABTS^+$ 能力起到协同增效作用,而白砂糖基本对茶多酚模拟消化后清除 $ABTS^+$ 的能力没有明显影响。

3 讨 论

3.1 模拟胃肠消化对茶多酚含量及其抗氧化活性的影响

有关福林酚法测定模拟胃肠消化过程中 TP 含量,国内外学者早有研究,如 Record 等^[5]研究茶汤模拟消化中 TP 含量的变化,Lamothe 等^[12]研究模拟消化过程中奶酪与绿茶提取物的相互影响等,此外,对其他植物多酚如葡萄多酚^[13]、苹果多酚^[14]等模拟消化过程中多酚含量的测定,也多采用福林酚法,该方法不仅简洁、快速、重复性好,更重要的是测定结果接近真实值。本研究采用福林酚法测定 TP 模拟胃肠消化后的含量发现,TP 经模拟胃消化和模拟肠消化后其含量均显著降低,且模拟肠消化对 TP 含量的影响更为显著。肠液和胆汁的 pH 呈弱碱性,而 TP 结构中的酚性羟基较为活泼,在弱碱性环境下易发生异构、氧化聚合、裂解等降解反应,如 EC 可异构为 $C^{[15]}$,EGCG 和 EGC 的 B 环没食子基易氧化形成半醌类物质^[5,16],同时,TP 中的儿茶素类可在胃肠液作用下降解产生聚酯型儿茶素如同源二聚体(TSA 和 TSD 等)、异源二聚体(m/z 761 等)或发生环裂解反应形成烯炔类物质等^[17],从而造成了模拟肠消化后 TP 含量的降低,但消化过程中胃肠液中主要的消化酶类对 TP 含量影响不大^[16]。因此,肠液和胆汁的弱碱性 pH 可能是造成模拟肠消化后 TP 含量降低的重要原因。同时,消化过程中温度、溶解氧等也可使 TP 发生自氧化、异构化等作用,从而造成 TP 含量的进一步降低^[12]。此外, Lee 等^[18]采用 GC-MS 检测方法研究云南普洱茶提取物在粪便细菌中的代谢表明,提取物中儿茶素经微生物代谢 24 h 后其含量显著降低了 71.2%~72.8%,在细菌酶系的代谢下,TP 可能发生水解、去羟基、脱羧、环裂解等作用进而分解为小分子物质^[19],且上述代谢作用与细菌种类密切相关^[18],因此,TP 在肠道菌群的作用下含量也会降低。可见,TP 在消化过程中,其稳定性受到破坏,可能不利于 TP 的吸收,这是 TP 在体内生物利用率低的主要原因之一^[20]。

一般 TP 的抗氧化活性与其含量呈正相关^[5,21],模拟消化后 TP 含量的降低也会导致其抗氧化活性的降低。比较 TP 模拟消化前后的抗氧化活性发现,模拟胃消化后其 FRAP 显著降低、清除 $ABTS^+$ 也略有降低,但 TP 清除 DPPH 能力显著增强,可能是模拟胃消化阶段,TP 在酸性条件下其儿茶素聚合产物积累相对较多,且产生的聚酯型儿茶素具有更强的清除 DPPH 能力^[22-23];模拟肠消化后其 FRAP、清除 DPPH 和 $ABTS^+$ 能力均显著降低。

3.2 食物基质对模拟消化茶多酚含量及抗氧化活性的影响

比较 TP 与食物基质共存模拟胃肠消化后其含量的变化发现,牛奶、糊化淀粉和食用油分别与 TP 共存模拟消化时,均显著促进了模拟胃消化后 TP 含量的降低,模拟肠消化后仅牛奶显著促进了 TP 含量的降低,表明肠消化过程在一定程度上能够缓解这些食物基质的添加对 TP 含量的影响。TP 与上述食物基质共存模拟消化后其含量降低,可能是多酚类物质与蛋白质、碳水化合物或脂类物质结合形成了复合物^[24],该复合物多是以氢键等非共价键连接,但这种作用力是可逆的,易受 pH、温度以及各自浓度的影响而发生水解反应^[21],因此,在模拟肠消化作用下,TP 可能从复合物中游离出来,从而缓解了 TP 含量的进一步降低;同时,蛋白质、碳水化合物或脂类物质可在消化酶的作用下分解,可能也减少了复合物的形成。

抗氧化研究表明,在模拟胃肠消化中,牛奶、糊化淀粉和食用油的添加虽然促进了 TP 模拟消化后其含量的降低,但这些食物基质可对其模拟消化后的抗氧化活性起到一定的协同增效作用,说明 TP 与适量牛奶、糊化淀粉和油同食,对发挥 TP 的抗氧化功效有积极作用。柠檬酸与 TP 共存模拟消化后,TP 含量没有明显变化,但 TP 的抗氧化活性显著增强,表明柠檬酸对 TP 模拟消化后的抗氧化活性亦有协同增效作用,可能与柠檬酸可以缓解消化过程中 TP 主要抗氧化物质 EGC、EGCG 等的降解有关^[4],因此,柠檬酸可作为抗氧化剂应用于 TP 产品中,起到防止 TP 氧化的作用。白砂糖的添加基本对 TP 模拟消化后的含量及抗氧化活性没有明显影响,说明白砂糖可作为调味剂等应用于食用或药用 TP 产品中。因此,上述几种摄入的食物不同程

度地影响了消化过程中 TP 的含量,但大多数食物基质对其抗氧化活性起到一定协同增效作用。

综上所述,模拟胃肠消化对 TP 稳定性影响较大,尤其是 TP 在肠液中极不稳定。一般 TP 中小分子单体可在小肠被吸收,而其降解产物如聚酯型儿茶素则需要在肠道菌群的作用下转化后才能被吸收^[25]。因此,有关肠道微生物对 TP 生物转化影响等方面的研究还有待进一步深入;同时,摄入的食物等可对 TP 模拟消化后其含量以及抗氧化活性有一定影响,但食物基质与 TP 之间的相互作用复杂,为深入到分子结构水平解析食物基质与 TP 之间相互作用的机制,后续试验仍需采用多种现代分析检测方法进行研究。此外,TP 中儿茶素单体主要以糖苷化、硫酸化和甲基化的形式参与人体代谢^[25],但有关 TP 具体吸收转化机制尚不清楚,仍需采用细胞模型^[26]等深入生物活体研究,从而为更好地发挥 TP 生物活性提供基本理论。

参 考 文 献

- [1] FREI B, HIGDON J V. Antioxidant activity of tea polyphenols *in vivo*: evidence from animal studies[J]. The journal of nutrition, 2003, 133(10): 3275S-3284S.
- [2] 邬新荣, 王岳飞, 张士康, 等. 茶多酚保健功能研究进展与保健食品开发[J]. 茶叶科学, 2010, 30(S1): 501-505.
- [3] TENORE G C, CAMPIGLIA P, GIANNETTI D, et al. Simulated gastrointestinal digestion, intestinal permeation and plasma protein interaction of white, green, and black tea polyphenols [J]. Food chemistry, 2015, 169: 320-326.
- [4] SHIM S M, YOO S H, RA C S, 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.
- [5] RECORD I R, LANE J M. Simulated intestinal digestion of green and black tea[J]. Food chemistry, 2001, 73(4): 481-486.
- [6] HUR S J, DECKER E A, MCCLEMENTS D J. Influence of initial emulsifier type on microstructural changes occurring in emulsified lipids during *in vitro* digestion[J]. Food chemistry, 2009, 114(1): 253-262.
- [7] 中华全国供销合作总社杭州茶叶研究所. GB/T 8313—2008 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [8] 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.
- [9] BLOIS M S. Antioxidant determinations by the use of a stable free radical[J]. Nature, 1958, 181(4617): 1199-1200.
- [10] RE R, PELLEGRINI N, PROTEGGENTE A, et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay [J]. Free radical biology and medicine, 1999, 26: 1231-1237.
- [11] THAIPOONG K, BOONPRAKOB U, KEVIN CROSBY K, 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: 669-675.
- [12] LAMOTHE S, AZIMY N, BAZINET L, et al. Interaction of green tea polyphenols with dairy matrices in a simulated gastrointestinal environment[J]. Food and function, 2014, 5(10): 2621-2631.
- [13] TAGLIAZUCCHI D, VERZELLONI E, BERTOLINI D, et al. *In vitro* bio-accessibility and antioxidant activity of grape polyphenols [J]. Food chemistry, 2010, 120(2): 599-606.
- [14] BOUAYED J, HOFFMANN L, BOHN T. Total phenolics, flavonoids, anthocyanins and antioxidant activity following simulated gastrointestinal digestion and dialysis of apple varieties: bioaccessibility and potential uptake[J]. Food chemistry, 2011, 128(1): 14-21.
- [15] ZHU Q Y, ZHANG A, TSANG D, et al. Stability of green tea catechins[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 1997, 45: 4624-4628.
- [16] GREEN R J, MURPHY A S, SCHULZ B, et al. Common tea formulations modulate *in vitro* digestive recovery of green tea catechins[J]. Molecular nutrition and food research, 2007, 51(9): 1152-1162.
- [17] 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.
- [18] LEE H C, JENNER A M, LOW C S, et al. Effect of tea phenolics and their aromatic fecal bacterial metabolites on intestinal microbiota[J]. Research in microbiology, 2006, 157(9): 876-884.
- [19] SPENCER J P. Metabolism of tea flavonoids in the gastrointestinal tract[J]. The journal of nutrition, 2003, 133(10): 3255S-3261S.
- [20] 赖珺, 廖正根, 杨明福, 等. 生物利用度的研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2010, 16(18): 226-229.
- [21] ARTS M J, HAENEN G R, WILMS L C, et al. Interactions between flavonoids and proteins: effect on the total antioxidant capacity[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2002, 50(5): 1184-1187.
- [22] 徐斌, 江和源, 张建勇, 等. 不同 pH 条件下 TSs 的形成机理及其与 TFs 的竞争性形成研究[J]. 茶叶科学, 2015, 35(3): 281-289.
- [23] 徐斌, 薛金金, 江和源, 等. 茶叶中聚酯型儿茶素研究进展[J]. 茶叶科学, 2014, 34(4): 315-323.
- [24] JAKOBEK L. Interactions of polyphenols with carbohydrates,

- lipids and proteins[J].Food chemistry,2015,175:556-567.
- [25] MONAGAS M, URPI-SARDA M, SÁNCHEZ-PATÁN F, et al. Insights into the metabolism and microbial biotransformation of dietary flavan-3-ols and the bioactivity of their metabolites [J].The Royal Society of chemistry,2010(1):233-253.
- [26] XIE Y, KOSNSKA A, XU H, et al. Milk enhances intestinal absorption of green tea catechins in in vitro digestion/Caco-2 cells model[J].Food research international,2013,53(2):793-800.

Effects of food matrix on content and antioxidant activity of tea polyphenols during simulated gastrointestinal digestion

WANG Rui CHEN Bowei YANG Xiaoping WANG Yan
SONG Xiaowei HUANG Xin YIN Jiaya

College of Horticulture and Forestry Science, Huazhong Agricultural University/
Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Ministry of Education, Wuhan 430070, China

Abstract Simulated gastric intestinal digestion model was used to evaluate effects of food matrixes on the contents and antioxidant activities of tea polyphenols *in vitro*. Results showed that adding milk, gelatinized starch and soybean oil significantly decreased content of tea polyphenols by 21.7%, 15.0% and 3.3%, respectively. Comparing tea polyphenols after simulated gastric digestion, adding sucrose or citric acid had no influence on its content. DPPH • radical scavenging capacity of tea polyphenols significantly increased and ABTS⁺ • radical scavenging capacity significantly decreased after adding citric acid, with no changes of the total antioxidant capacity. ABTS⁺ • radical scavenging capacity of tea polyphenols significantly decreased after adding sucrose. Other antioxidant activities had no changes. The antioxidant activities of tea polyphenols were significantly reduced after adding gelatinized starch or milk. Soybean oil had no influences on its antioxidant activities. Comparing with tea polyphenols after simulated gastrointestinal digestion, adding milk significantly decreased contents of tea polyphenols by 7.7% and adding others had no influence. The total antioxidant capacity and ABTS⁺ • radical scavenging capacity of tea polyphenols significantly increased after adding citric acid. DPPH • radical scavenging capacity had no change. DPPH • and ABTS⁺ • radical scavenging capacity of tea polyphenols significantly increased after adding soybean oil, with total antioxidant capacity of no change. ABTS⁺ • radical scavenging capacity of tea polyphenols significantly increased after adding gelatinized starch or milk, with other antioxidant activities of no changes. The antioxidant activities of tea polyphenols had no changes after adding sucrose.

Keywords tea polyphenols; food matrixes; simulated gastrointestinal digestion; total antioxidant capacity; DPPH • ; ABTS⁺ •

(责任编辑:陆文昌)