

Antioxidant Properties of Plant Polyphenols in Food Systems and Their Application Research

Yan Li

Dalian Customs Technology Center, Dalian, Liaoning, 116000, China

Abstract

Plant polyphenols are important natural antioxidants in foods, and their activity is regulated by both molecular structural characteristics and the food matrix environment. Polyphenols act through antioxidant mechanisms such as hydrogen atom transfer and single electron transfer, but their structure-activity relationships show significant matrix dependence in real food systems. Interactions between food components, disturbances from processing conditions, and effects at phase interfaces can all cause discrepancies between in vitro chemical evaluations and actual application outcomes. Techniques such as microencapsulation, nano-delivery systems, and synergistic regulation strategies between polyphenols and food components provide technical approaches to addressing the stability challenges of polyphenols in complex food environments. Applications of grape seed extracts in model emulsified systems show that proper formulation design and process control can greatly enhance the functional value of polyphenols, laying the foundation for the precise application of natural antioxidants in the food industry.

Keywords

plant polyphenols; antioxidant mechanisms; structure-activity relationship

植物多酚在食品体系中的抗氧化特性及其应用研究

李妍

大连海关技术中心, 中国·辽宁 大连 116000

摘要

植物多酚是食品中的重要天然抗氧化剂, 它的活性受到分子结构特征和食品基质环境的双重调节。多酚以氢原子转移、单电子转移的抗氧化机理起作用, 但是构效关系在真实食品体系中表现出明显的基质依赖性。食品组分间的相互作用、加工条件的扰动、相态界面的影响都会使体外化学评价的结果与实际应用效果有偏差。微胶囊化技术、纳米递送体系、多酚-食品组分的协同调控策略, 给破解多酚在复杂食品环境中的稳定性难题赋予了技术途径。葡萄籽提取物在模拟乳化体系中应用表明, 合适的配方设计、工艺控制可以大大提高多酚的功能化价值, 为天然抗氧化剂在食品工业中的精准应用打下基础。

关键词

植物多酚; 抗氧化机制; 构效关系

1 引言

植物多酚属于次生代谢产物, 它在植物抵御氧化胁迫时起着重要的作用, 因此它向食品体系的迁移应用似乎是理所当然的。但是多酚在纯化溶液中表现出来的强大的自由基清除能力, 在真实的食品基质中却大打折扣, 甚至在某些情况下变成促氧化因子。

【作者简介】李妍(1984-), 中国辽宁大连人, 本科, 高级工程师, 从事食品农药残留、食品添加剂、保健品非法添加检测等研究。

2 植物多酚的抗氧化作用机理与构效关系

2.1 基于氢原子转移与单电子转移的初级抗氧化机制

多酚通过酚羟基氢原子转移稳定脂质自由基, 自身形成的酚氧自由基由于共轭体系而稳定。原花青素 B2 的酚羟基解离能低于脂质过氧自由基夺氢阈值, 反应可以自发进行。单电子转移机制中多酚直接把电子转移给自由基, 形成半醌式中间体后歧化。两种机制在不同的微环境中互相切换, 受 pH 值、溶剂极性以及自由基类型的影响^[1]。

2.2 多酚结构(羟基位置、共轭体系、糖基化)与自由基清除能力关联

B 环邻位二羟基构型由于氢键效应明显增强活性, 儿茶素清除速率远大于单羟基儿茶素。共轭体系延伸会降低酚氧自由基的能量, 但是原花青素的活性随着聚合度呈钟形曲线, 三聚体后由于空间位阻降低。糖基化增强水溶性, 但

是占据酚羟基位点,活性下降约三成。

2.3 多酚对过渡金属离子的螯合作用及促氧化双面性

邻位酚羟基会和金属离子形成螯合物,从而阻断芬顿反应,在中性 pH 下多酚和铁配合物会使得脂质氧化的诱导期延长数倍。但是碱性条件下多酚氧化为醌类可以还原三价铁重启芬顿循环,加快自由基的生成。乳化体系储存后 pH 值变碱,促氧化转变就会发生,用量和 pH 值必须精确控制。

3 食品复杂体系对多酚抗氧化效能的影响因素

3.1 食品组分(蛋白质、脂类、碳水化合物)与多酚的相互作用

蛋白质通过疏水作用、氢键和静电引力与多酚结合成复合物,多酚的疏水性芳香环可以插入到蛋白质的疏水口袋里,酚羟基也可以与肽链的氨基、羧基形成氢键网络,这样的结合既改变了蛋白质的构象又影响了多酚的可及性。葡萄籽提取物和乳清蛋白相互作用研究显示,多酚结合之后蛋白质二级结构出现明显变化, α -螺旋含量减少,无规卷曲增多,被蛋白质包裹的多酚对水相自由基的清除能力降低,但是在乳化体系中蛋白质-多酚复合物可以锚定在油水界面,将多酚递送至脂质氧化的关键位点。脂类不饱和度和氧化敏感性决定了多酚保护的必要性和难度,葡萄籽提取物在富含亚油酸的油脂体系中表现出很强的氧化抑制效果,但是多酚的亲脂性不足限制了它在纯油相中的溶解和分散,大部分多酚滞留在容器壁面或者聚集成团,真正发挥作用的有效浓度远低于添加量^[2]。

3.2 加工条件(热处理、pH 值、光照)对多酚稳定性与活性的影响

热处理是食品加工的常规操作,但也是多酚稳定性的严峻考验,高温下多酚会发生异构化、聚合甚至降解,酚羟基氧化成醌,再进一步缩合形成褐色聚合物。葡萄籽提取物在模拟巴氏杀菌条件下降解动力学研究中发现,温度每升高 10 度降解速率常数增大近一倍,符合阿伦尼乌斯方程预测,但是短时高温处理反而会提高抗氧化活性,因为热诱导结构变化使更多的活性位点暴露出来。pH 值通过改变多酚的解离状态和氧化还原电位来深刻影响其抗氧化性能,酸性环境下多酚以分子态存在结构稳定但是亲水性降低,碱性条件下促进酚羟基解离为酚氧负离子虽然增强了电子供给能力,但是也加速了自氧化过程。葡萄籽提取物在不同的 pH 缓冲液中稳定性比较,pH 三到五区间内活性保留率最高,超过七后迅速下降,溶液颜色由浅黄变为深褐表示氧化聚合。光照特别是紫外光直接激发多酚分子电子跃迁产生激发态多酚与活性氧物种,激发态多酚可与基态氧发生能量转移生成单线态氧,这是氧化能力极强的活性氧。

3.3 食品相态(水包油、油包水)与多酚界面分布及活性表达

乳化体系相态决定多酚的空间分布格局。水包油型乳

液中多酚主要溶解在水相中,需要穿过界面膜才能接触油相脂质底物,油包水型则把多酚困在内水相和外油相脂质之间,隔绝得更彻底。葡萄籽提取物在两种相态乳液中抗氧化效果存在显著差异,水包油体系中由于多酚可以在界面富集从而保护效果好,油包水体系中由于多酚被囚禁所以效果差,说明“极性悖论”并不是普遍规律,界面特性以及乳化剂类型的影响往往比多酚本身的极性要大。界面活性物质乳化剂和多酚在界面的竞争吸附改变了界面的化学环境,非离子型乳化剂通过氢键和多酚相互作用,可以协同增强界面的抗氧化屏障,离子型乳化剂由于静电作用排斥或者吸引多酚,改变其界面浓度。液滴尺寸影响比表面积和界面多酚总量,纳米乳液因为液滴微小而具有很大的比表面积,但是实际测定发现纳米乳液氧化速率反而加快,原因是小液滴曲率半径极小导致界面张力过高,界面结构松散多孔,氧气渗透速率激增^[3]。

3.4 体外化学评估方法与真实食品体系抗氧化效果的相关性分析

DPPH、ABTS 等自由基清除法常被用来快速筛选多酚活性,但是这些方法使用水溶性合成自由基,反应在均相溶液中进行,与食品体系中脂质过氧化、蛋白质氧化等异相反应存在本质区别。葡萄籽提取物在 DPPH 法中表现出的强活性在实际油脂体系中并没有得到体现,两者相关系数低于预期,说明体外评估的预测能力较差。氧自由基吸收能力法虽然更接近生理条件,但是它所用的荧光素探针在食品基质中容易受到干扰,蛋白质、色素等成分的本底荧光和淬灭效应都会导致测定值偏离真实。脂质氧化体系如亚油酸乳液法、油脂氧化诱导期测定等虽然更接近食品实际,但仍然是简化模型,缺少真实食品的复杂组分和加工历程。葡萄籽提取物在纯亚油酸体系中表现出的抗氧化效果,与含有蛋白质、碳水化合物的复配体系中存在明显的差异,后者由于组分相互作用而表现出非线性效应,简单模型的结论不能直接外推,建立与终端应用场景高度匹配的评价体系,才是提高活性评价可靠性的根本途径。

4 多酚在食品中功能化应用的策略与技术

4.1 基于微胶囊化与纳米递送体系的活性保护与靶向释放

微胶囊化是用壁材把多酚包裹起来,隔绝它与外界环境的接触,从而减缓其在加工储存中发生降解的速度。喷雾干燥、冷冻干燥、复凝聚等技术可以将葡萄籽提取物包裹在多糖、蛋白质或者脂质壁材里,形成微米级颗粒。壁材的选择要兼顾阻隔性、成膜性和成本,阿拉伯胶由于乳化性能好而常被用来包埋亲水性多酚,但是其阻氧性能一般,壁材厚度要达到一定值才能有效隔绝氧气,这又增加了颗粒尺寸和成本。复合壁材例如阿拉伯胶和乳清蛋白的组合,可以起到相互增益的效果,蛋白质赋予界面活性剂结构强度,多糖贡

献阻隔性能和缓释功能。

纳米递送体系把多酚负载在纳米尺度的载体上,明显提高其生物利用度和靶向性。脂质体、纳米乳液、固体脂质纳米粒等载体可以保护多酚不受消化酶和pH值变化的影响,在小肠部位释放来提高吸收效率。葡萄籽提取物负载脂质体的制备研究显示,磷脂和多酚的摩尔比、包封方法、粒径分布都会影响包封率和释放行为,在优化的条件下包封率可以达到80%以上,体外模拟消化实验中肠道释放率明显高于游离多酚。

4.2 多酚作为天然防腐剂在抑制脂质氧化与微生物生长中的应用

脂质氧化是富脂食品品质劣变的首要原因,合成抗氧化剂BHT、BHA使用受限促使天然替代品的研发。葡萄籽提取物在肉制品中的应用表明,适当添加量可以使冷藏储存期延长近一倍,脂质氧化指标过氧化值、硫代巴比妥酸值的增长速率明显减慢,感官评价中酸败味出现的时间推迟。但是多酚的加入会改变肉色,高浓度时导致褐变加深,消费者接受度下降,需要在抗氧化效果和感官品质之间做出权衡,或者采用真空包装、充氮等方式来降低多酚用量而不影响保质期。

多酚的抗菌活性是由于它破坏了微生物的细胞膜,抑制了酶的活性。酚羟基与膜蛋白的疏水作用使膜的通透性增大,胞内物质外漏,多酚还可以和细菌DNA结合干扰其复制转录。葡萄籽提取物对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等常见食源性致病菌的抑菌实验表明,最小抑菌浓度处于毫克每毫升量级,比化学防腐剂低,但是联合使用可以产生协同增效,允许降低化学防腐剂用量以满足清洁标签的要求。抗菌机制的多靶点特点也能降低耐药性发生的几率,这也是多酚作为天然防腐剂特有的优势。

4.3 多酚在功能食品与保健食品中的稳态化添加工艺

功能食品要求活性成分在货架期内保持稳定,在消化道中有效释放,对多酚的添加工艺提出了很高的要求。固体食品如烘焙制品在高温作用下多酚大量降解,所以需要采用低温预混、分段添加等手段减少损失,或者选择热稳定性较好的多酚来源。液体食品如饮料,pH调节、充氮包装、避光保存等手段可以延长多酚活性的保持时间,但是成本的增加是不可避免的。葡萄籽提取物稳定化果汁饮料的研究表明,添加抗坏血酸为共同抗氧化剂,能够减缓多酚本身的氧化,活性保存率能提高到九成以上。

剂型创新给多酚的稳态化提供新的思路。片剂、胶囊等固体剂型用控制释放技术使多酚在胃中稳定存在,在肠道中靶向释放。肠溶包衣材料如丙烯酸树脂在酸性环境下不

溶,遇到碱性肠液迅速溶解释放内容物。软糖、口含片等新型剂型由于口感好而受到消费者的喜爱,但是含水量高、储存温度变化大,对多酚的稳定性是考验。葡萄籽提取物软糖的货架期试验表明,水分活度控制是关键,水分活度低于临界值时多酚降解速率明显减慢,质构和风味也较好。

4.4 多酚-食品组分互作对产品感官品质及营养特性的协同调控

多酚的涩味和苦味会限制它高浓度使用。涩味是由多酚和唾液蛋白结合形成的蛋白质沉淀造成的,苦味是由味觉受体被激活而产生的。糖基化、酰化等修饰可以降低涩感,但是活性损失是代价。葡萄籽提取物在乳制品的应用发现乳蛋白可以部分掩蔽多酚的涩味。

多酚和其他营养素之间相互作用影响产品的营养价值。多酚可以提高某些维生素的稳定性,比如与维生素E的协同抗氧化作用,但是也会抑制铁、锌等矿物质的吸收,因为多酚的螯合作用降低了金属离子的生物可利用性。葡萄籽提取物增强的谷物食品中,铁吸收率降低近三成,在营养干预项目中要注意。通过添加抗坏血酸等还原剂,可以部分逆转多酚对铁吸收的抑制,但是最佳配比需要人体试验来验证,不能仅凭体外模拟来推断。

5 结语

植物多酚在食品体系中的抗氧化应用,不是简单的“天然替代合成”。分子层面的构效关系给活性预测赋予了理论框架,但无法完全涵盖复杂食品基质里多种交互效应,加工条件的扰动以及相态界面的空间限制,把多酚从理想状态拉回严酷现实。微胶囊化、纳米递送等技术的发展为解决稳定性问题提供了新途径,但是成本和工艺复杂度增加,产业界在技术可行性与经济合理性之间要做出慎重选择。葡萄籽提取物的应用实践表明,成功的功能化要依靠对食品体系特性精准地设计,不能简单地套用体外评估的数据和结论。未来研究要集中于多酚在真实食品环境中的行为跟踪和机制解析,创建起从分子到宏观、从体外到体内多层次的评价体系,从而给天然抗氧化剂的理性运用创建起牢固的基础。

参考文献

- [1] 刘雨欣,贾茹,吴安楠,李全宏,廖小军,赵婧.植物多酚对线粒体的保护作用研究进展[J].食品工业科技,2025,46(9):456-465.
- [2] 庞楚耀,黎江明.天然植物多酚对冷鲜肉抗氧化保鲜效果的实验研究[J].中外食品工业,2025(12):74-76.
- [3] 李凯利,周颖洁,尚超越,郎育杰,陈晓晨,高磊,曾祥芳,俞海峰,刘凤菊,秦鹏,褚瑰燕,蔡传江.布拉迪酵母和植物多酚对母猪繁殖性能、抗氧化能力、免疫功能和粪便菌群的影响[J].动物营养学报,2025,37(9):5824-5837.