

# 高纯碱性复合维生素C抗氧化功效

陈章贵 向思前

海南惠豆生物科技有限公司

DOI:10.32629/fcmr.v7i4.18108

**[摘要]** 维生素C作为人体内重要的水溶性抗氧化剂,在维持氧化还原平衡、抵御氧化应激损伤中发挥关键作用。与传统酸性抗坏血酸不同,它通过将抗坏血酸与矿物质结合形成抗坏血酸盐,创造出pH值中性或偏碱性的稳定化合物。这种结构改造不仅解决了普通维生素C的胃肠刺激问题,更通过矿物质协同效应和提升生物利用度,实现了抗氧化效能的质的飞跃。其抗氧化作用是一个多维度、系统性的生物工程,贯穿从分子修复到组织保护,从食品保鲜到工业稳定的广阔领域。本文系统阐述了高纯碱性复合维生素C的主要成分特性及作用,深入剖析其抗氧化功效,并探讨当前研究局限与未来发展方向,为该制剂的深入研究与应用提供理论参考。

**[关键词]** 高纯碱性复合维生素C; 抗坏血酸钠; 抗坏血酸钙; 抗氧化

**中图分类号:** R977.2+3 **文献标识码:** A

## High-purity alkaline complex vitamin C antioxidant effects

Zhanggui Chen Siqian Xiang

Hainan Huidou Biotechnology Co., Ltd.

**[Abstract]** Vitamin C, as an important water-soluble antioxidant in the human body, plays a crucial role in maintaining redox balance and resisting oxidative stress damage. Unlike traditional acidic ascorbic acid, it combines ascorbic acid with minerals to form ascorbate salts, creating stable compounds with neutral or slightly alkaline pH values. This structural modification not only solves the gastrointestinal irritation problem of ordinary vitamin C, but also achieves a qualitative leap in antioxidant efficacy through mineral synergy and improved bioavailability. Its antioxidant effect is a multidimensional and systematic bioengineering that spans a wide range of fields, from molecular repair to tissue protection, from food preservation to industrial stability. This article systematically expounds the main component characteristics and functions of high-purity alkaline complex vitamin C, deeply analyzes its antioxidant efficacy, and explores the current research limitations and future development directions, providing theoretical references for the in-depth research and application of this type of preparation.

**[Key words]** high-purity alkaline complex vitamin C; sodium ascorbate; Calcium ascorbate; antioxidant

氧化应激与众多生理病理过程紧密相关,如衰老、心血管疾病、癌症以及神经退行性疾病等<sup>[1]</sup>。在人体正常新陈代谢以及外界不良因素(如紫外线、环境污染、辐射等)影响下,体内会持续产生自由基等氧化产物。当氧化产物积累超过机体自身抗氧化防御系统的清除能力时,就会引发氧化应激,对细胞的脂质、蛋白质和DNA造成损伤,进而破坏细胞正常功能与结构,严重时导致疾病发生发展<sup>[2]</sup>。因此,寻找高效且安全的抗氧化剂对于维持机体健康、预防疾病具有极为重要的意义。

维生素C,又称抗坏血酸,作为一种广为人知的水溶性抗氧化剂,在生物体内发挥着不可或缺的抗氧化作用<sup>[3]</sup>。其抗氧化机制丰富多样,能直接与自由基发生反应,将其还原为稳定分子,

从而有效终止自由基链式反应,降低自由基对细胞的损害<sup>[4]</sup>;可参与体内氧化还原循环,帮助再生其他抗氧化剂,如维生素E等,协同增强机体抗氧化防御能力<sup>[5]</sup>;还能通过调节细胞内信号通路,影响相关基因表达,间接调控抗氧化酶活性,提升细胞抗氧化应激水平<sup>[6]</sup>。然而,普通维生素C存在一些局限性,例如稳定性欠佳,在光照、高温、高湿度环境下易被氧化分解,导致含量降低、抗氧化活性减弱<sup>[7]</sup>;在生理pH值条件下,其水溶性和生物利用度也有待提高<sup>[8]</sup>。为克服普通维生素C的不足,科研人员开发出高纯碱性复合维生素C。这种复合维生素C在原有维生素C基础上,添加了抗坏血酸钠<sup>[9]</sup>、抗坏血酸钙<sup>[10]</sup>等成分,以及抗坏血酸磷酸镁<sup>[11]</sup>等成分。这些成分不仅提升了维生素C的稳定性,使其

在复杂环境中能更好地保持结构和活性,还通过协同作用显著增强了抗氧化功效,拓展了在食品<sup>[12]</sup>、医药<sup>[13]</sup>等多个领域的应用前景。

## 1 高纯碱性复合维生素C的组成成分

### 1.1 抗坏血酸钠

抗坏血酸钠是抗坏血酸(维生素C)的钠盐形式。在水中,抗坏血酸钠能迅速解离成抗坏血酸根离子和钠离子,其溶解度远高于抗坏血酸,这使得在一些需要高浓度维生素C且对溶液澄清度有要求的应用场景中,抗坏血酸钠具有明显优势。在稳定性方面,抗坏血酸钠相对普通抗坏血酸更为稳定。普通抗坏血酸因含有连二烯醇结构,具有较强还原性,在空气中易被氧气氧化,遇光、热也会加速其氧化进程,导致含量降低、活性丧失。而抗坏血酸钠由于钠离子的存在,在一定程度上减弱了抗坏血酸结构中易氧化部位的电子云密度,降低了其被氧化的活性,从而提高了在常见环境条件下的稳定性,可有效延长产品保质期<sup>[14]</sup>。抗坏血酸钠在体内的代谢过程与抗坏血酸类似。进入人体后,抗坏血酸钠在胃肠道内迅速解离,抗坏血酸根离子被吸收进入血液循环,参与体内各种生理生化反应,发挥抗氧化、促进胶原蛋白合成、参与免疫调节等多种生物学功能<sup>[15]</sup>。

### 1.2 抗坏血酸钙

抗坏血酸钙是抗坏血酸与钙离子形成的盐。有学者表明,尽管抗坏血酸钙表现出与抗坏血酸同等的抗氧化活性,但是它可以减弱由抗坏血酸引起的胃中高酸度,使其适用于改善抗坏血酸的副作用。此外,对于胃肠道疾病患者,抗坏血酸钙可能是合适的抗氧化剂底物,具有更高的口服生物利用度<sup>[10]</sup>。与普通抗坏血酸相比,抗坏血酸钙对氧气、光和热的稳定性显著提高。在相同的储存条件下,抗坏血酸钙能够在更长时间内保持其有效成分含量和抗氧化活性,这为产品的储存和运输提供了便利,减少了因成分降解导致的质量问题<sup>[16]</sup>。有学者研究结果表明,单独使用抗坏血酸钙真空浸渍对抑制红杨梅腐烂率和微生物生长均有显著效果。此外,单一抗坏血酸钙或真空浸渍在贮藏期间显著抑制了红杨梅第6天至第10天色差的增加,优于常压浸渍<sup>[17]</sup>。GUO<sup>[18]</sup>从生理活性角度研究,抗坏血酸钙诱导的吉利尔蒙德分枝杆菌差异表达基因(DEGs)主要富集在“细胞过程、代谢过程、抗氧化”等GO功能和“核糖体、代谢、细胞周期”等KEGG通路中,抗坏血酸钙诱导可显著上调核糖体合成(RIM101、PAN3、NHP2和RPS19A)、生长代谢(HXT2和SDH4)以及抗氧化(FMN1和SNZ1)相关基因的表达。因此,抗坏血酸钙不仅具有抗氧化功效,还能同时补充人体所需的钙元素,实现了多种生理功能的协同作用。

### 1.3 抗坏血酸磷酸镁

抗坏血酸磷酸镁是抗坏血酸(维生素C)的磷酸酯镁盐,作为一种稳定性优异的维生素C衍生物,在化妆品及医药领域应用广泛。有学者利用简单但多功能的化妆品成分抗坏血酸磷酸镁(MAP)来有效地原位修复颅骨缺损,将MAP加载到明胶甲基丙烯酸酯水凝胶中以实现持续释放,并且支架仅供应含磷化合物以

促进骨修复,而无需外源供应Ca<sup>2+</sup>,结果表明,MAP可以通过清除活性氧和促进Ca<sup>2+</sup>来减轻骨髓间质干细胞(BMSCs)的氧化应激损伤摄取加速BMSCs体外矿化<sup>[19]</sup>。SohaM. Kandil将抗坏血酸磷酸镁(MAP)配制成囊泡载体在预期的作用部位增强渗透性,用于治疗黄褐斑和色素沉着,是一种具有前景的护肤配方。不仅如此,还有研究表明使用磷酸抗坏血酸镁(MAP)和植酸酶的生化处理过程可以将土壤的无侧限抗压强度提高两倍以上,该研究报告了一种用于修复Cr(VI)污染土壤的新型且实用的酶促磷酸盐沉淀工艺。

## 2 高纯碱性复合维生素C的抗氧化功效

### 2.1 在生物健康方面的抗氧化功效

#### 2.1.1 维护皮肤稳定

有研究通过评估抗坏血酸磷酸镁(MAP)对培养皮脂细胞中炎症生物标志物表达的影响,发现MAP处理可显著抑制脂多糖(LPS)诱导的炎症细胞因子、基质金属蛋白酶(MMPs)、抗菌肽(AMP)及Toll样受体(TLR)-4的表达上调,并有效降低脂质过氧化水平,结果表明,MAP通过其抗氧化及抗炎作用,能够缓解皮脂细胞的炎症反应,提示其在痤疮治疗中具有潜在应用价值。不仅如此,凝胶形式下的抗坏血酸磷酸钠(SAP)与抗坏血酸(AA)在改善皮肤外观方面效果相当,能有效改善鱼尾区皮肤弹性并减少皱纹深度。抗坏血酸磷酸镁(MAP)对胶原蛋白理化特性及其在伤口愈合中也有影响,MAP的加入加快了胶原原纤化速率,增强了分子间相互作用,且在不同剪切速率下均未引起胶原二级结构改变,但其剪切粘度随应力增加而上升,经MAP稳定的胶原膜具有更高的变性温度和杨氏模量,体内实验显示,使用MAP稳定胶原膜处理的大鼠在第16天实现伤口完全闭合,且愈合后皮肤的机械性能恢复至与正常皮肤相当,表明MAP稳定化的胶原膜在伤口愈合应用中具有良好潜力。

#### 2.1.2 降低慢性病风险

肝细胞癌(HCC)的特征是硫酸酯酶2活性升高,硫酸酯酶2是一种胞外酶,可催化硫酸乙酰肝素中6-O-硫酸基团的去除。有研究发现抗坏血酸可阻断HCC诱导的硫酸酯酶2激活,从而恢复与IGF-2和磷脂酰肌醇蛋白聚糖3减少相关的HSPG受体。抗坏血酸通过降低NF- $\kappa$ B、CRP、TNF- $\alpha$ 、IL-1 $\beta$ 和IL-6的表达来发挥抗炎活性,同时增强抗炎细胞因子IL-4和IL-10的表达,简而言之,抗坏血酸可以通过抑制硫酸酯酶2、恢复HSPG受体和灭活炎症通路来降低HCC的细胞毒性作用。还有研究发现抗坏血酸处理可显著缓解HCC引起的氧化应激,减弱Nrf2表达下调,并降低过氧化氢和超氧阴离子水平。同时,该化合物能够抑制HCC模型中NF- $\kappa$ B和TNF- $\alpha$ 的表达升高。在凋亡方面,抗坏血酸在体外轻微激活caspase-3、-8和-9,但在体内反而抑制其活性。因此认为抗坏血酸虽具抗氧化与抗炎性能,但并不通过直接激活凋亡途径影响正常肝细胞,其保护效应可能与调节氧化应激和炎症反应有关。通过体外与体内实验发现,抗坏血酸ASC(1-14mM)可显著抑制多形性胶质母细胞瘤GBM与前列腺癌PC细胞的增殖与迁移能力,并诱导细胞内活性氧(ROS)过度积累,

进而引发肿瘤细胞坏死性死亡。体内实验进一步表明, 静脉注射ASC能够有效延缓GBM肿瘤的生长与侵袭。有学者体内实验发现, 膳食补充抗坏血酸不仅能提高肝脏和肿瘤中的抗坏血酸钠浓度, 还可抑制C57小鼠体内BL6黑色素瘤的生长, 研究说明抗坏血酸对BL6黑色素瘤具有选择性抑制效应, 并提示其作为辅助抗肿瘤策略的潜力。

## 2.2在食品与工业领域应用的抗氧化功效

### 2.2.1防止食品变质

研究表明酸性乳清与抗坏血酸钠的协同作用显著抑制了脂质氧化并增强了肽的抗氧化活性, 从而延长发酵香肠的保质期。郭熙通过在海藻酸钠基可食性复合膜中添加巴西棕榈蜡(阻水剂)、甘油(增塑剂)及抗坏血酸钠(抗氧化剂和营养强化剂)对鲜切苹果展现出优异的保鲜效果, 能有效维持其色泽与硬度, 减少滴定酸和可溶性固形物的损失, 并抑制质量损失率、多酚氧化酶活性及微生物菌落数的增长。王亚玲学者采前施用抗坏血酸钙(CaAs)可以提高了鲜食葡萄果实硬度, 抑制了褐变与色泽变化, 并减轻果实腐烂、电解质渗漏、失重、褐变及落粒等情况。

### 2.2.2维持产品稳定性

氧化石墨烯(GO)和还原氧化石墨烯(RGO)作为二维碳纳米材料, 在生物医学领域尤其是癌症研究中具有广泛应用, 包括细胞内递送、设备涂层及诊疗一体化材料构建, 国外研究员结合实验与理论分析, 证明NaA可制备出一种特殊RGO衍生物, 其通过环氧化物还原恢复Csp<sup>2</sup>网络并在边缘通过氢键实现功能化, 从而赋予RGO在水基介质中前所未有的分散性。国内研究员构建了基于CIE颜色参数和多层感知器神经网络的褐变程度分类模型, 并从抗氧化、蛋白质组和代谢组层面综合探究了CAAS的抑褐机制, CAAS可上调光合作用相关蛋白表达, 并下调嘌呤代谢、苯丙烷生物合成和酪氨酸代谢途径的代谢物, 从而减轻烟叶褐变。

## 3 高纯碱性复合维生素C的抗氧化功效机制

### 3.1自由基清除机制

维生素C的分子结构中含有连二烯醇结构, 这使其具有很强的还原性。在生理条件下, 高纯碱性复合维生素C中的抗坏血酸部分(包括抗坏血酸钠和抗坏血酸钙中的抗坏血酸根)能够直接与超氧阴离子自由基(O<sub>2</sub><sup>-</sup>·)、羟自由基(·OH)、过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)等ROS发生反应。如有学者研究结果表明, 在清除自由基的过程中, 高纯碱性复合维生素最有可能的反应位点位于其内酯环上, 无论是通过氢原子转移、电子转移还是质子转移机制。研究发现, 具有适当亲脂性的维生素衍生物可以很容易地穿透磷脂双层, 并充当自由基清除剂, 防止生物膜的脂质过氧化, 且体内实验强烈表明, ROS预防脂质过氧化可以减少大鼠缺血再灌注模型中的缺血后组织损伤。

### 3.2抗氧化酶活性调节

SOD是体内重要的抗氧化酶, 能够催化超氧阴离子自由基发生歧化反应, 生成氧气和过氧化氢。高纯碱性复合维生素C可通过多种途径影响SOD的活性。尚晓兰以猪肉为原料生产广式香肠D-异抗坏血酸钠, 测定香肠不同加工时期的氧化指数和酶活性,

结果表明, 在D-异抗坏血酸钠存在下脂质氧化减慢, 总磷脂酶、酸性脂肪酶和中性脂肪酶活性受到抑制, 超氧化物歧化酶活性增加, 而谷胱甘肽过氧化物酶活性变化不大。不仅如此, 国外药理实验表明研究表明, 维生素C通过提升SOD、GPX、CAT等抗氧化酶的活性及基因表达、增加总抗氧化能力并减轻氧化损伤, 对ZnO纳米粒子诱导的大鼠肝脏氧化应激具有显著保护作用。还有研究者发现研究外源施用维生素C通过显著增强胁迫下花生植株的SOD、CAT、APX、GSH-Px和GR等抗氧化酶活性, 降低氧化损伤和钠离子积累, 同时提高光合色素含量, 从而有效提升植物的耐盐性。

### 3.3调节细胞信号通路

韩倩倩及吴鹏飞通过动物实验揭示, 慢性应激通过破坏钠依赖性维生素C转运体2(SVCT2)的表达诱导内侧面额叶皮层内源性抗坏血酸缺乏, 进而通过干扰氧化还原依赖性DNA甲基化重编程引发抑郁样行为。机制研究表明, 外源性补充抗坏血酸(100-1000mg/kg, 腹腔注射)通过激活十一易位双加氧酶(TET)介导的DNA去甲基化, 快速产生抗抑郁效应。转录组与甲基化测序分析进一步发现, S100钙结合蛋白A4(S100A4)作为抗氧化应激和脑损伤保护因子, 通过激活ErkB4-BDNF信号通路介导抗坏血酸的抗抑郁活性。该研究首次揭示了连接营养缺乏、表观遗传重编程和抑郁行为的新机制, 表明维生素C补充可能成为抑郁症治疗的潜在策略。Nrf2是细胞质中常见的蛋白质, 无论氧化还原条件如何, 在生理条件下, 它附着在其抑制剂, 即Keap1, 在氧化条件下改变构象并与Nrf2解离, 在角质形成细胞中, 抗坏血酸(100 μm)降低了Nrf2抑制剂(即Keap1蛋白)的水平, 增加了游离Nrf2及其激活剂(包括p62和KAP1)的表达, 同时, 抗坏血酸(1mM)有利于由其他抗氧化剂(如多酚)诱导的Keap1构象变化, 这还会刺激Nrf2解离, 在肝细胞中, 抗坏血酸(1-10 μm)激活Nrf2导致抗氧化酶的表达, 观察到脂质氢过氧化物水平降低。不但如此, 罗凯发现抗坏血酸通过激活Keap1-Nrf2信号通路, 显著增强超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶、过氧化氢酶活性及总抗氧化能力, 提高还原型谷胱甘肽含量, 同时降低丙二醛水平。在抗凋亡方面, AA通过调控JNK-Bcl-2/Bax信号级联增强细胞抗凋亡能力。综上所述, 膳食抗坏血酸通过多通路协同调控, 显著增强鲍鱼的免疫机能、抗氧化能力及抗细胞凋亡作用。

## 4 研究结论

目前, 关于高纯碱性复合维生素C抗氧化功效的研究取得了较为丰富的成果。在基础研究方面, 对其组成成分抗坏血酸钠、抗坏血酸钙和亚硒酸钠的抗氧化作用机制有了较为深入的了解, 明确了它们在自由基清除、抗氧化酶活性调节以及细胞信号通路调节等方面的具体作用方式和相互协同关系。在细胞和动物实验中, 证实了高纯碱性复合维生素C对心血管系统、免疫系统和神经系统等多个系统具有保护作用, 能够改善相关疾病模型中的病理生理指标, 减轻氧化应激损伤。临床研究也初步表明, 适当补充高纯碱性复合维生素C可能对一些慢性疾病如心血管疾病、某些免疫功能低下疾病等具有辅助治疗或预防作用。

尽管已有大量研究,但仍存在一些局限性。在功效机制研究方面,虽然对各个成分的单独功效机制有了一定认识,但对于它们在复杂生物体系中的协同功效机制尚未完全明确,尤其是在不同组织和细胞类型中的特异性协同机制研究较少。在临床研究中,由于研究设计、样本量、干预时间等因素的差异,导致不同研究结果之间存在一定的不一致性,对于高纯碱性复合维生素C在人体中的最佳补充剂量、补充时间以及适用人群等方面还缺乏足够的高质量证据。此外,目前的研究主要集中在其抗氧化作用与常见慢性疾病的关系上,对于其在其他生理病理过程如生殖系统健康、运动医学等方面的作用研究相对较少。

### [参考文献]

- [1]Forman,H.J.and H.Zhang,Targeting oxidative stress in disease:promise and limitations of antioxidant therapy. *Nat Rev Drug Discov*,2021.20(9):689–709.
- [2]Sadasivam,N.,et al.,Oxidative Stress, Genomic Integrity, and Liver Diseases. *Molecules*,2022.27(10).
- [3]Doseděl,M.,et al.,Vitamin C—Sources,Physiological Role, Kinetics, Deficiency, Use, Toxicity, and Determination. *Nutrients*,2021.13(2).
- [4]Higgins, M.R.,A.Izadi and M. Kaviani, Antioxidants and Exercise Performance:With a Focus on Vitamin E and C Supplementation. *Int J Environ Res Public Health*,2020.17(22).
- [5]Paulsen,G.,et al.,Vitamin C and E supplementation hampers cellular adaptation to endurance training in humans:a double-blind,randomised, controlled trial.*J Physiol*,2014.592(8):1887–901.
- [6]Padayatty, S.J. and M. Levine,Vitamin C:the known and the unknown and Goldilocks.*Oral Dis*,2016.22(6):463–93.
- [7]Tirado-Kulieva,V.A.,E.Hernández-Martínez and J.Suomela, Non-destructive assessment of vitamin C in foods:a review of the main findings and limitations of vibrational spectroscopic techniques. *European Food Research and Technology*, 2022.
- [8]Bioavailability and Bioactivity of Vitamin C—A Review. *International Journal of Pharmaceutical Research*,2021.
- [9]Xiong,S.,et al.,Assessment of the effect of ascorbic acid, sodium isoascorbate and calcium ascorbate treatments on the browning and wound healing process of fresh-cut potato

es.*Food Chemistry*,2024.

- [10]Lee,J., et al., Alleviation of ascorbic acid-induced gastric high acidity by calcium ascorbate in vitro and in vivo. *The Korean Journal of Physiology & Pharmacology*,2018.
- [11]Null,N.,Calcium ascorbate, magnesium ascorbate and zinc ascorbate added for nutritional purposes in food supplements.*EFSA Journal*,2009.
- [12]Null, N.,Scientific Opinion on the re-evaluation of ascorbic acid (E 300),sodium ascorbate(E 301)and calcium ascorbate (E302)as food additives.*EFSA Journal*,2015.
- [13]Gardiner,N.S.and J.R.Duncan, Inhibition of Murine Melanoma Growth by Sodium Ascorbate.*The Journal of Nutrition*, 2023.
- [14]Hiatt,A.N.,et al.,Deliquescence Behavior and Chemical Stability of Vitamin C Forms (Ascorbic Acid, Sodium Ascorbate, and Calcium Ascorbate)and Blends.*International Journal of Food Properties*,2011.
- [15]Zhou,H.B.,et al.,Vitamin A with L-ascorbic acid sodium salt improves the growth performance, immune function and antioxidant capacity of weaned pigs. *Animal*,2020.
- [16]Ruan,J.,et al.,Effect of partial NaCl replacement by KCl and calcium ascorbate on protein and lipid oxidation in bacon during storage. *International Journal of Food Science & Technology*,2023.
- [17]Li,Y.,et al.,Effects of Vacuum Impregnation with Calcium Ascorbate and Disodium Stannous Citrate on Chinese Red Bayberry.*Food and Bioprocess Technology*,2018.
- [18]Guo,J.,et al.,Multiple pathways involved in the Calcium ascorbate-induced enhancement of *Meyerozyma guilliermondii* biocontrol efficacy. *Biological Control*,2023.
- [19]Zhang,Z.,et al.,Triple functional magnesium ascorbyl phosphate encapsulated hydrogel:A cosmetic ingredient promotes bone repair via anti-oxidation,calcium uptake and blood vessel remodeling.*Chemical Engineering Journal*,2023.

### 作者简介:

陈章贵(1965--),男,汉族,湖南石门人,本科,营养师,药食同源功能食品开发与研究。