

不同贮存条件对特殊医学用途配方食品营养成分稳定性的影响

宋梦娜, 蓝雄, 刘彦均, 羊若涵, 黄兰茵, 张协光*

(深圳市计量质量检测研究院国家营养食品质量检验检测中心(广东), 广东深圳 518109)

摘要: 为了解贮存条件对不同种类特殊医学用途配方食品(Food for Special Medical Purpose, FSMP)产品品质的影响,研究了FSMP在高温、高湿、光照条件下营养成分含量的变化情况。以5种市售FSMP为原料,在高温、高湿、光照条件下分别贮存5 d和10 d,并测定其营养素含量变化。结果表明,高温、高湿及光照都能导致维生素C含量降低,其中光照影响最为明显,贮存10 d后早产/低出生体重质量婴儿配方食品中维生素C下降至94.54 mg/100 g,衰减率高达9.43%;高温对氨基酸配方食品中维生素A含量影响最为明显,贮存10 d后含量下降至2.20 mg RE/100 g,衰减率达7.56%;高温及高湿条件下所有试样维生素B₁含量衰减变化均小于3%;光照对深度水解配方食品中维生素A和维生素D含量影响最为明显,贮存10 d后衰减率达3.62%和3.80%;同时光照对早产/低出生体重婴儿配方食品中维生素B₂和维生素K₁含量影响最为明显,贮存10 d后衰减率达5.43%和8.68%。综上所述,高温、高湿、光照均对FSMP有不同程度影响,可为不同环境下FSMP产品的质量和稳定性提供理论参考。

关键词: 特医食品; 营养成分; 衰减变化; 贮存稳定性

文章编号: 1673-9078(2026)04-150-157

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0175

Impact of Different Storage Conditions on the Stability of Nutritional Components in Food for Special Medical Purposes

SONG Mengna, LAN Xiong, LIU Yanjun, YANG Ruohan, HUANG Lanyin, ZHANG Xieguang*

(Shenzhen Academy of Metrology and Quality Inspection, National Nutrition Food Testing Center (Guangdong), Shenzhen 518109, China)

Abstract: To understand the impact of storage conditions on the product quality of different types of food for special medical purposes (FSMP), changes in the content of nutritional components in FSMP were investigated under conditions of high temperature, high humidity, and light exposure. Five commercially available FSMPs were used as raw materials and stored under conditions of high temperature, high humidity, and light exposure for five days and 10 days, and changes in their nutrient contents were determined. The results indicated that high temperature, high humidity, and light exposure all caused a decrease in vitamin C content. Among them, the influence of light exposure was the most evident. After 10 days of storage, vitamin C content in the formula for preterm or low-birth-weight infants decreased to 94.54 mg/100 g, with an attenuation rate as high as 9.43%. High

引文格式:

宋梦娜,蓝雄,刘彦均,等.不同贮存条件对特殊医学用途配方食品营养成分稳定性的影响[J].现代食品科技,2026,42(4): 150-157.

SONG Mengna, LAN Xiong, LIU Yanjun, et al. Impact of different storage conditions on the stability of nutritional components in food for special medical purposes [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 150-157.

收稿日期: 2025-02-13; 修回日期: 2025-04-24; 接受日期: 2025-05-01

基金项目: 深圳市可持续发展科技专项(专2023N063); 广东省市场监督管理局科技项目(2024CZ26)

作者简介: 宋梦娜(1997-),女,硕士研究生,研究方向: 食品营养, E-mail: 746040735@qq.com

通讯作者: 张协光(1985-),男,高级工程师,研究方向: 食品营养, E-mail: 459018694@qq.com

temperature had the most pronounced effect on vitamin A content in amino acid formula food, which, after 10 days of storage, decreased to 2.20 mg RE/100 g, with an attenuation rate of 7.56%. Under high-temperature and high-humidity conditions, attenuation of vitamin B₁ content in all samples was less than 3%. Light exposure exhibited the most evident effects on vitamin A and vitamin D contents in the extensively hydrolyzed formula, with attenuation rates reaching 3.62% and 3.80%, respectively, after 10 days of storage. In addition, light exposure demonstrated the most obvious effect on vitamin B₂ and vitamin K₁ contents in the formula for preterm or low-birth-weight infants, and the attenuation rates reached 5.43% and 8.68%, respectively, after 10 days of storage. In conclusion, high temperature, high humidity, and light exposure all have varying degrees of influence on FSMP. This study provides valuable insights for ensuring the quality and stability of FSMP products in different environments.

Key words: food for special medical purposes (FSMP); nutritional components; attenuation; storage stability

FSMP 是为了满足进食受限、消化吸收障碍、特定疾病状态等特殊人群的特殊需要, 配制而成的配方食品^[1]。FSMP 包括适用于 0 月龄至 12 月龄的特殊医学用途婴儿配方食品和适用于 1 岁以上人群的特殊医学用途配方食品, 在改善营养状况、促进康复等方面发挥着巨大作用。尽管 FSMP 在中国的应用起步较晚且发展相对缓慢, 但随着社会经济的进步和公众对营养健康的日益重视, 这一领域正在获得越来越多的关注^[2]。2017 年, 中国设立了专门的 FSMP 注册管理机构, 并颁布了一系列相关法规, 明确了 FSMP 的营养成分指标要求。然而, 由于 FSMP 配方和生产工艺的独特性, 其在生产过程、检测方法和稳定性等方面仍面临诸多挑战。

营养成分的稳定性是影响 FSMP 质量的关键因素。营养成分在货架期内的品质变化, 会受到温度、湿度、氧气等环境要素以及光照情况的影响, 不同营养成分的敏感程度存在差异^[3]。不利的储存条件, 不仅易引发氧化^[4]、褐变、降解^[5]等化学反应, 还会出现一系列结块^[6]、结晶^[7]等物理变化, 致使营养成分的贮藏稳定性和功能特性降低^[8]。研究表明, 不同维生素对环境因素的敏感度各异, 维生素化学性质不稳定, 容易受到温度、光照、湿度等条件的影响而导致氧化分解^[9]。温度对 FSMP 中维生素的影响程度不尽相同, 普遍研究认为水溶性维生素较脂溶性维生素在高温条件下更为脆弱^[10]。有研究表明, 维生素 A、维生素 C、维生素 K₁ 对高温敏感, 在 37 °C 条件下维生素 B₁、维生素 B₆、维生素 B₁₂ 变异系数较大^[11]。相比之下, 维生素 D 在 80 °C 的条件下仍能保持较好的稳定性^[12]。此外, 高湿环境也会影响产品质量, 王溢等^[13]研究证明, 在 25 °C 贮存条件下, 将开封后的婴幼儿配方样品放置在相对湿度 (Relative Humidity, RH) 75% 和 RH 90% 条件下 1 d, 吸湿质量分别增加了 12.45% 和 32.14%, 说明较高的环境湿度可导致婴幼儿配方食品快速吸

湿潮解。Thakur 等^[14]发现, 当湿度较高时, 乳糖转化为具有高内部粘度的无定形形式, 吸湿性显著增加。同时, 光照会加速维生素 A、维生素 C、维生素 E 的降解, 同一温度下避光贮藏乳液中维生素损失率较光照条件下小^[15]。因此, 深入了解存储过程中环境因素对营养成分的影响, 研究营养成分变化规律, 对于确保 FSMP 产品的质量和稳定性至关重要。

1 材料与方法

1.1 原料

本实验选取 5 个特殊医学用途配方食品试样, 分别用大写字母 A、B、C、D、E 命名试样, 特殊医学用途早产低出生体重婴儿配方食品 (A 试样): 乳糖、植物油、麦芽糊精、乳清蛋白粉、复配营养强化剂 1 (葵花籽油、花生四烯酸油脂、二十二碳六烯酸油脂、混合生育酚浓缩物、抗坏血酸棕榈酸酯)、复配营养强化剂 2 (L-抗坏血酸钠、麦芽糊精、dl- α -醋酸生育酚、醋酸视黄酯、植物甲萘醌、核黄素、硝酸硫胺素、盐酸吡哆醇)、复配营养强化剂 3 (麦芽糊精、硫酸亚铁、硫酸锌、柠檬酸、硫酸铜) 等为原料, 经乳清蛋白部分水解、在线投料、直接蒸汽杀菌、蒸发、均质、喷雾干燥、干混等工艺加工制成; 特殊医学用途婴儿营养补充剂 (B 试样): 乳清蛋白粉、麦芽糊精、植物油、复配营养强化剂 (L-抗坏血酸钠、dl- α -醋酸生育酚、麦芽糊精、醋酸视黄酯、植物甲萘醌、核黄素、硝酸硫胺素、盐酸吡哆醇)、复配营养强化剂 (麦芽糊精、硫酸亚铁、硫酸锌、柠檬酸、硫酸铜)、二十二碳六烯酸油脂 (金枪鱼油, 混合生育酚浓缩物)、柠檬酸钠、氯化钠等为原料, 经乳清蛋白部分水解、在线投料、杀菌、蒸发及均质、喷雾干燥、干混等工艺加工制成; 特殊医学用途氨基酸配方食品 (C 试样): 葡萄糖浆、植物油、中链甘油三酯、马铃薯淀粉、L-天冬氨酸、L-

苏氨酸、L-丝氨酸、L-谷氨酰胺、L-脯氨酸、甘氨酸、L-丙氨酸、L-胱氨酸、L-缬氨酸、L-蛋氨酸、L-亮氨酸、L-异亮氨酸、L-酪氨酸、L-苯丙氨酸、L-赖氨酸醋酸盐、L-精氨酸、L-组氨酸、L-色氨酸、醋酸视黄酯、dl- α -醋酸生育酚、植物甲萘醌、硝酸硫胺素、核黄素、盐酸吡哆醇、L-抗坏血酸钠、硫酸铜、硫酸亚铁、硫酸锌、二十二碳六烯酸油脂、花生四烯酸油脂、柠檬酸脂肪酸甘油酯、柠檬酸等为原料，经干湿法混合工艺加工制成；特殊医学用途婴儿乳蛋白深度水解配方食品（D 试样）：麦芽糊精、乳清蛋白粉、植物油、中链甘油三酯、马铃薯淀粉、葡萄糖浆、醋酸视黄酯、胆钙化醇、dl- α -醋酸生育酚、植物甲萘醌、硝酸硫胺素、核黄素、盐酸吡哆醇、L-抗坏血酸钠、氯化钠、硫酸铜、氯化镁、硫酸亚铁、二十二碳六烯酸油脂、花生四烯酸油脂、柠檬酸脂肪酸甘油酯、柠檬酸为原料，经干湿混合法工艺加工制成；特殊医学用途婴儿乳蛋白部分水解配方食品（E 试样）：乳糖、乳清蛋白粉、金枪鱼油、花生四烯酸油脂、L-苯丙氨酸、L-组氨酸、L-缬氨酸、L-酪氨酸、氯化钠、硫酸亚铁、硒酸钠、硫酸铜、L-抗坏血酸钠、植物甲萘醌、D-生物素、胆钙化醇、dl- α -醋酸生育酚、核黄素、醋酸视黄酯、硝酸硫胺素、盐酸吡哆醇、柠檬酸为原料，使用胰蛋白酶，加入氢氧化钠、氢氧化钾为加工助剂，将乳清蛋白部分水解，之后经在线投料、高温杀菌、均质、蒸发浓缩、喷雾干燥、连续干混等主要工艺加工制成；所有试样产自雀巢集团。

1.2 仪器设备

QUINTIX224-1CN 电子天平，德国赛多利斯公司；3K15 离心机，德国西格玛公司；Hei-VAP 旋转蒸发仪，德国海道夫公司；Acquity Uplc 超高效液相色谱仪，美国沃特世公司等。

1.3 实验方法

1.3.1 高温实验

将原包装的试样放置在 60℃ 的烘箱中，在第 5 天和第 10 天分别取样，选取对温度敏感的维生素 A、维生素 B₁、维生素 C 为考察指标进行实验。

1.3.2 高湿实验

将试样放置在 25℃、RH 90% 的恒温恒湿箱内摊成≤5 mm 厚的薄层进行实验，在第 5 天和第 10 天分别取样，选取对湿度敏感的维生素 B₁、维生素 C 为考察指标进行实验。

1.3.3 光照实验

将试样放置在玻璃平皿上，摊成≤5 mm 厚的薄层，置于照度为 4 500 Lux 的恒温恒湿箱中进行实验，温湿度参照 GB 29923《食品安全国家标准特殊医学用途配方食品良好生产规范》^[16]，分别设置为 25℃，RH 在 60% 条件下，在第 5 天和第 10 天分别取样，选取对光照敏感的营养素作为考察指标。

1.3.4 检测方法

FSMP 中营养素的测定按照各营养素的国标进行测定，维生素 A、维生素 D、维生素 E 参照 GB 5009.82-2016 经行测定，维生素 B₁ 参照 GB 5009.84-2016 经行测定，维生素 B₂ 参照 GB 5009.85-2016 经行测定，维生素 C 参照 GB 5413.18-2010 经行测定，维生素 K₁ 参照 GB 5009.158-2016 经行测定；并计算营养素衰减率，分析差异性，按公式（1）计算营养素衰减率。营养素衰减率的计算方法：

$$X = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

X——营养素衰减率，%；

C₀——实验前营养素含量，mg/100 g；

C——实验后营养素含量，mg/100 g。

1.4 数据处理及分析

采用 SPSS 26.0 软件对数据进行显著性分析， $P < 0.05$ 表示统计学上差异性显著，并用 Excel 对数据进行制图。

2 结果与讨论

贮存条件影响因素试验采用一批次样品进行，重点研究产品质量在设定温、湿度及光照条件下的时间变化规律。根据贮存期间可能存在的主要风险，选择能灵敏反映产品营养充足性的指标，以呈现产品的稳定性变化情况。

2.1 高温对 FSMP 营养成分稳定性的影响

温度对 FSMP 的质量具有显著影响，在加工、运输及贮藏过程中，FSMP 常面临温度波动等不理想条件，特别是环境温度升高致使产品质量快速下降，这是由于温度升高会显著加快热敏反应和其他影响稳定的物理化学过程^[6]。为研究高温对 FSMP 中关键营养成分的影响，选取五种不同类型的产品，在 60℃ 的条件下进行为期 10 d 的高温试验。主要考察指标为维生素 A、维生素 B₁ 和维生素 C 的含量变化，试验结果如表 1 所示。

表 1 高温贮存下试样中营养成分含量

试样	维生素 A 含量/(μg RE/100 g)		维生素 B ₁ 含量/(μg/100 g)		维生素 C 含量/(mg/100 g)	
	高温 5 d	高温 10 d	高温 5 d	高温 10 d	高温 5 d	高温 10 d
A	2 476.67 ± 5.77	2 480 ± 10.00	940.00 ± 1.00	941.33 ± 0.58	93.19 ± 0.05	90.28 ± 0.83
B	8 440 ± 30.00	8 520 ± 20.00	3 018.00 ± 23.07	3 016.67 ± 25.17	655.20 ± 2.00	646.97 ± 3.75
C	454.07 ± 0.58	439.87 ± 1.01	620.13 ± 0.46	618.27 ± 0.58	124.93 ± 2.20	120.80 ± 0.60
D	623.4 ± 12.0	624.07 ± 6.70	594.13 ± 0.90	594.47 ± 0.46	121.33 ± 1.15	120.66 ± 1.15
E	561.67 ± 1.53	563.67 ± 0.58	672.33 ± 0.58	671.00 ± 2.00	100.80 ± 0.20	97.99 ± 0.20

由图 1 可以看出, C 试样在 60 ℃ 高温贮存条件下维生素 A 含量有显著衰减, 实验 10 d 后含量为 439.87 μg RE/100 g, 衰减率为 7.56%, 其余试样衰减变化均小于 4%。试样中的维生素 A 源自原料醋酸视黄酯, 其活性损失主要是由不饱和异戊二烯侧链上的自动氧化或立体异构化而引起的。研究显示, 酯化形式维生素 A 在低温、避光、充氮条件下稳定, 在高温或光照下易氧化, 会降解生成多种环氧化合物^[17]。部分试样出现轻微负衰减情况, 可判定为检测偏差, 不影响产品质量。华家才等^[18]研究表明, FSMP 在 40 ℃ 贮存 10 d 后, 其维生素 A 衰减率达 4.89%, 维生素 A 及其衍生物在高温环境下容易被氧化和异构化, 这可能是 C 试样中维生素 A 含量衰减率显著升高的原因。除 C 试样外, 其余试样维生素 B₁ 含量均未出现显著变化 ($P>0.05$), 衰减率均小于 3%。同时, 所有试样维生素 C 含量在 60 ℃ 高温贮存条件下衰减率均有上升趋势, 除 D 试样外, 其余试样均出现显著衰减, 其中 A 试样含量从 93.19 mg/100 g 下降至 90.28 mg/100 g, 衰减率从 2.32% 上升至 5.37%; B 试样含量从 655.20 mg/100 g 下降至 646.97 mg/100 g, 衰减率从 3.01% 上升至 4.22%, C 试样含量从 124.93 mg/100 g 下降至 120.80 mg/100 g, 衰减率从 2.40% 上升至 5.63%, E 试样含量从 100.80 mg/100 g 下降至 97.99 mg/100 g, 衰减率从 2.61% 上升至 5.32%。维生素 C 属热敏性维生素, 加工过程中的热处理, 如杀菌、干燥是其损失的重要原因。此外, 原料中残留的氧化酶及体系中的矿物质补充剂铁、铜等金属离子, 同样能加速维生素 C 的氧化破坏^[19]。对于维生素 C, 其水溶特性使其在高温条件下特别不稳定, Khaneghah 等^[20]的研究证明高温对维生素 C 的衰减有一定影响。值得注意的是, C 试样(特殊医学用途氨基酸配方食品)对高温环境最为敏感, 三种维生素含量均出现显著降低。这一结果提示, 在开发氨基酸配方产品时, 应当特别关注维生素 A、B₁ 和 C 在储存过程中的稳定性, 以免出现保质期内不合格的情况。

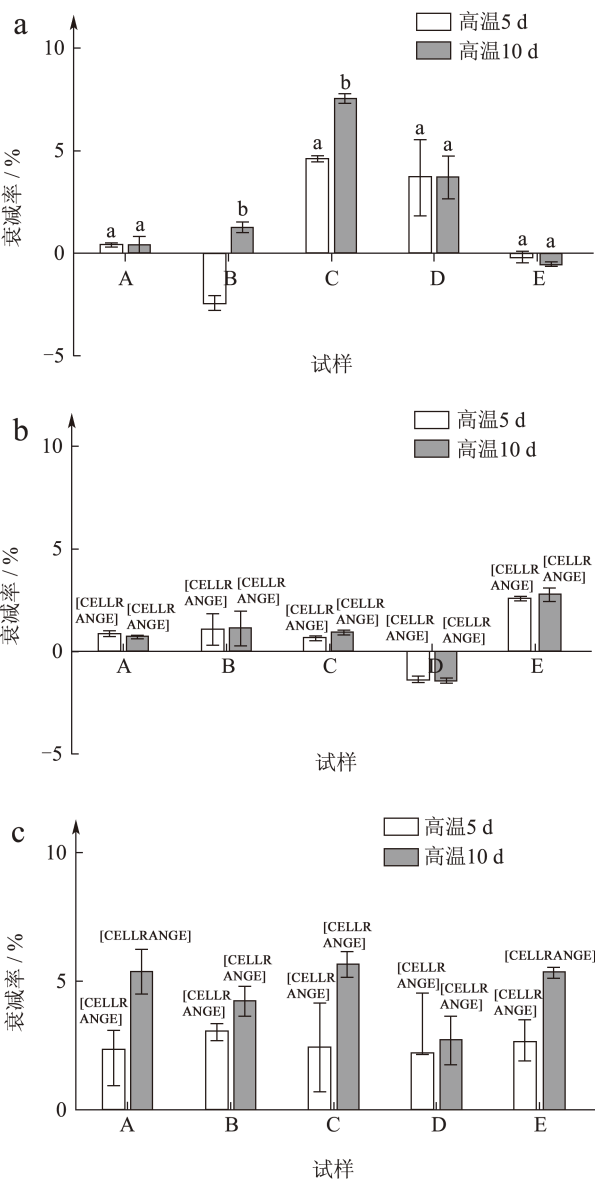


图 1 高温贮存下试样中不同维生素的衰减变化情况

Fig.1 The attenuation of different vitamins in the samples under high temperature storage

注: a 为维生素 A; b 为维生素 B₁; c 为维生素 C。不同小写字母代表样品在组内存在显著差异 ($P<0.05$)。

2.2 高湿对FSMP营养成分稳定性的影响

高湿环境对 FSMP 的营养稳定性具有显著影响。相对湿度的增加,即使是微小的水分增量,也能引起明显的塑化效应,这是因为自由水分子在贮存期间显著改变了粉末的润湿性。这些水分子不仅溶解了乳糖分子,还降低了玻璃化转变温度,从而促进了产品劣变反应的发生^[21]。此外,高湿环境还有助于美拉德反应的进行,导致粉末褐变,并为微生物快速增殖创造了有利条件^[22]。为研究高湿环境对 FSMP 中关键营养成分的影响,在 RH 90% 的条件下进行为期 10 d 的高湿试验。主要考察指标为维生素 B₁ 和维生素 C 的含量变化,试验结果如表 2 所示。

由图 2 可以看出,高湿贮存条件下所有试样维生素 C 含量随贮存时间的延长均有衰减增多趋势,其中 A 试样的维生素 C 含量衰减变化显著,含量从 93.52 mg/100 g 下降至 91.09 mg/100 g,衰减率从 1.97% 上升至 4.51%,衰减幅度增加了约 2.29 倍;B 试样维生素 C 含量从 661.60 mg/100 g 下降至 659.97 mg/100 g,衰减率从 0.22% 上升至 1.31%;D 试样维生素 C 含量从 106.33 mg/100 g 下降至 105.20 mg/100 g,衰减率从 3.33% 上升至 4.36%;E 试样维生素 C 含量从 92.27 mg/100 g 下降至 91.69 mg/100 g,衰减率从 2.67% 上升至 3.28%。

湿度是影响维生素 C 贮存稳定性的因素之一,贮存时间越长,吸湿增重越多,导致产品中水分质量增加。水分能通过影响金属离子迁移加速维生素 C 氧化,其中金属抗坏血酸复合物的形成是氧化反应过程中的限速步骤^[19]。同时,为强化矿物质含量,试样中也添加了硫酸亚铁,硫酸锌,硫酸铜等营养成分,这些金属离子的存在也加速了维生素 C 的氧化。李培杰等^[23]的研究表明,在高湿环境放置 10 d 后的婴幼儿辅食营养包中的维生素 C 含量从 1 729.00 mg/100 g 下降至 1 644.50 mg/100 g,衰减率为 4.90%,这些结果均能表明高湿环境对维生素 C 的稳定性有显著负面影响。除 C 试样外,其余试样维生素 B₁ 含量均未出现显著衰减 ($P>0.05$),衰减率变化均小于 3%;D 试样出现轻微负衰减情况,可判定为检测偏差,不影响产品质量。通过实验发现,A 试样(特殊医学用途早产/低出生体质量婴儿配方食品)和 C 试样(特殊医学用途氨基酸配方食品)产品对高湿环境最为敏感。特殊医学用途早产/低出生体质量婴儿配方食品的维生素 C 衰减尤为明显,特殊医学用途氨基酸配方食品的维生素 B₁ 出现了显著降低。这说明在开发这两类产品时,应特别关注维生素 B₁ 和维生素 C 的稳定性问题。

表 2 高湿贮存下试样中营养成分含量

试样	维生素 B ₁ 含量/(μg/100 g)		维生素 C 含量/(mg/100 g)	
	高湿 5 d	高湿 10 d	高湿 5 d	高湿 10 d
A	838.33±4.51	840.00±2.00	93.52±1.02	91.09±0.78
B	3 043.33±15.28	3 010.00±20.00	661.60±1.10	659.97±5.35
C	620.47±0.12	618.6±1.00	126.07±1.10	125.80±0.60
D	595.30±0.17	593.93±0.46	106.33±1.30	105.20±1.40
E	671.67±0.58	670.00±1.00	92.27±0.75	91.69±0.96

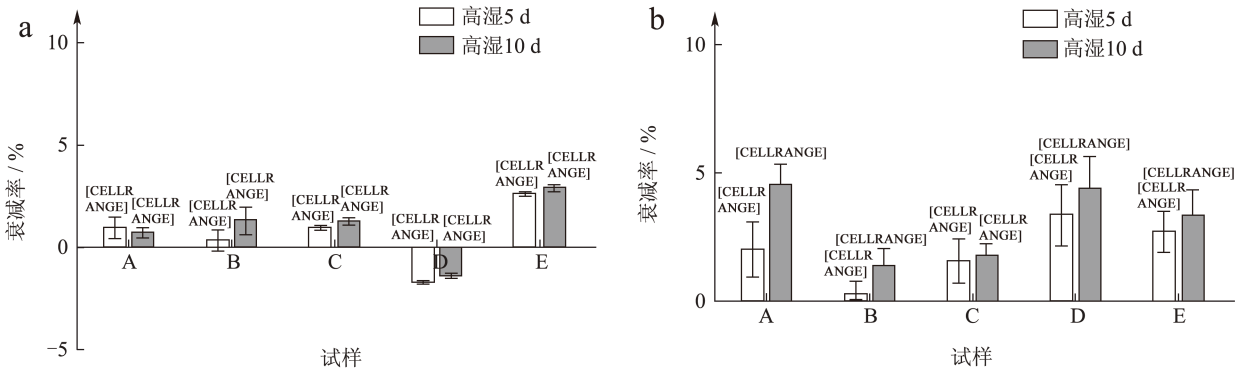


图 2 高湿贮存下试样中不同维生素的衰减变化情况

Fig.2 The attenuation of different vitamins in the samples under high humidity storage

注: a 为维生素 B₁; b 为维生素 C。不同小写字母代表样品在组内存在显著差异 ($P<0.05$)。

2.3 光照对FSMP营养成分稳定性的影响

光照实验旨在探究光辐射对各类营养素稳定性的影响,尤其是对维生素的影响。研究表明:维生素 A 化合物可通过光化学异构直接或间接地接收光敏物质;维生素 B₂ 在光照及紫外照射下会发生不可逆分解;维生素 D 对光极为敏感,在直射条件下容易降解;维生素 K₁ 可发生光化学降解;维生素 C 易受到氧气、热量、光线和碱性环境的影响而发生氧化破坏,其酚羟基结构使其对氧化剂特别敏感。基于这些特性,光照实验选取维生素 A、维生素 B₂、维生素 D、维生素 K₁ 和维生素 C 作为敏感性考察指标,以全面评估光照对 FSMP 中维生素稳定性的潜在影响。为研究光照对 FSMP 中关键营养成分的影响,在 4 500 Lux 的光源照射条件下进行为期 10 d 的光照试验。主要考察指标为维生素 A、维生素 B₂ 等的含量变化,试验结果如表 3 所示。

由图 3 可以看出, C、D 试样在光照条件下维生素 A 含量有显著衰减趋势。D 试样光照 10 d 后维生素 A 含量为 586.00 $\mu\text{g RE}/100\text{ g}$, 衰减率从 0.99% 增长到 3.62%, 较光照 5 d 增长约 3.66 倍; C 试样维生素 A 含量从 474.80 $\mu\text{g RE}/100\text{ g}$ 下降至 471.80 $\mu\text{g RE}/100\text{ g}$, 衰减率从 0.42% 增长到 0.84%。另外, D 试样的维生素 D 含量有显著衰减趋势, 在光照贮存 5 d 后 D 试样维生素 D 衰减率仅有 0.22%, 光照实验 10 d 后含量为 17.73 $\mu\text{g}/100\text{ g}$, 衰减率升高至 3.80%, 增长幅度约 17.27 倍, 其余试样衰减不明显。这是因为维生素 A、D 都具有类异戊二烯结构, 在光照条件下发生异构化反应, 由反式结构变为顺式结构, 异构化反应都伴随着光化学降解, 同时引发链式氧化, 生成醛、酮、羧酸等小分子, 降低其生物活性^[24]。樊垚^[25]研究表明, 在光照条件下维生素 D 会有明显下降, 婴幼儿配方乳粉中的维生素 D 对光非常敏感, 在光线下被破坏的速度相对较快, 光照 6 d 后维生素 D 含量为 3.11 $\mu\text{g}/100\text{ g}$, 1 个月后残留率为 35%。此外, A 试样的维生素 B₂ 含量变化显著, 随贮存时间延长, 含量从 1.26 $\text{mg}/100\text{ g}$ 下降至 1.22 $\text{mg}/100\text{ g}$, 衰减率从 2.07% 增长到 5.68%, 增长幅度约 2.74 倍; 试样中的镁离子、铁离子会影响维生素 B₂ 稳定性, 前者使其稳定性下降, 后者能与之发生反应^[26]。D、E 试样的维生素 B₂ 含量在光照条件下有轻微衰减, 衰减率变化均小于 4%, B、C 试样的维生素 B₂ 含量无明显变化。陈霞飞^[27]研究发现, 维生素 B₂ 见光 1 h 便会降解, 失效超过 50%, 奶类被日光照 2 h 以上, 其中的维生素 B₂ 会被破坏殆尽。维生素 B₂ 即核黄素, 母体化合物是 7,8-二甲基-10(1'-核

糖基) 异咯嗪。光照时, 核糖基侧链断裂, 生成二甲基异咯嗪(光色素)及一系列自由基, 导致核黄素降解^[28]。除 B 试样外, 所有试样维生素 C 含量均有一定变化, 随贮存时间延长, 衰减率有增长趋势, 其中 A 试样对光照最为敏感, 在光照贮存 5 d 后维生素 C 含量为 97.53 $\text{mg}/100\text{ g}$, 衰减率为 7.55%, 10 d 后含量为 94.55 $\text{mg}/100\text{ g}$, 衰减率升高至 9.43%; C、D、E 试样均有不同程度轻微衰减, C 试样维生素 C 衰减率从 1.56% 增长到 3.13%, D 试样维生素 C 衰减率从 3.64% 增长到 5.45%, E 试样维生素 C 衰减率从 3.00% 增长到 3.77%, 说明光照对维生素 C 的衰减有一定的影响。这可能是因为光感物质维生素 B₂ 与维生素 C 间接反应生成异咯嗪和脱氢抗坏血酸所致^[29]。刘媛^[15]研究表明, 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 光照条件下, 维生素 C 在贮存 30 d 后损失率达 38.90%, 高于 25 $^{\circ}\text{C}$ 避光条件下的损失率(31.91%), 因此产品应尽量避光保存, 防止维生素 C 含量损失。同时, A、B、E 试样的维生素 K₁ 含量在光照条件下, 随贮存时间延长, 衰减率有显著增长趋势, 其中 A 试样维生素 K₁ 含量从 48.23 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 下降至 44.20 $\mu\text{g}/100\text{ g}$, 衰减率从 0.41% 增长到 8.68%, 衰减幅度约 21.17 倍; B 试样维生素 K₁ 含量从 202.33 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 下降至 195.00 $\mu\text{g}/100\text{ g}$, 衰减率从 0.98% 增长到 4.41%, 衰减幅度约 4.5 倍; E 试样在光照 10 d 后维生素 K₁ 含量为 34.17 $\mu\text{g}/100\text{ g}$, 衰减率为 6.30%。陈涛等^[30]研究表明, 光照射会加快维生素 K₁ 的破坏, 2 h 后维生素 K₁ 含量从 208.00 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 下降至 197.00 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 衰减率为 5.29%。C 试样衰减率出现了较大负偏差, 可能与产品配方、贮存环境、检测方法等均有一定的关系。C 试样采用干湿法混合工艺生产, 干湿法混合工艺是将大部分营养成分溶于液体基质并喷雾干燥成粉, 再与热敏性营养成分混合。这种方法可能导致维生素 K₁ 在产品中分布不均匀, 出现含量负偏差现象。同时, 维生素 K₁ 为微克级营养素, 在配方中的添加量较低, 使得检测误差相对较大。因此, 维生素 K₁ 的负衰减可能是由配方设计和检测误差共同造成。综合来看, A 试样(特殊医学用途早产/低出生体重婴儿配方食品)和 D 试样(特殊医学用途婴儿乳蛋白深度水解配方食品)产品对光照最为敏感, 特殊医学用途早产/低出生体重婴儿配方食品中维生素 B₂、C、K₁ 出现显著降低, 特殊医学用途婴儿乳蛋白深度水解配方食品中维生素 A、D 出现显著降低。因此, 在生产、运输和储存过程中应严格控制光照条件, 以最大限度地保留产品的营养价值。

表 3 光照贮存下试样中营养成分含量

Table 3 The content of nutrients in the sample under light storage

试样	维生素 A 含量/ (μg RE/100 g)		维生素 B ₂ 含量/ (mg/100 g)		维生素 C 含量/ (mg/100 g)		维生素 D 含量/ (μg/100 g)		维生素 K ₁ 含量/ (μg/100 g)	
	光照 5 d	光照 10 d	光照 5 d	光照 10 d	光照 5 d	光照 10 d	光照 5 d	光照 10 d	光照 5 d	光照 10 d
A	2 483.33 ± 5.77	2 476.67 ± 5.77	1.26 ± 0.01	1.22 ± 0.06	97.53 ± 0.12	94.55 ± 0.31	14.37 ± 0.06	14.20 ± 0.10	48.23 ± 0.75	44.20 ± 0.20
B	8 710.00 ± 10.00	8 610.00 ± 10.00	5.18 ± 0.01	5.18 ± 0.01	673.80 ± 0.10	673.2 ± 2.00	90.43 ± 0.25	90.13 ± 0.06	202.33 ± 1.53	195.00 ± 3.00
C	474.80 ± 1.00	471.70 ± 0.17	1.01 ± 0.11	1.01 ± 0.01	125.2 ± 0.60	124.27 ± 0.12	14.79 ± 0.06	14.65 ± 0.02	46.33 ± 0.58	46.13 ± 0.50
D	602.67 ± 3.06	586.00 ± 4.00	1.02 ± 0.00	1.01 ± 0.03	106.60 ± 1.31	104.60 ± 0.40	18.33 ± 0.12	17.73 ± 0.32	39.20 ± 0.20	38.60 ± 0.40
E	562.33 ± 6.51	556.33 ± 1.53	1.20 ± 0.01	1.19 ± 0.19	100.40 ± 1.20	99.60 ± 1.70	17.70 ± 0.10	17.60 ± 0.30	36.77 ± 0.06	34.17 ± 0.15

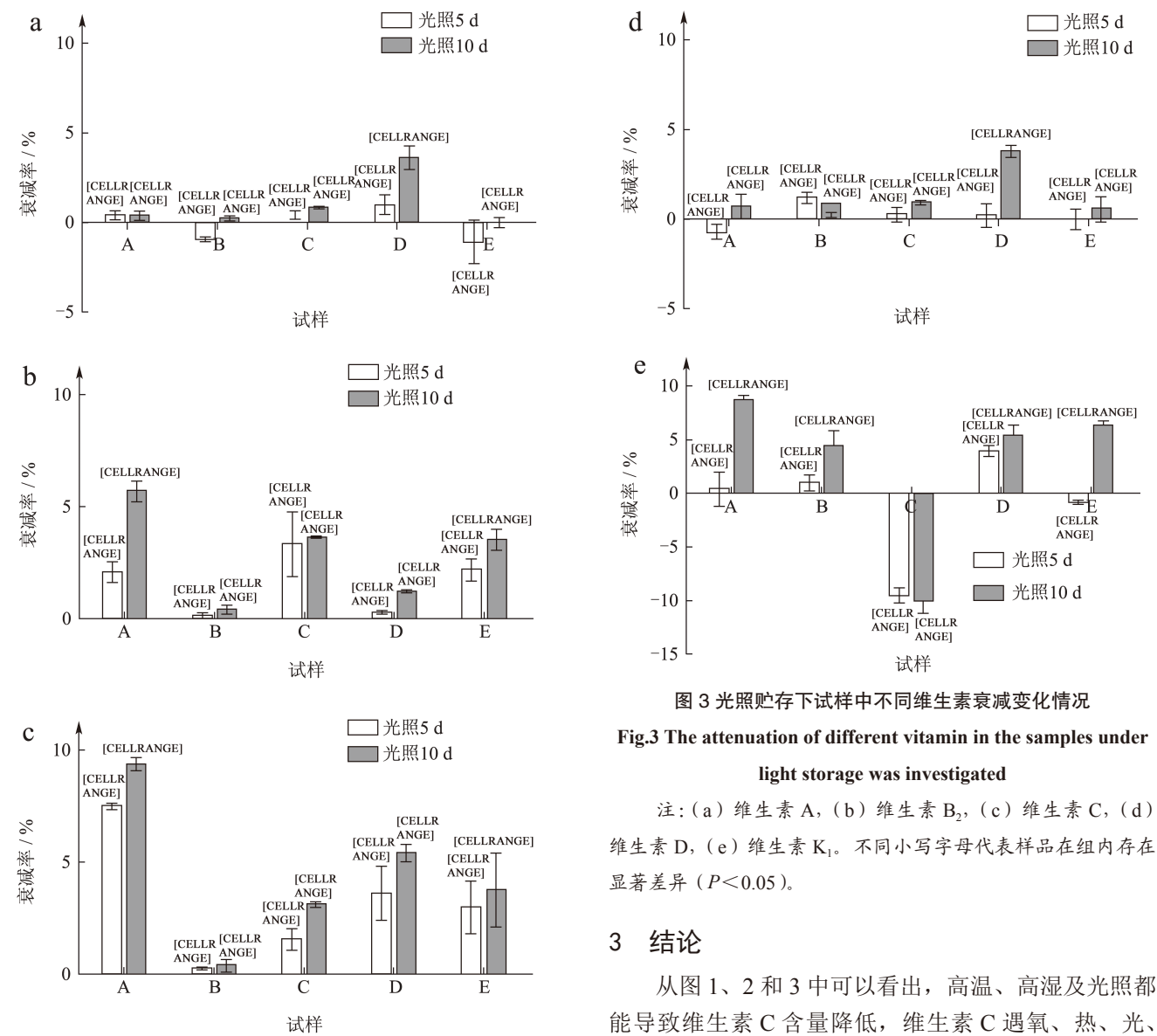


图 3 光照贮存下试样中不同维生素衰减变化情况

Fig.3 The attenuation of different vitamin in the samples under light storage was investigated

注：(a) 维生素 A，(b) 维生素 B₂，(c) 维生素 C，(d) 维生素 D，(e) 维生素 K₁。不同小写字母代表样品在组内存在显著差异 ($P<0.05$)。

3 结论

从图 1、2 和 3 中可以看出，高温、高湿及光照都能导致维生素 C 含量降低，维生素 C 遇氧、热、光、

碱性物质易氧化破坏。特殊医学用途氨基酸配方食品对高温环境最为敏感,其维生素A、B₁、C含量均出现显著降低,同时高湿环境也导致该类产品中维生素B₁的显著下降。此外,高湿和光照均能导致特殊医学用途早产/低出生体重婴儿配方食品的维生素C衰减明显增长,同时光照还能加速其维生素B₂、K₁含量降低。光照对特殊医学用途婴儿乳蛋白深度水解配方食品也有不利影响,其维生素A、D出现显著降低。

对于维生素C在高温、高湿及光照条件下易降解的问题,可通过与长链有机或无机酸进行酯化反应来提高其稳定性。对于维生素A、D、B₂、K₁等对光照敏感的维生素,建议采用避光性能优良的包装材料,并结合充氮隔氧技术,以减少氧化损失。在实际使用和储存过程中,应避免将产品置于高温、高湿或强光环境下,以防营养素流失。目前关于产品在实际运输过程中的营养成分稳定性研究尚不多见,本研究仅模拟了极端环境条件下部分敏感营养成分的含量变化,未考虑实际运输中的温湿度波动等情况,未来还需进一步探索FSMP在实际贮藏运输过程中的营养成分稳定性。

参考文献

- [1] BENGIO E. Diets and diet therapy: EU regulations on food for special medical purposes [M]. Oxford: Elsevier, 2019.
- [2] HUANG L, LU J, SHI L, et al. Regulation, production and clinical application of foods for special medical purposes (FSMPs) in China and relevant application of food hydrocolloids in dysphagia therapy [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 140: 108613.
- [3] 郭晨钰. 15种特殊食品贮藏过程中功能成分与活性变化规律研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2023.
- [4] YANG X F, HAN Z Y, XIA T S, et al. Monitoring the oxidation state evolution of unsaturated fatty acids in four microwave-treated edible oils by low-field nuclear magnetic resonance and H-1 nuclear magnetic resonance [J]. Food Science & Technology, 2020, 138: 110740.
- [5] XU M, WATSON J. Microencapsulated vitamin A palmitate degradation mechanism study to improve the product stability [J]. J Agric Food Chem, 2021, 69(51): 15681-15690.
- [6] HAZLETT R, SCHMIDMEIER C, O'MAHONY J A. Approaches for improving the flowability of high-protein dairy powders post spray drying-a review [J]. Powder Technology, 2021, 388: 26-40.
- [7] BHME B, SCHNEIDER R, HARBS T, et al. Liberation of fat from milk powder particles during chocolate processing through moisture-induced lactose crystallisation [J]. Food Science & Technology, 2020, 126: 109343.
- [8] LI Y, QUAN W, JIA X, et al. Profiles of initial, intermediate, and advanced stages of harmful Maillard reaction products in whole-milk powders pre-treated with different heat loads during 18 months of storage [J]. Food Chemistry, 2021, 351(12): 129361.
- [9] YANG H, HOU L, SUN H, et al. Degradation kinetics of vitamins in different enteral feeding formulas during storage at different temperatures [J]. Heliyon, 2024, 10: 8-16.
- [10] HASHEMI S M B, POURMOHAMMADI K, GHOLAMHOSSEINPOUR A, et al. Innovative thermal and non-thermal processing, bio-accessibility and bio-availability of nutrients and bio-active compounds: Fat-soluble vitamins [M]. Woodhead: Woodhead Publishing, 2019.
- [11] FAN C L, FENG T T, WANG X W, et al. Liposomes for encapsulation of liposoluble vitamins (A, D, E and K): comparison of loading ability, storage stability and bilayer dynamics [J]. Food Research International, 2023, 163: 112264.
- [12] 郑燕燕, 岑干君, 甘旺, 等. 温度及光照对婴幼儿配方乳粉中VA、VD稳定性的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 27-30.
- [13] 王溢, 汪新洁, 杨波, 等. 特殊医学用途全营养配方食品的稳定性的研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 277-283.
- [14] THAKUR M, NANDA V. Investigating the flow properties of bee pollen enriched milk powder during storage [J]. Journal of Stored Products Research, 2022, 96: 101940.
- [15] 刘媛. 乳剂型特殊医学用途配方食品的稳定性的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.
- [16] GB 29923-2013食品安全国家标准特殊医学用途配方食品良好生产规范[S].
- [17] 李琳瑶, 华家才, 储小军. 干湿法复合工艺对婴幼儿配方乳粉质量的影响[J]. 中国乳品工业, 2025, 53(3): 38-43.
- [18] 华家才, 马雯, 林加建, 等. 温度、光照和湿度对特殊医学用途婴儿配方食品影响分析[J]. 食品工业, 2019, 40(9): 213-216.
- [19] 刘奕博. 婴幼儿配方奶粉中维生素C稳定性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- [20] KHANEGHAH A M, HASHEMI S M B, ES I, et al. Innovative thermal and non-thermal processing, bioaccessibility and bioavailability of nutrients and bioactive compounds: Water-soluble vitamins [M]. Woodhead: Woodhead Publishing, 2019.
- [21] HARTMANN M, PALZER S. Caking of amorphous powders-material aspects, modelling and applications [J]. Powder Technology, 2011, 206(1): 112-121.
- [22] PEI X, YANG S, ZHAN L, et al. Prevalence of bacillus cereus in powdered infant and powdered follow-up formula in China [J]. Food Control, 2018, 93: 101-105.
- [23] 李培杰, 陈礼宝, 刘凤莉, 等. 不同铁盐与维生素C在婴幼儿辅食营养包中的稳定性研究[J]. 现代食品, 2024, 30(13): 199-203.
- [24] STEINERT R E, LEE Y K, SYBESMA W. Vitamins for the gut microbiome [J]. Trends Mol Med, 2020, 26(2): 137-140.
- [25] 樊垚. 婴幼儿配方奶粉中维生素D的稳定性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- [26] 王超, 赵晶, 余宁江. 婴幼儿食品添加剂维生素B₂的稳定性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(1): 284-288.
- [27] 陈霞飞. 健康饮食“B”不可少——水溶性维生素B₂篇[J]. 质量与标准化, 2016, 2: 26-27.
- [28] SRINIVASAN D K L P, OWEN R. Fennema's food chemistry [M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [29] LAWRENCE A. Light-induced oxidation in milk [J]. Journal of Dairy Science, 1964, 47(2): 216-221.
- [30] 陈涛, 李双喜, 赖学能, 等. 复配维生素营养强化剂中维生素K₁的稳定性研究[J]. 广东医科大学学报, 2024, 42(3): 255-257.