

婴幼儿辅食中蛋白质消化特性与营养利用率评价

袁静

滁州学院, 安徽 滁州 239000

[摘要] 婴幼儿消化系统尚未完全成熟, 辅食蛋白质的营养价值不仅取决于含量, 还受蛋白来源、氨基酸组成、食品基质及加工方式影响。本文分析乳、蛋、肉、谷物和豆类蛋白的消化特征, 讨论婴幼儿体外消化模型、氨基酸评价及生物利用指标。研究表明, 成人消化条件会高估部分辅食蛋白的水解程度, 谷豆复配效果亦具有明显的原料依赖性。辅食评价应由粗蛋白检测转向蛋白含量、婴幼儿条件下消化率、必需氨基酸质量及耐受性的综合判定。

[关键词] 婴幼儿辅食; 蛋白质消化; 营养利用率; 氨基酸

DOI: 10. 64635/ja. 2026. 1571

中图分类号: TS201. 4

文献标识码: A

Evaluation of Protein Digestibility and Nutritional Utilization in Complementary Foods for Infants and Young Children

Yuan Jing

Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239000, China

Abstract: The digestive system of infants and young children is not yet fully mature, and the nutritional value of protein in complementary foods depends not only on protein content but also on protein source, amino acid composition, food matrix, and processing methods. This study analyzes the digestive characteristics of proteins derived from milk, eggs, meat, cereals, and legumes, and discusses in vitro digestion models for infants and young children, amino acid evaluation, and indicators of nutrient utilization. The results indicate that digestion conditions designed for adults may overestimate the degree of hydrolysis of certain complementary food proteins, while the effects of cereal-legume combinations also depend strongly on the specific raw materials used. The evaluation of complementary foods should therefore shift from crude protein determination alone toward a comprehensive assessment integrating protein content, digestibility under infant-specific conditions, essential amino acid quality, and tolerance.

Keywords: complementary foods for infants and young children; protein digestion; nutritional utilization; amino acids

引言

婴儿满 6 月龄后, 单纯依靠乳类已难以持续满足快速生长所需的全部能量和营养素, 需逐步添加谷物、肉蛋、豆类及其他辅助食品。蛋白质是组织生长、酶和激素合成以及免疫功能维持的重要物质, 但摄入量高并不意味着实际利用量高。食物蛋白必须经过胃肠水解, 释放为小肽和氨基酸后才能被吸收, 其营养价值还受到必需氨基酸构成和限制氨基酸水平的制约。

我国调查显示, 6 至 8 月龄、9 至 11 月龄、12 至 17 月龄和 18 至 23 月龄婴幼儿由辅食获得的蛋白质分别为 5.1、10.1、15.0 和 21.7 克, 蛋白质摄入并非普遍不足^[2]。因此, 当前研究重点应由单纯提高蛋白质含量转向改善消化可及性、氨基酸平衡和实际营养利用效率。

1 婴幼儿辅食蛋白质的消化基础

1.1 婴幼儿消化系统的阶段性特点

婴幼儿胃容量较小, 胃酸分泌、蛋白酶活性和胆

汁分泌尚处于发育过程中。与成人相比, 婴儿胃内酸度较低, 胃蛋白酶浓度也较低, 使蛋白质变性和初步水解受到限制。进入小肠后, 胰蛋白酶等继续分解蛋白质, 但其分泌能力仍随月龄逐渐成熟。因此, 采用成人条件测得的蛋白质消化率, 可能高估婴幼儿辅食的真实消化程度。

在一项牛肉泥体外研究中, 婴儿模型的胃液酸度设定为 3.8, 成人模型为 1.8; 胃蛋白酶活性分别为每毫克 22.75 单位和 182 单位。胃消化结束后, 婴儿模型中可溶性氮占 11.59%, 成人模型达到 35.70%; 完成胃肠消化后, 两者分别为 43.26% 和 47.19%^[5]。该结果说明, 消化能力差异主要出现在胃阶段, 小肠消化可以缩小差距, 但不能完全消除早期水解不足。

婴幼儿消化能力还受到早产、低出生体重、感染、食物过敏和胃肠功能异常等因素影响。评价普通辅食时应以健康足月婴幼儿为主要对象; 针对特殊人群, 则应重新设定消化液组成、酶活性和胃排空条件, 不

能直接沿用健康婴儿模型。

1.2 不同来源蛋白质的结构差异

乳蛋白主要由酪蛋白和乳清蛋白构成。乳清蛋白溶解性较好,通常能够较快进入小肠并被水解;酪蛋白在胃内可形成凝块,其消化速度受到凝块大小和致密程度影响。鸡蛋蛋白的必需氨基酸构成较为完整,但充分加热会使蛋白质变性并提高酶接触机会,过度加热则可能引起聚集,降低部分酶切位点的可及性。

肉类蛋白包含肌原纤维蛋白和结缔组织蛋白。肉泥能够提供优质蛋白质及血红素铁,但肌纤维完整性、胶原含量和加热程度会影响消化。牛肉泥体外试验中,即使样品粗蛋白含量达到 19.14%,婴儿模型胃消化阶段仍存在较多未充分水解的肌动蛋白和肌球蛋白片段^[5]。这表明蛋白质含量与消化率属于不同评价维度。

谷物蛋白以大米、小麦、燕麦和玉米蛋白为主,常被淀粉颗粒和细胞壁包埋。多数谷物蛋白赖氨酸相对不足,单独作为主要蛋白来源时,氨基酸平衡受到限制。豆类蛋白赖氨酸含量较高,但含硫氨基酸相对不足,并可能伴随胰蛋白酶抑制因子、植酸和复杂细胞壁结构。谷物与豆类合理复配可发挥氨基酸互补作用,但复配比例和加工工艺不当,也可能降低消化效率。

2 蛋白质消化与利用的影响因素

2.1 食品基质及加工条件

蛋白质并非以孤立状态存在。辅食中的淀粉、脂肪、膳食纤维和矿物质可改变蛋白质聚集、胃排空和消化酶扩散。谷物糊化后形成的黏稠网络可能延缓酶进入;适量脂肪可改善能量密度和口感,但脂肪乳化状态也会影响蛋白质界面结构。膳食纤维吸水膨胀后可能增加体系黏度,过高含量会降低蛋白质与蛋白酶接触的效率。

研磨、均质和适度加热可以破坏细胞结构,使蛋白质展开并暴露酶切位点。肉类经细切和软化后,肌纤维长度下降,有利于消化液渗入;豆类经过浸泡、蒸煮和脱皮,可降低部分抗营养因子。相反,长时间高温处理可能引起蛋白质交联,蛋白质与还原糖还可能发生褐变反应,使赖氨酸有效性下降。

加工评价不能仅观察产品是否细腻,还应考察可溶性氮、小肽释放量、游离氨基酸和未消化蛋白残留。对于工业化产品,还需评价杀菌、干燥和贮藏过程中蛋白质聚集及氨基酸损失,防止以延长货架期为代价降低营养利用率。

2.2 蛋白质互补与抗营养因子

谷豆互补是提高植物性辅食蛋白质质量的常用方

法。谷物蛋白的赖氨酸相对不足,而豆类蛋白能够补充赖氨酸;谷物则可改善豆类蛋白中含硫氨基酸不足的问题。然而,氨基酸互补并不必然带来消化率同步提高,因为不同原料形成的食品基质可能改变蛋白水解过程。

一项模拟婴儿消化研究用鹰嘴豆、扁豆或豌豆替代谷物配方中 50% 的原料。替代后样品的蛋白质、矿物质和膳食纤维含量提高,但不同组合的水解结果差异明显。与单一糙米样品相比,糙米与鹰嘴豆、豌豆复配后的蛋白水解程度分别下降 61% 和 42%,而糙米与扁豆复配后提高 46%^[6]。该数据表明,不能笼统地认为添加豆类必然提高蛋白质利用率,需针对具体谷物、豆类和工艺进行验证。

豆类中的胰蛋白酶抑制因子会降低蛋白酶作用效率,植酸则可能与蛋白质和矿物质结合。充分蒸煮能够使多数热敏性蛋白酶抑制因子失活,但对植酸的去除有限。采用发芽、发酵或适度酶解,可进一步改善植物蛋白的可消化性。婴幼儿辅食应避免直接使用未经充分熟化的豆粉,也不能因追求高蛋白而加入过量豆类蛋白。

2.3 辅食质地和喂养方式

辅食质地需要与月龄及口腔运动能力相适应。添加初期可采用细腻而较稠的泥糊状食物,随后逐渐过渡至碎末、小颗粒和软块状食物。颗粒过大可能降低吞咽安全性,过度稀释则会降低单位体积的蛋白质和能量密度。长期只提供完全匀浆食物,也不利于咀嚼能力及正常饮食行为形成。

辅食蛋白质的实际利用还取决于摄入量。若食物口感差、质地过硬或单次喂养量过大,即使实验室消化率较高,实际摄入仍可能不足。合理评价应同时记录冲调浓度、每次食用量、剩余量、喂养频次和胃肠耐受情况。辅食结构研究也表明,食物种类、用量和喂养频次共同决定营养供给,不能只依据单个产品的标签评价膳食质量^[3]。

3 辅食蛋白质营养利用率评价

3.1 含量、消化率与氨基酸质量的综合评价

粗蛋白检测通常根据食品总氮含量进行折算,适合质量控制,却不能区分完整蛋白、短肽和其他含氮成分,也无法反映消化吸收程度。现行婴幼儿谷类辅助食品标准规定,普通谷物辅助食品的蛋白质不得低于每 100 千焦 0.33 克,即每 100 千卡 1.4 克;高蛋白谷物辅助食品不得低于每 100 千焦 0.66 克,即每 100 千卡 2.8 克^[1]。上述数值属于产品成分要求,不

代表其中蛋白质能够被全部利用。

消化评价应采用符合婴幼儿生理条件的体外模型,分别模拟口腔、胃和小肠阶段。检测指标可包括蛋白质残留、可溶性氮、肽段分布和游离氨基酸释放量。体外模型具有重复性好、伦理风险低等优点,但无法完整模拟胃排空、肠道吸收和体内代谢,只能作为消化可及性证据。

氨基酸评价需要将辅食中必需氨基酸含量与婴幼儿参考模式比较,识别第一限制氨基酸。消化率校正后的氨基酸评价比单纯粗蛋白含量更接近实际营养价值,但其结果会受到参考模式和消化率数据来源影响。已有方法比较显示,改变参考氨基酸模式可明显改变不同评价方法与生物学指标的相关程度^[4]。因此,针对婴幼儿辅食时应使用相应年龄段参考模式,不能直接套用成人标准。

完整评价可分为四个层级:第一层检测蛋白质含量和污染物安全;第二层分析必需氨基酸构成及限制氨基酸;第三层采用婴幼儿体外消化模型测定蛋白水解和小肽释放;第四层通过规范的人体研究观察生长、耐受性、过敏反应及氮代谢。动物或体外结果不能直接替代婴幼儿人体营养效应,但可用于产品筛选和机制分析。

4 辅食配方优化及研究方向

4.1 原料搭配与加工调控

辅食配方设计应首先保证乳类喂养的主体地位,再通过肉、蛋、鱼、豆类和谷物逐步提高膳食多样性。早期辅食可选择铁强化谷物泥、肉泥和蛋类,在确认耐受后逐渐增加种类。谷物类产品不宜仅通过大量添加蛋白粉提高标签数值,应结合氨基酸组成和消化率确定蛋白来源及用量。

动物蛋白可提供较完整的必需氨基酸,植物蛋白则具有来源广、成本较低和便于加工等优势。合理配方可以谷物为基础,配合适量乳、蛋、肉或豆类蛋白,改善限制氨基酸。加工过程中宜采用充分熟化、细化、均质和适度酶解,减少抗营养因子并改善蛋白可及性,同时控制过度加热造成的聚集和赖氨酸损失。

我国 6 至 23 月龄婴幼儿辅食蛋白质摄入总体并不低,但铁和锌供给仍可能不足^[2]。因此,产品开发不能以“高蛋白”作为唯一目标。过度提高蛋白质比例可能挤占脂肪、铁、锌等营养成分的配方空间,还可能增加未消化蛋白进入结肠的数量。更合理的方向是维持适宜蛋白水平,提高必需氨基酸密度和消化利用效率。

4.2 证据局限和评价体系完善

目前研究存在三方面局限。第一,不同体外模型使用的胃液酸度、酶浓度、消化时间和样品浓度不一致,研究结果缺乏可比性。第二,部分研究采用成人消化条件,容易高估婴幼儿对蛋白质的分解能力。第三,体外水解率较高并不代表体内利用率一定较高,因为氨基酸吸收、肝脏代谢及其他营养素供给均会影响蛋白质合成。

后续应建立分月龄的标准化消化模型,并采用统一的蛋白水解和氨基酸检测方法。研究报告需明确原料品种、蛋白质变性程度、颗粒大小、加工温度和冲调方式。对于谷豆复配、部分水解蛋白及新型植物蛋白,应同时评价氨基酸互补、消化率、抗营养因子、过敏风险和胃肠耐受性。

人体研究应以正常生长发育、实际摄入量和安全耐受为主要终点,并区分健康足月儿、早产儿和食物过敏婴幼儿。只有形成“成分检测—体外消化—氨基酸质量—人体利用”的连续证据链,才能准确判断辅食蛋白质的真实营养价值。

5 结语

婴幼儿辅食蛋白质评价不能停留在粗蛋白含量层面。婴幼儿胃酸和蛋白酶活性低于成人,不同蛋白来源、食品基质、加工方式及辅食质地均会改变水解过程。现有数据表明,成人模型可能明显高估牛肉泥胃阶段的消化程度,谷豆复配也表现出显著的原料组合差异。辅食产品应在适宜蛋白含量基础上,兼顾必需氨基酸平衡、婴幼儿条件下消化率、微量营养素密度和胃肠耐受性。建立分月龄、标准化、多层级的评价体系,是提高辅食营养质量和实现精准喂养的重要基础。

【参考文献】

- [1] 国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 婴幼儿谷类辅助食品: GB 10769—2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
- [2] 庞学红, 杨振宇, 赵文华, 等. 2019—2021 年中国 6~23 月龄婴幼儿辅食能量和营养素摄入量[J]. 卫生研究, 2023, 52(1): 53-59.
- [3] 刘静, 霍军生, 孙静, 等. 辅食结构及其对婴幼儿营养的作用[J]. 中国食品卫生杂志, 2021, 33(3): 391-396.
- [4] 宋晓青, 张天博, 贾云虹, 等. 婴儿配方乳粉中蛋白质的营养评价及氨基酸分析研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 292-298.

-
- [5] Lee S, Jo K, Hur S J, et al. Low Protein Digestibility of Beef Puree in Infant In Vitro Digestion Model[J]. Food Science of Animal Resources, 2019, 39(6): 1000-1007.
- [6] Rodriguez M D, León A E, Bustos M C. Co-ingestion of Cereals and Legumes during Infant Complementary Feeding: Starch and Protein In Vitro Digestion[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2024, 79(2): 489-496.