DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251203004
引用格式: 杨茂林, 崔岩山, 闫士博, 等. 水煮对玉米矿物质生物可给性及营养质量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(6): 186–194.
YANG ML, CUI YS, YAN SB, *et al*. Effects of water-boiling on mineral bioaccessibility and nutritional quality of *Zea mays* L. [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(6): 186–194. (in Chinese with English abstract).

水煮对玉米矿物质生物可给性及营养质量的影响

杨茂林[1], 崔岩山[2*], 闫士博[2], 尹乃毅[2], 蔡晓琳[2]

(1. 中国科学院大学中丹学院, 北京 101408; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408)

摘 要: 目的 探究水煮对食品微量元素营养价值的实际影响, 建立基于生物可给性的玉米矿物质营养质量评价体系, 评估水煮处理对玉米中主要矿物质生物可给性及综合营养贡献的改变。**方法** 选取两种具有代表性的市售玉米样品(M1, M2)作为研究对象, 采用水煮方式进行热处理。利用基于生理的提取实验(physiologically based extraction test, PBET)这一体外消化模型模拟人体胃肠道消化环境, 测定并对比水煮前后玉米中钾(K)、磷(P)、镁(Mg)、钙(Ca)、铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)等 8 种矿物质的总浓度变化及小肠阶段的生物可给性。为更准确地反映人体实际吸收情况, 研究引入估计每日摄入量(estimated daily intake, EDI)、对推荐营养摄入量(recommended nutrient intake, RNI)的贡献率以及营养质量指数(index of nutritional quality, INQ)等指标, 构建多维度的营养质量评价模型进行量化分析。**结果** 水煮处理改变了基质结构, 影响了玉米中矿物质的生物可给性, 且不同元素呈现出差异化趋势。Zn、Mn 和 Mg 的生物可给性提升了 7%~45%, Ca 和 Cu 的生物可给性降低了 14%~49%。K 表现出极高的溶解稳定性, 而 Fe 和 P 在小肠阶段实现了释放回升。基于生物可给性的数据评估显示, 玉米是 K、P、Mg 的稳定优质膳食来源。按常规食用量估算, 其可食部分的 EDI 及对 RNI 的贡献率均处于较高水平; INQ 指数分析进一步证实, 即使经过水煮, 玉米在供给 K、P、Mg 方面仍具有良好的营养价值, 属于高营养密度的优质食物。**结论** 本研究揭示了水煮处理对玉米矿物质的生物可给性具有双向调节作用, 从而改变其最终的营养质量。本研究表明, 仅凭食品中矿物质的总含量无法准确反映其被人体实际吸收利用的程度。在进行食品膳食营养评价及加工工艺优化时, 有必要将生物可给性指标与传统总含量指标结合考虑, 以更科学、准确地评估食品经加工后的实际营养贡献。该发现为家庭烹饪的营养损耗评估、特需人群的精准膳食指导及食品加工工艺优化提供了关键理论依据。

关键词: 玉米; 水煮; 矿物质; 生物可给性; 营养质量指数

Effects of water-boiling on mineral bioaccessibility and nutritional quality of *Zea mays* L.

YANG Mao-Lin[1], CUI Yan-Shan[2*], YAN Shi-Bo[2], YIN Nai-Yi[2], CAI Xiao-Lin[2]

(1. *Sino-Danish College*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 101408, *China*;
2. *College of Resources and Environment*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 101408, *China*)

收稿日期: 2025-12-03
基金项目: 国家自然科学基金项目(42077400)
第一作者: 杨茂林(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为食品中矿物质营养评价。E-mail: yangmaolin231@mails.ucas.ac.cn
***通信作者:** 崔岩山(1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为食品中污染物健康风险。E-mail: cuiyanshan@ucas.ac.cn

ABSTRACT: Objective To investigate water-boiling on the nutritional value of trace elements, establish a bioaccessibility-based evaluation system for *Zea mays* L. mineral quality, and assess the changes in the bioaccessibility and comprehensive nutritional contribution of major minerals in *Zea mays* L. induced by water-boiling. **Methods** The 2 kinds of representative commercially available *Zea mays* L. samples (M1 and M2) were selected and treated by water-boiling. Using the physiologically based extraction test (PBET), an *in vitro* digestion model that simulates the human gastrointestinal environment, this study determined and compared the changes in the total concentrations of 8 kinds of mineral elements in *Zea mays* L. before and after water-boiling treatment, including potassium (K), phosphorus (P), magnesium (Mg), calcium (Ca), iron (Fe), manganese (Mn), copper (Cu)and zinc (Zn), together with their bioaccessibility in the small intestinal phase. Furthermore, to more accurately reflect actual human absorption, a multidimensional nutritional quality evaluation model was established for quantitative analysis based on estimated daily intake (EDI), contribution to recommended nutrient intake (RNI), and index of nutritional quality (INQ). **Results** Water-boiling treatment altered the matrix structure and affected the bioaccessibility of minerals in *Zea mays* L., with different elements presenting differentiated trends. The bioaccessibility of Zn, Mn, and Mg increased by 7%–45%. The bioaccessibility of Ca and Cu decreased by 14%–49%. K exhibited extremely high solubility stability, whereas Fe and P achieved a recovery of release in the small intestine stage. Data assessment based on bioaccessibility showed that *Zea mays* L. was a stable and high-quality dietary source of K, P and Mg. Estimated based on conventional consumption amounts, the EDI of its edible parts and the contribution rate to the RNI were both at relatively high levels; INQ analysis further confirmed that even afterwater-boiling, *Zea mays* L. still possessed good nutritional value in providing K, P, and Mg, belonging to high-nutrient-density quality foods. **Conclusion** This study reveals that water-boiling exerts a bidirectional regulatory effect on the bioaccessibility of mineral elements in *Zea mays* L., thereby altering their final nutritional quality. This study indicates that the total concentration of minerals in food cannot accurately reflect the degree of their actual absorption and utilization by the human body. When performing food dietary nutritional evaluation and processing technology optimization, it is necessary to consider bioaccessibility indicators in combination with traditional total concentration indicators to more scientifically and accurately assess the actual nutritional contribution of processed foods. This finding provides a key theoretical basis for nutritional loss assessment in household cooking, precise dietary guidance for special populations and the optimization of food processing technologies.

KEY WORDS: *Zea mays* L.; water-boiling; minerals; bioaccessibility; index of nutritional quality

0　引　言

玉米(*Zea mays* L.)作为全球重要的谷物主食, 是碳水化合物及钾、磷、镁、铁、锌等多种必需矿物质的重要膳食来源[1–4]。作为人体必需的微量营养素, 矿物质在维持骨骼健康、调节机体代谢及催化酶促反应等方面发挥着不可替代的作用[5]。特别是 Fe 和 Zn 等元素, 其摄入不足与缺铁性贫血、免疫功能低下及生长迟缓等全球性公共卫生问题密切相关[6–7]。因此, 保障从主食中获取充足且有效的矿物质, 是维持人体健康的基础。

长期以来, 针对谷物矿物质营养的评价多依赖“总浓度”指标。然而, 受食品基质束缚及抗营养因子(如植酸)络合的影响, 矿物质的总含量并不能真实反映其被人体吸收利用的程度[8]。因此, 引入“生物可给性”指标, 即在胃肠道消化过程中从基质中释放并可供吸收的比例, 对于准确评估食品的实际营养价值至关重要[9]。体外模拟消化模型因能有效模拟人体胃肠环境, 已成为评估这一指标的可靠工具[10–14]。

食品加工是影响矿物质生物可给性的关键变量。水煮作为玉米最普遍的家庭烹饪方式, 其对矿物质的影响机制具有复杂性: 一方面可能导致水溶性元素流失; 另一方面, 热处理引起的淀粉糊化、蛋白质变性及抗营养因子降解, 又可能促进矿物质的释放[15–17]。现有研究多集中于单一元素或总含量的变化, 缺乏关于水煮对玉米中多种矿物质生物可给性系统性影响的报道。此外, 单纯的生物可给性数据难以直观反映食物在膳食平衡中的地位, 结合营养质量指数(index of nutritional quality, INQ)将营养密度与能量密度关联, 能更客观地评价食品的综合营养贡献[18–20]。

鉴于此, 本研究旨在探究水煮处理对玉米矿物质真实营养价值的影响。研究采用基于生理的提取实验(physiologically based extraction test, PBET)这一体外消化模型, 系统测定水煮前后玉米中 K、P、Mg、Ca、Fe、Mn、Cu、Zn 等 8 种矿物质的总浓度及生物可给性变化, 并引入 INQ 评价体系构建多维度的营养质量评估模型。研究

结果将有助于揭示热加工对谷物矿物质释放的双向调节作用, 为优化玉米加工方式及制定科学的膳食指导提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

玉米: 市售, 产地分别源于云南保山(M1)和云南曲靖(M2)。

盐酸、冰乙酸(优级纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 苹果酸、碳酸氢钠、氯化钠(分析纯, 上海麦克林生化科技股份有限公司); 柠檬酸、乳酸(分析纯, 西陇科学股份有限公司); 胃蛋白酶(P7000, 来源于猪胃黏膜, 酶活≥250 units/mg)、胆汁提取物/胆盐(B8631)、胰酶(P1750, 来源于猪胰腺, 4×USP)[西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司]; 65%硝酸、30%过氧化氢(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 成分分析标准物质玉米(GBW10012a, 中国计量科学研究院标准物质研究与管理中心)。

1.2 仪器与设备

Optima 7300V 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 PerkinElmer 公司); Multiwave 7000 微波消解仪(奥地利 Anton Paar 公司); MS-TS 分析天平(精度 0.1 mg)、pH-3C pH 计(瑞士 Mettler Toledo 公司); CR22N 高速离心机(日本 HITACHI 公司); FSI-200 全温振荡培养摇床(菲斯福仪器有限公司); 101-0ABE 电热鼓风干燥箱(上海坤天实验仪器有限公司); LGJ-12 立式真空冷冻干燥机(北京松源华兴生物技术有限公司); DYHG-2550 电煮锅(广东大宇科技实业有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备与处理

从市场随机购买两种分别产自云南保山(M1)和云南曲靖(M2)的玉米。将部分鲜玉米直接冷冻干燥作为生玉米组(M1、M2)。其余玉米参照 LIU 等[21]的方法进行水煮处理: 将完整的玉米棒浸没于超纯水中, 在电煮锅中加热至 100 ℃并保持沸腾 10 min, 取出后冷却至室温, 沥干水分, 作为熟玉米组(M1*、M2*)。两组样品均经真空冷冻干燥、粉碎、过筛, 并于 65 ℃烘箱中烘干 4 h 至恒重, 置于干燥器中备用。

1.3.2 样品消解

称取约 0.5 g(精确至 0.0001 g)玉米粉末样品置于聚四氟乙烯微波消解罐中, 加入 5 mL 65%硝酸和 2 mL 30%过氧化氢, 旋紧外盖。置于微波消解仪中消解。对同一样品进行 3 次平行测定, 同时做试剂空白实验, 并设置标准物质(GBW10012a)进行质量控制。

1.3.3 体外模拟消化(PBET 模型)

参照 RUBY 等[10]描述的 PBET 方法进行体外模拟消化。(1)胃阶段: 配制模拟胃液(1 L): 含 0.5 g 柠檬酸、0.5 g 苹果酸、0.42 mL 乳酸、0.5 mL 冰乙酸及 8.775 g 氯化钠, 用浓盐酸调节 pH 至 1.5 后加入 1.25 g 胃蛋白酶。准确称取 1.000 g 样品置于 50 mL 聚丙烯离心管中, 加入 30 mL 模拟胃液(固液比 1:30, *m*:*V*), 于 37 ℃、150 r/min 气浴恒温振荡 1 h。依据 RUBY 等[10]的方法, 设定该固液比, 以模拟胃液分泌量, 并旨在保证消化体系具有适宜的流动性, 确保底物与酶液充分接触反应。反应结束后, 吸取 10 mL 反应液, 在 4000 r/min 下离心 10 min, 上清液经 0.45 μm 滤膜过滤, 于 4 ℃保存待测。(2)小肠阶段: 胃阶段反应结束后, 使用碳酸氢钠调节剩余消化液 pH 至 7.0, 加入 0.018 g 胰酶(终质量浓度 0.6 g/L)和 0.06 g 胆盐(终质量浓度 2 g/L)。继续在 37 ℃、150 r/min 下恒温振荡 4 h, 期间监测并维持体系 pH 在 7.0±0.1。反应结束后, 吸取 10 mL 反应液, 按上述条件进行离心和过滤, 滤液于 4 ℃保存待测。

1.3.4 元素测定

采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定消解液及体外消化液中各矿物质元素的浓度。

1.3.5 评价方法

(1)生物可给性计算

矿物质生物可给性计算公式见式(1):

$$\text{生物可给性}/\% = \frac{\text{消化液中矿物质浓度}}{\text{样品中矿物质总浓度}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: 消化液中矿物质的浓度, mg/kg(针对 Ca、Fe、Mn、Cu、Zn)或 g/kg(针对 K、P、Mg); 样品中矿物质总浓度[22], mg/kg(针对 Ca、Fe、Mn、Cu、Zn)或 g/kg(针对 K、P、Mg)。

(2)推荐营养摄入量贡献率

以每日摄入 100 g 玉米为标准, 推荐营养摄入量(recommended nutrient intake, RNI)贡献率计算公式见式(2):

$$\text{推荐营养摄入量贡献率}/\% = \frac{\text{每100 g玉米中该矿物质可提供量}}{\text{推荐营养摄入量}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: 每 100 g 食物[23]中的矿物质含量, mg; 推荐营养摄入量, 数据来源于《中国居民膳食指南(2022)》, mg/d。

(3)营养质量指数

营养质量指数计算公式见式(3):

$$\text{INQ} = \frac{\text{每100 g玉米中某矿物质对推荐营养摄入量的贡献率}}{\text{每100 g玉米提供的能量对每日参考能量摄入量的贡献率}} \quad (3)$$

式中: 每 100 g 玉米中某矿物质对推荐营养摄入量的贡献率为该矿物质的推荐营养摄入量贡献率, %; 每 100 g 玉米提供的能量对每日参考能量摄入量的贡献率为每 100 g 玉米所提供能量占每日参考能量摄入量的百分比, %。

营养质量指数阐释了在摄入一定量的热量时, 这种食物能提供所需的特定营养成分的份数。INQ 通过比较营养密度与能量密度评估食物质量, INQ≥1 被视为优质食物

来源[24–26]。

1.4　数据处理

所有实验均重复 3 次, 结果以平均值±标准偏差表示。利用 SPSS 27.0 进行独立样本 *t* 检验和 Tukey HSD 事后检验(P<0.05 表示差异显著), 利用 Origin 2025 绘图。

2　结果与分析

2.1　水煮对玉米中矿物质总浓度的影响

两种生熟玉米样品中矿物质元素的总浓度如表 1 所示。由表 1 可知, 两种生玉米样品中 8 种矿物质元素的浓度排序一致, 从高到低依次为: K>P>Mg>Ca>Fe>Zn>Mn>Cu。

水煮对玉米中矿物质元素浓度的影响表现出显著的选择性和品种特异性。两种玉米的 P、Mg 在水煮前后浓度均未发生显著变化(P>0.05), 表明这两种元素在玉米基质中结合较为紧密, 不易随水流失。M2 水煮后 Mn 浓度虽出现统计学差异(P<0.05), 但变化幅度较小。Fe、Cu 和 Zn 表现出品种特异性: 在 M1 中显著下降(P<0.05), 而在 M2 中保持稳定。相比之下, K 在水煮前后浓度呈现出不同变化, M2 水煮后表现为下降, 而 M1 水煮后则显著升高(P<0.05)。

本研究中, 部分矿物质(如 Mg、P)在水煮后保持了较高的稳定性, 这与 MOTA 等[27]关于假谷物(藜麦、苋菜、荞麦)的研究结果存在差异, 水煮会导致荞麦中 Fe、Zn、Mg、P 和 K 的含量显著降低, 蒸煮亦会导致苋菜中 Mg 含量损失达 20%。本研究中 M1 样品 Fe、Cu、Zn 的减少趋势与 MOTA 等[27]报道的荞麦变化一致, 这一结果符合 LUND[28]描述的“淋滤机制”: 在缺乏强结合力的情况下, 水溶性离子会顺浓度梯度向沸水介质中快速扩散。而 Mg 和 P 的稳定性则显示出玉米基质可能具有更强的矿物质固持能力, 这种稳定性与 MISHRA 等[29]强调的“食物基质效应”密切相关: 矿物质并非以游离状态存在, 而是被物理“束缚”在复杂的细胞结构或生物大分子网络(如蛋白质-淀粉基质)中, 这种基质效应能有效限制营养素在加工过程中的迁移与释放。此外, 玉米完整的种皮结构也发挥了关键的物理屏障作用, 保留外皮能潜在减少水溶性矿物质向高温烹饪介质的浸出。水煮后, M1 中 Zn 含量下降而 K 含量上升, 而 M2 中 Zn 含量上升而 K 含量下降, 表明不同品种对水煮处理的响应存在差异, 提示品种遗传特性可能影响矿物质在水煮过程中的迁移与保留。GANESH 等[30]在对玉米自交系的研究中揭示, 不同基因型玉米的植酸酶活性及植酸含量存在显著差异, 这意味着 M1 和 M2 中矿物质与植酸形成难溶性复合物的程度可能不同, 进而导致了其在水煮过程中溶出释放差异。

此外, LISCIANI 等[31]对意大利常见蔬菜的研究指出, 矿物质保留率高度依赖于烹饪方式与食物基质, 微波烹饪显著增加了茄子中 Mg、P 的含量, 而烧烤则明显降低了西葫芦中 Ca 的含量, 进一步证实了热处理对矿物质含量的影响具有显著的基质特异性。LIU 等[32]在关于大米的研究中也指出, 仅烹饪前的淘洗步骤即可导致 Mg、Ca、Mn 和 Fe 的明显流失, 其中 Mg 损失最高可达 68.8%, 这也从侧面佐证了不同谷物基质及预处理方式差异对矿物质保留率具有关键影响。

2.2　水煮对玉米中矿物质生物可给性的影响

水煮处理改变了玉米中矿物质的生物可给性, 具体数据见表 2。

不同元素对水煮热处理的响应存在差异。具体而言, 水煮使 Zn、Mn 和 Mg 在小肠阶段的生物可给性提高了约 7%~45%。生玉米 M1 和 M2 中 Zn 的小肠生物可给性分别为 44.48%和 48.26%, 经水煮后分别提升至 60.51%和 52.68%, 增幅分别为 36.03%和 9.16%。Mn 和 Mg 也表现出类似的增长趋势: 对于 Mn, 生玉米样品 M1 和 M2 的小肠生物可给性相对较低(分别为 7.41%和 10.60%), 但在水煮后分别增加至 10.69%和 15.34%, 增幅分别为 44.26%和 44.72%; Mg 的小肠生物可给性同样在水煮后得到改善, M1 和 M2 分别由生样品的 51.59%和 52.04%提升至水煮后的 55.78%和 55.90%, 增幅分别为 8.12%和 7.42%。以上结果表明水煮有利于这 3 种元素在肠道的释放与潜在吸收。这一发现与 MOTTA 等[17]在荞麦和苋菜研究中的结论一致, 发现水煮可使荞麦中 Zn 的生物可给性提高约 3.5 倍。其机制可能归因于抗营养因子的热降解作用。植酸是谷物中限

表 1　M1 和 M2 生玉米和熟玉米中 8 种矿物质元素的总浓度(干重)(n=3)

Table 1　Total concentrations of 8 kinds of mineral elements in raw and cooked M1 and M2 *Zea mays* L. samples (dry weight) (n=3)

玉米品种	Ca/(mg/kg)	Fe/(mg/kg)	Mn/(mg/kg)	Cu/(mg/kg)	Zn/(mg/kg)	K/(g/kg)	P/(g/kg)	Mg/(g/kg)
M1	211.65±2.43^{a}	68.25±1.90^{a}	25.78±0.16^{a}	7.06±0.79^{a}	52.51±1.38^{a}	18.04±0.30^{b}	6.62±0.06^{a}	2.28±0.03^{a}
M1*	213.23±19.56^{a}	60.88±3.48^{b}	27.03±1.05^{a}	5.09±0.35^{b}	48.52±2.19^{b}	19.51±0.67^{a}	6.40±0.27^{a}	2.21±0.09^{a}
M2	213.74±15.94^{a}	51.98±5.89^{a}	22.82±0.04^{b}	5.77±0.23^{a}	41.21±0.87^{a}	18.59±0.15^{a}	6.70±0.13^{a}	2.19±0.00^{a}
M2*	235.84±11.27^{a}	56.26±5.89^{a}	24.64±0.14^{a}	5.17±0.34^{a}	42.45±1.20^{a}	18.12±0.22^{b}	6.71±0.07^{a}	2.15±0.04^{a}

注: 对于同种玉米(M1 与 M1*, M2 与 M2*), 不同字母表示经独立样本 *t* 检验分析在 P<0.05 下差异显著。

表 2 玉米样品 M1 和 M2 水煮前后 8 种矿物质元素的生物可给性(n=3)

Table 2 Bioaccessibility of 8 kinds of mineral elements in *Zea mays* L. samples M1 and M2 before and after water-boiling (n=3)

类别	M1	M1*	M2	M2*
Ca-G	68.47±1.90[a]	66.52±0.60[a]	64.50±1.04[b]	68.40±1.10[a]
Ca-I	28.83±3.50[a]	14.77±0.59[b]	31.51±0.53[a]	16.23±2.44[b]
Fe-G	31.86±0.21[a]	27.80±0.35[b]	37.20±1.87[a]	31.19±0.15[b]
Fe-I	38.79±1.60[a]	38.61±0.42[a]	39.16±0.51[a]	38.24±1.28[a]
Mn-G	67.64±0.99[a]	68.06±0.63[a]	67.11±0.57[b]	71.42±1.90[a]
Mn-I	7.41±2.31[a]	10.69±0.67[a]	10.60±6.10[a]	15.34±5.87[a]
Cu-G	35.11±0.98[a]	33.02±2.57[a]	36.23±1.31[a]	29.03±1.74[b]
Cu-I	36.95±3.07[a]	31.64±2.45[a]	41.95±3.90[a]	33.28±3.07[b]
Zn-G	78.29±1.80[a]	74.18±0.81[b]	72.39±9.11[a]	82.89±2.19[a]
Zn-I	44.48±13.88[a]	60.51±0.74[a]	48.26±6.39[a]	52.68±6.95[a]
K-G	74.08±0.97[b]	76.50±0.58[a]	72.41±0.31[b]	75.83±0.99[a]
K-I	76.02±1.37[a]	75.58±0.53[a]	73.15±0.16[a]	75.73±2.63[a]
P-G	64.73±1.28[a]	50.24±0.43[b]	63.93±0.52[a]	51.96±0.72[b]
P-I	72.66±0.51[a]	72.10±0.80[a]	70.83±0.62[a]	71.60±2.07[a]
Mg-G	71.82±1.63[a]	73.93±0.63[a]	70.15±0.35[a]	75.77±3.52[a]
Mg-I	51.59±1.72[b]	55.78±1.12[a]	52.04±1.58[a]	55.90±3.47[a]

注: G 表示胃阶段; I 表示小肠阶段; 对于同种玉米的相同消化阶段相同元素, 不同字母代表水煮前后生物可给性具有显著差异(P<0.05)。

制二价阳离子(如 Zn^{2+}、Mg^{2+})吸收的主要抗营养因子。KUMAR 等[33]在对稻米热加工的研究中证实, 蒸煮处理显著降低了籽粒中的植酸含量, 且 Zn 等矿物质的生物可给性与植酸保留量呈明显负相关。这意味着煮沸过程中的热效应有效破坏了“矿物质-植酸”络合物的化学键, 释放了被锁定的金属离子。其次, GANESH 等[30]指出, 玉米内源性植酸酶活性的基因型差异也在一定程度上调控了植酸的降解效率, 这可能解释了本研究中不同品种(M1 和 M2)矿物质释放率提升幅度的差异。然而, 本研究结果与 LIU 等[32]及 ROUSSEAU 等[34]的报道存在差异。LIU 等[32]指出, 普通蒸煮导致大米中 Zn 和 Mn 的生物可给性降低; ROUSSEAU 等[34]则发现延长蒸煮时间会降低菜豆中 Zn 和 Mg 的生物可给性。这种差异提示, 热处理对矿物质释放的影响具有高度的基质依赖性。玉米独特的物理结构或化学成分可能在一定程度上保护了矿物质免受过度流失, 同时热效应又促进了其从基质中的解离。

与上述元素促进释放的趋势相反, 水煮使 Ca 和 Cu 在小肠阶段的生物可给性下降了约 14%~49%。特别是 Ca, 生玉米 M1 和 M2 在小肠阶段的生物可给性分别为 28.83%和 31.51%, 而水煮后分别骤降至 14.77%和 16.23%, 降幅分别为 48.77%和 48.49%。Cu 的生物可给性在水煮后也呈现下降趋势: 生玉米 M1 和 M2 的小肠生物可给性分别为 36.95%和 41.95%, 水煮后分别降低至 31.64%和 33.28%, 降幅分别为 14.37%和 20.67%。这一结果与 GALÁN 等[35]在肠内营养配方研究中观察到的加热降低 Ca 生物可给性的现象相符, 但与 MOTTA 等[17]及 LIU 等[32]的研究结果相悖。MOTTA 等[17]发现水煮提高了藜麦中 Ca 和 Cu 的生物可给性, LIU 等[32]也发现在大米中烹饪增加了 Ca 的生物可给性。本研究中观察到的相反趋势提示, 玉米基质可能对热处理有特定的作用模式。MISHRA 等[29]强调, 热处理会导致食物基质结构重排, 形成更致密的聚合物网络。热处理可能诱导了玉米淀粉的糊化和蛋白质变性, 形成了结构更致密、更难消化的蛋白质-淀粉-矿物质复合物, 将 Ca 和 Cu 重新包埋或吸附, 束缚在基质内部, 或者增加了消化酶接触底物的物理阻力, 从而阻碍了其在小肠环境中的释放。此外, ROUSSEAU 等[36]指出, 烹饪过程中膳食纤维和植酸等成分可能与矿物质形成不溶性螯合物, 这些螯合物在消化过程中难以被破坏, 这也可能是导致 Ca 和 Cu 生物可给性降低的重要原因。

不同于上述元素的升降变化, 小肠阶段 K、P 和 Fe 在水煮过程中表现出较强的稳定性或恢复性特征。K 在整个消化过程中始终表现出极高的稳定性, 无论水煮与否, 其在胃阶段(72.41%~76.50%)和小肠阶段(73.15%~76.02%)的生物可给性均维持在 70%以上的高水平, 表明 K 主要以高

可溶性的离子形态存在, 受热处理和 pH 变化的影响极小。Fe 和 P 呈现出胃阶段释放受限但小肠阶段回升的趋势: 水煮降低了两者在胃阶段的初始释放量, M1 和 M2 中 Fe 的生物可给性分别从 31.86%和 37.20%降至 27.80%和 31.19%, P 则分别从 64.73%和 63.93%降至 50.24%和 51.96%, 但在进入小肠阶段后, 其生物可给性均回升至与生玉米相当的水平(Fe 约为 38%, P 约为 71%~72%)。这种特殊的“恢复”趋势与已有文献报道多有不同: MOTTA 等[17]观察到水煮提高了藜麦和苋菜中 Fe 的生物可给性以及苋菜中 P 和 K 的生物可给性; LIU 等[32]发现普通蒸煮和微波烹饪均提高了大米中 Fe 的生物可给性; 而 ROUSSEAU 等[34]在菜豆中则发现蒸煮时间延长会持续降低 Fe 的生物可给性。本研究中 Fe 和 P 在小肠阶段的回升现象说明, 尽管水煮改变了 Fe 和 P 在酸性环境下的溶解度, 但在中性的小肠环境中, 这些元素重新释放, 从而保持了最终的生物利用潜能。MISHRA 等[29]指出, 随着 pH 升高及胰酶的加入, 胃阶段形成的蛋白质-矿物质或淀粉-矿物质聚集体可能发生解聚, 从而释放出被物理包埋的矿物质。因此, Fe 和 P 这种特殊的“回升”现象可能蕴含着潜在的生理与化学机制: 一方面, pH 由酸性升至中性(pH 7.0)的环境变化可能诱导了部分对 pH 敏感的矿物质复合物发生再溶解或配体交换; 另一方面, 胰酶和胆盐的加入推测有助于进一步降解食糜中的淀粉-蛋白质网络结构, 从而可能解除了胃阶段因热变性而形成的物理束缚。这表明玉米基质对 Fe 和 P 的束缚具有环境敏感性, 中性的小肠环境有利于解除这种物理束缚, 最终使其生物可给性维持稳定。这一结果提示, 玉米基质在肠道环境中似乎具备特定的矿物质释放适应性, 仅基于胃阶段的数据可能会低估熟制玉米的实际营养潜力。

2.3　玉米中矿物质的膳食营养贡献评价

为了更准确地评估水煮玉米的营养价值, 本研究结合了估计每日摄入量(estimated daily intake, EDI)和 RNI 贡献率进行评价。

2.3.1　EDI 及 RNI 贡献率

基于总浓度和生物可给态浓度的估计 EDI 及 RNI 的贡献率结果见表 3 和表 4。玉米提供了可观的矿物质 EDI, 其中 K 的 EDI 最高。由表 4 可知, 以生物可给态浓度为基准, 玉米对 RNI 的贡献率排序为: K>P>Mg>Cu>Zn>Fe>Mn>Ca。K、P、Mg 是玉米提供的最核心营养素, 仅摄入 100 g 即可分别满足成人每日需求的 69.71%、65.94%和 48.79%, 且该贡献率在水煮后保持稳定。值得注意的是, 水煮处理对 Cu 和 Zn 的膳食贡献率产生了截然不同的影响。虽然生玉米是 Cu 的良好来源(可满足每日需求的 30%~32.5%), 但水煮处理会降低其对 RNI 的贡献率至 20%左右。相反, 对于 Zn, 水煮后的营养贡献率较生样品有所提高(例如 M1 样品对女性 RNI 的贡献率由 22.59%提升至 34.59%), 表明烹饪实际上改善了 Zn 的潜在利用价值, 而这一积极变化在仅关注总浓度的评价中常被忽视。然而, 无论处理与否, 玉米对 Ca 的 RNI 贡献率均低于 1%, 表明其并非 Ca 的有效膳食来源。MA 等[37]对大米的研究也得出了类似的结论, 证实了若仅依据总含量进行评估, 会严重高估谷物基质中部分矿物质的实际营养贡献, 从而误导消费者的膳食选择。

2.3.2　INQ 评价

玉米中矿物质分别基于总浓度(index of nutritional quality based on total concentration, INQ-T)与生物可给态浓度(index of nutritional quality based on bioaccessible concentration, INQ-B)的营养质量指数如表 5 所示。对比分析显示, 传统的 INQ-T 评价体系存在偏差, 往往会高估食品的真实营养价值。总体上, 各元素的 INQ-B 均低于相应的 INQ-T, 其中 Ca、Fe、Cu 的降幅最为明显。例如, INQ-T 数据显示玉米是 Cu 和 Fe 的优质来源(INQ>1), 但经生物可给性校正后的 INQ-B 显示, 其对 Fe 的真实膳食贡献相对有限, 对女性而言甚至属于低质量来源(INQ-B<1)。

表 3　基于总浓度和生物可给态浓度的玉米中矿物质元素估计 EDI (mg/d)

Table 3　EDI of mineral elements in *Zea mays* L. based on total concentration and bioaccessible concentration (mg/d)

元素	基于总浓度				基于生物可给态浓度			
	M1	M1*	M2	M2*	M1	M1*	M2	M2*
K	1804.00	1951.00	1859.00	1812.00	1371.00	1474.00	1360.00	1372.00
P	662.00	640.00	670.00	671.00	481.00	462.00	475.00	481.00
Mg	228.00	221.00	219.00	215.00	164.00	163.00	154.00	163.00
Ca	21.17	21.32	21.37	23.58	6.10	3.15	6.73	3.83
Fe	6.83	6.09	5.20	5.63	2.65	2.35	2.04	2.15
Mn	2.58	2.70	2.28	2.46	0.19	0.29	0.24	0.38
Cu	0.71	0.51	0.58	0.52	0.26	0.16	0.24	0.17
Zn	5.25	4.85	4.12	4.25	1.92	2.94	1.99	2.24

表 4 基于总浓度和生物可给态浓度计算的玉米矿物质元素估计 EDI 对 RNI 的贡献(%)

Table 4 Contribution of EDI of mineral elements in *Zea mays* L. to RNI based on total and bioaccessible concentrations (%)

元素	性别	基于总浓度					基于生物可给态浓度				
		M1	M1*	M2	M2*	均值	M1	M1*	M2	M2*	均值
K	-	90.20	97.55	92.95	90.60	92.83	68.55	73.7	68.00	68.60	69.71
P	-	91.94	88.89	93.06	93.19	91.77	66.81	64.17	65.97	66.81	65.94
Mg	-	69.09	66.97	66.36	65.15	66.89	49.70	49.39	46.67	49.39	48.79
Ca	-	2.65	2.67	2.67	2.95	2.74	0.76	0.39	0.84	0.48	0.62
Fe	男	56.92	50.75	43.33	46.92	49.48	22.08	19.58	17.00	17.92	19.15
	女	37.94	33.83	28.89	31.28	32.99	14.72	13.06	11.33	11.94	12.76
Mn	男	57.33	60.00	50.67	54.67	55.67	4.22	6.44	5.33	8.44	6.11
	女	64.50	67.50	57.00	61.50	62.63	4.75	7.25	6.00	9.50	6.88
Cu	-	88.75	63.75	72.50	65.00	72.50	32.50	20.00	30.00	21.25	25.94
Zn	男	43.75	40.42	34.33	35.42	38.48	16.00	24.50	16.58	18.67	18.94
	女	61.76	57.06	48.47	50.00	54.32	22.59	34.59	23.41	26.35	26.74

注: -表示该元素的 RNI 参考值未按性别区分, 故不分别列示男女结果。

表 5 基于总浓度和生物可给态浓度计算的玉米矿物质元素 INQ

Table 5 INQ of mineral elements in *Zea mays* L. based on total and bioaccessible concentrations

元素	性别	基于 INQ-T				基于 INQ-B			
		M1	M1*	M2	M2*	M1	M1*	M2	M2*
K	男	5.50	5.94	5.66	5.52	4.18	4.49	4.14	4.18
	女	4.40	4.75	4.53	4.41	3.34	3.59	3.31	3.34
P	男	5.59	5.39	5.65	5.66	4.06	3.89	4.01	4.06
	女	4.47	4.31	4.51	4.52	3.25	3.11	3.20	3.25
Mg	男	4.21	4.08	4.04	3.97	3.03	3.01	2.84	3.01
	女	3.36	3.26	3.23	3.17	2.42	2.40	2.27	2.40
Ca	男	0.16	0.16	0.16	0.18	0.05	0.02	0.05	0.03
	女	0.13	0.13	0.13	0.14	0.04	0.02	0.04	0.02
Fe	男	3.49	3.10	2.64	2.86	1.34	1.19	1.03	1.09
	女	1.85	1.65	1.41	1.52	0.72	0.63	0.55	0.58
Mn	男	3.48	3.65	3.08	3.32	0.26	0.39	0.32	0.51
	女	3.10	3.25	2.74	2.96	0.23	0.35	0.29	0.46
Cu	男	5.41	3.89	4.43	3.97	1.98	1.22	1.83	1.30
	女	4.32	3.11	3.54	3.17	1.58	0.97	1.46	1.04
Zn	男	2.66	2.46	2.10	2.16	0.97	1.48	1.01	1.13
	女	3.00	2.78	2.37	2.44	1.10	1.68	1.14	1.28

然而, 对于 K、P、Mg, 即便考虑了生物可给性损失, 其 INQ-B 值仍远大于 1(例如 K 的 INQ-B 为 3.31~4.49), 表明玉米可作为这 3 类矿物质优质膳食来源。王彩霞等[18]对淡水鱼及张琪等[20]对薯类的研究均利用 INQ 评价体系证实了相关食品是 P、K、Mg 的优质来源, 表明这几种宏量矿物质在不同食物基质中均具有较高的供给潜力与稳定性。值得一提的是, 水煮进一步改善了 Zn 的营养质量, 使其 INQ-B 由接近 1.0 提升至 1.0 以上(如 M1 样品对男性由 0.97 升至 1.48), 使其满足了优质营养源的判定标准。综上所述, 引入生物可给性校正的 INQ-B 模型能更灵敏地反映食品加工(如水煮)对营养质量的实际影响, 纠正了传统评价体系的片面性。

3 讨论与结论

本研究系统研究了水煮处理对玉米中矿物质总浓度、生物可给性及营养质量的影响, 发现尽管水煮对矿物质总

浓度的影响有限, 但却明显改变了矿物质生物可给性及最终的营养贡献。这种影响揭示了水煮对食品矿物质营养价值具有复杂的双向调节作用。具体而言, Zn、Mn 和 Mg 的生物可给性提升了 7%~45%。这一结果与 KUMAR 等[33]的发现相一致, 其机制可能归因于高温诱导的植酸热降解。热处理破坏了矿物质-植酸复合物, 从而产生的化学释放效应抵消了流失风险, 驱动了生物可给性的净提升。相反, Ca 和 Cu 的生物可给性下降了 14%~49%。根据 MISHRA 等[29]提出的“食物基质效应”, 这可能是由于淀粉糊化与蛋白质变性引发的基质重构形成了致密的“物理包埋”网络。该结构限制了消化酶与底物的接触及离子的溶出, 从而导致其生物可给性下降。本研究构建的基于生物可给性校正的营养评价模型, 适用于家庭烹饪方式的营养损耗评估及特需人群(如需补锌或限钾人群)的精准膳食指导, 同时也为玉米深加工产品的工艺优化提供了“保留生物活性”的理论依据。

与先前关于藜麦、大米及豆类的研究工作相比, 本研究发现玉米基质表现出独特的矿物质释放动力学特征。特别是 Fe 和 P 在小肠阶段展现出的“恢复性”释放趋势(即胃阶段降低但小肠阶段回升), 不同于其他谷物中常见的单向变化, 提示玉米中矿物质的存在形态及在消化过程中的溶解与再结合行为具有特殊性。

本研究构建的基于生物可给性校正的 INQ-B, 为玉米的膳食营养价值提供了更准确的评估, 明确了玉米是 K、P、Mg 的高营养密度膳食来源, 且水煮能将其转化为 Zn 的营养供给能力使其达到优质标准(INQ>1), 但其对 Ca、Mn 的贡献极其有限。这一结论校正了传统基于总含量评价可能导致的营养误判(如高估 Fe、Cu 的价值), 提示在制定个性化膳食指导或开发玉米基功能食品时, 应充分考虑加工方式对特定元素生物可给性的影响。本研究的方法论启示在于: 食品营养评价应当从单一的“元素总量”向“生物可给性”转变。在未来的食品加工设计中, 不应仅关注营养素的物理保留率, 更应将“消化释放特性”作为核心指标, 以实现食品营养价值的精准最大化。

尽管本研究提供了有价值的体外数据, 但仍存在一定的局限性。王晓玲等[38]对嫩芽海带加工过程的研究表明, 加工处理可引起矿物质含量及综合营养品质的下降, 进一步说明不同食品基质中加工效应具有一定共性, 但具体影响仍与食品基质特性密切相关。此外, 本研究仅选取了两种市售玉米样品, 未涵盖更多品种及种植环境(土壤、气候)的差异, 因此在将本研究结论外推至不同遗传背景的玉米品种时, 应充分考虑品种特异性及种植环境差异带来的潜在影响。这一必要性得到了 KUMAR 等[33]最新研究的佐证: 在对不同基因型稻米的研究中发现, Fe 和 Zn 的生物可给性与品种初始植酸含量呈显著负相关, 且不同基因型对热加工的响应程度存在显著差异, 低植酸品种的生物可给性显著优于高植酸品种。这提示玉米中可能存在类似的遗传调控机制。未来的研究应扩大样本量, 探究不同玉米品种基质结构对矿物质释放的调控机制。PBET 体外模拟模型虽然具有高通量和低成本优势, 但无法完全复刻人体复杂的体内消化环境及肠道微生态的调节作用。此外, 关于水煮导致 Ca、Cu 生物可给性降低的具体分子机制尚缺乏微观结构表征数据的直接支撑。建议未来的研究进一步结合 Caco-2 细胞模型或动物实验进行验证。

参考文献

[1] RANUM P, PEÑA-ROSAS JP, GARCIA-CASAL MN. Global maize production, utilization, and consumption [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2014, 1312(1): 105–112.

[2] 王浩, 刘景圣, 郑明珠, 等. 鲜食糯玉米贮藏过程中淀粉含量及相关酶活性变化的研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(3): 6–10, 24.
WANG H, LIU JS, ZHENG MZ, *et al.* Changes of starch content and related enzyme activities in fresh waxy corn during storage [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(3): 6–10, 24.

[3] 牛丽影, 马玉玲, 吴建平, 等. 鲜食玉米中脂氧合酶活力、脂肪酸与挥发性成分的相关性研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(5): 58, 59–64.
NIU LY, MA YL, WU JP, *et al.* Correlation between lipoxygenase activity, fatty acids and volatile components in fresh corn [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(5): 58, 59–64.

[4] 徐丽, 赵久然, 卢柏山, 等. 我国鲜食玉米种业现状及发展趋势[J]. 中国种业, 2020(10): 14–18.
XU L, ZHAO JR, LU BS, *et al.* Status and development trend of fresh corn seed industry in China [J]. China Seed Industry, 2020(10): 14–18.

[5] CORMICK G, BELIZÁN JM. Calcium intake and health [J]. Nutrients, 2019, 11(7): 1606.

[6] WILSON BR, BOGDAN AR, MIYAZAWA M, *et al.* Siderophores in iron metabolism: From mechanism to therapy potential [J]. Trends in Molecular Medicine, 2016, 22(12): 1077–1090.

[7] MAARES M, HAASE H. Zinc and immunity: An essential interrelation [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2016, 611: 58–65.

[8] 张玉康, 瞿福, 阮若涵, 等. 重金属生物可给性体外模拟方法研究进展[J]. 生态毒理学报, 2025, 20(1): 221–237.
ZHANG YK, QU F, RUAN RH, *et al.* Research progress on *in vitro* simulation methods for bioaccessibility of heavy metals [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2025, 20(1): 221–237.

[9] 付瑾, 崔岩山. 食物中营养物及污染物的生物可给性研究进展[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(2): 113–120.
FU J, CUI YS. Research progress on bioaccessibility of nutrients and pollutants in food [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, 6(2): 113–120.

[10] RUBY MV, DAVIS A, SCHOOF R, *et al.* Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test [J]. Environmental Science & Technology, 1996, 30(2): 422–430.

[11] INTAWONGSE M, DEAN JR. Use of the physiologically-based extraction test to assess the oral bioaccessibility of metals in vegetable plants grown in contaminated soil [J]. Environmental Pollution, 2008, 152(1): 60–72.

[12] ZHUANG P, ZHANG C, LI Y, *et al.* Assessment of influences of cooking on cadmium and arsenic bioaccessibility in rice, using an *in vitro* physiologically-based extraction test [J]. Food Chemistry, 2016, 213:

206–214.

[13] MNISI RL, NDIBEWU PP, MAFU LD, *et al*. Bioaccessibility and risk assessment of essential and non-essential elements in vegetables commonly consumed in Swaziland [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 144: 396–401.

[14] WANG C, DUAN HY, TENG JW. Assessment of microwave cooking on the bioaccessibility of cadmium from various food matrices using an in vitro digestion model [J]. Biological Trace Element Research, 2014, 160(2): 276–284.

[15] 曹欢. 烹饪方式对中华绒螯蟹中元素分布影响及砷的食用安全风险评估研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
CAO H. Effect of cooking methods on element distribution in Chinese mitten crab and risk assessment of dietary arsenic [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.

[16] VARGHA S, IGUAL M, MIRABALLES M, *et al.* Influence of cooking technique on bioaccessibility of bioactive compounds in vegetable lentil soup [J]. Foods, 2024, 13(15): 2405.

[17] MOTTA C, CASTANHEIRA I, MATOS AS, *et al.* Effect of cooking on the content and bioaccessibility of minerals in pseudocereals [J]. Biology and Life Sciences Forum, 2022, 76: 17.

[18] 王彩霞, 刘宇, 袁文婷, 等. 2021 年陕西省淡水鱼中矿物质含量[J]. 卫生研究, 2024, 53(4): 608–611.
WANG CX, LIU Y, YUAN WT, *et al.* Mineral content in freshwater fish in Shaanxi Province in 2021 [J]. Journal of Hygiene Research, 2024, 53(4): 608–611.

[19] 王敏娟, 尹丹阳, 胡佳薇, 等. 陕西产小麦不同加工程度的营养成分分析及评价[J]. 卫生研究, 2021, 50(1): 69–74, 85.
WANG MJ, YIN DY, HU JW, *et al.* Analysis and evaluation of nutritional components of wheat produced in Shaanxi with different processing degrees [J]. Journal of Hygiene Research, 2021, 50(1): 69–74, 85.

[20] 张琪, 赵紫微, 于雪荣, 等. 2021 年安庆市 5 种薯类营养成分[J]. 卫生研究, 2024, 53(4): 600–607.
ZHANG Q, ZHAO ZW, YU XR, *et al.* Nutritional components of 5 potatoes in Anqing City in 2021 [J]. Journal of Hygiene Research, 2024, 53(4): 600–607.

[21] LIU Y, LI Y, KE Y, *et al*. Processing of four different cooking methods of *Oudemansiella radicata*: Effects on *in vitro* bioaccessibility of nutrients and antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2021, 337: 128007.

[22] CAI X, CHEN X, YIN N, *et al*. Estimation of the bioaccessibility and bioavailability of Fe, Mn, Cu, and Zn in Chinese vegetables using the *in vitro* digestion/Caco-2 cell model: The influence of gut microbiota [J]. Food & Function, 2017, 8(12): 4592–4600.

[23] 中国营养学会. 中国居民膳食指南[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2022.
Chinese Nutrition Society. The Chinese dietary guidelines [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2022.

[24] 邓宏玉, 刘芳芳, 张秦蕾, 等. 5 种禽肉中矿物质含量测定及营养评价[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(6): 21–24, 103.
DENG HY, LIU FF, ZHANG QL, *et al.* Determination and nutritional evaluation of mineral content in 5 kinds of poultry meat [J]. Food Research and Development, 2017, 38(6): 21–24, 103.

[25] 梁水连, 吕岱竹, 周若浩, 等. 香蕉中 5 种矿物质元素含量测定及营养评价[J]. 食品科学, 2019, 40(24): 241–245.
LIANG SL, LV DZ, ZHOU RH, *et al*. Determination and nutritional evaluation of five mineral elements in banana [J]. Food Science, 2019, 40(24): 241–245.

[26] 王彩霞, 刘宇, 袁文婷. 电感耦合等离子体发射光谱测定不同加工精度小麦粉中矿物质元素含量[J]. 中国食品卫生杂志, 2025, 37(4): 311–315.
WANG CX, LIU Y, YUAN WT. Determination of mineral elements in wheat flour with different processing precision by ICP-OES [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2025, 37(4): 311–315.

[27] MOTA C, NASCIMENTO AC, SANTOS M, *et al*. The effect of cooking methods on the mineral content of quinoa (*Chenopodium quinoa*), amaranth (*Amaranthus* sp.) and buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2016, 49: 25, 57–64.

[28] LUND D. Effects of heat processing on nutrients [M]. Dordrecht: Springer, 1988: 319–354.

[29] MISHRA AK, SINGH R, RAWAT H, *et al*. The influence of food matrix on the stability and bioavailability of phytochemicals: A comprehensive review [J]. Food and Humanity, 2024, 2: 100202.

[30] GANESH BT, MUTHUSAMY V, KATRAL A, *et al*. Unveiling the functionality of phytase activity in maize for enhanced bioavailability of minerals: A new avenue for nutritional security [J]. Journal of Cereal Science, 2025, 124: 104220.

[31] LISCIANI S, AGUZZI A, GABRIELLI P, *et al*. Effects of household cooking on mineral composition and retention in widespread Italian vegetables [J]. Nutrients, 2025, 17(3): 423.

[32] LIU K, ZHENG J, WANG X, *et al*. Effects of household cooking processes on mineral, vitamin B, and phytic acid contents and mineral bioaccessibility in rice [J]. Food Chemistry, 2019, 280: 59–64.

[33] KUMAR A, LAL MK, SAHOO U, *et al*. Combinatorial effect of heat processing and phytic acid on mineral bioavailability in rice grain [J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2: 100232.

[34] ROUSSEAU S, CELUS M, DUIJSENS D, *et al*. The impact of postharvest storage and cooking time on mineral bioaccessibility in common beans [J]. Food & Function, 2020, 11(9): 7584–7595.

[35] GALÁN MG, DRAGO SR. Food matrix and cooking process affect mineral bioaccessibility of enteral nutrition formulas [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(3): 515–521.

[36] ROUSSEAU S, KYOMUGASHO C, CELUS M, *et al*. Barriers impairing mineral bioaccessibility and bioavailability in plant-based foods and the perspectives for food processing [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(5): 826–843.

[37] MA J, YIN N, WANG P, *et al*. Bioaccessibility of essential elements and arsenic in brown rice, milled rice, and bran: Implications for consumer choices [J]. Food Research International, 2025, 214: 116651.

[38] 王晓玲, 陈婷茹, 刘智禹, 等. 嫩芽海带加工中不同工序对营养成分及矿物质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 119–126.
WANG XL, CHEN TR, LIU ZY, *et al*. Effects of different processes on nutritional compositions and minerals in the processing of tender Laminaria japonica [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 119–126.

(责任编辑: 冯东慧 安香玉)