大豆加工与铁吸收

从实验室到餐桌的科学之旅



Image by macrovector on magnific

作者 : 郑艳 , 王龙 , 王晓波 , 李东 , 李云泽；Email: zhengayn85910@163.com

背景介绍

大豆，被誉为“田里的肉”，富含优质蛋白质与多种矿物质。但它存在一个“营养悖论”：尽管大豆中铁元素含量丰富，人体对其吸收率却仅为 2%~3%，这就好比把那盒金币锁在了保险箱里，虽然他在，但你却拿不出来。那么，能否通过加工手段打破这一“锁闭”状态？我们通过对比不同大豆制品的植酸含量与铁吸收特性，开启了探索大豆加工奥秘的科学之旅。





【图 1】六磷酸肌醇的分子结构

一、大豆的核心物质——植酸

大豆——营养宝库还是吸收难题，导致这一问题的核心物质是植酸（分子结构为六磷酸肌醇，如图 1 所示）。其分子中含 6 个磷酸基团，可通过配位键与铁、锌和钙等金属离子紧密结合，形成稳定的螯合物。这些螯合物难以被人体消化道中的酶分解，就像将营养“锁”进了无法打开的保险箱，阻碍了矿物元素的吸收 [1]。

二、3 种大豆制品的“铁吸收能力”大比拼

为明确大豆加工方式对铁吸收的影响，我们选取生大豆粉、炒制熟大豆粉（小火炒制 30 min）和大豆蛋白粉 3 种样品，采用“磺基水杨酸——紫外分光光度法”测定植酸含量，同时通过体外模拟消化实验计算铁吸收率 [2]。各项测定数据如下表 1 所示。

表 1. 不同加工方式大豆制品的植酸含量与铁结合特性

	生豆粉	熟豆粉	蛋白粉 (豆制)
吸光度 1	1. 68	1. 76	1.94
吸光度 2	1. 67	1. 75	1. 94
吸光度 3	1. 68	1. 75	1. 94
平均值	1. 68	1.75	1. 94
与标准差值	0. 36	0.29	0.1
铁标液吸光度	2.04	2.04	2.04
对铁的吸收率	17.65%	14.22%	4. 90%

3 种制品的植酸含量呈阶梯式递减：生大豆粉植酸含量最高，炒制熟大豆粉次之，大豆蛋白粉最低。更关键的是，大豆蛋白粉的铁生物利用度显著提升，这不仅源于植酸含量降低，还与“植酸 - 蛋白复合物解离”有关——加工过程打破了两者的结合，让原本被束缚的铁元素得以释放，这就像把锁在保险箱里的金币数量虽然减少了，但却找到了打开了保险箱的钥匙 [3]。

三、加工魔法：热效应与解离效应的双重奏

不同加工方式通过两种核心机制——热效应与解离效应，改变植酸特性，进而影响对铁的吸收效果。

1. 热降解效应（炒制过程）：当大豆在 180 ℃高温下炒制时，植酸分子中的酯键发生断裂，生成低磷酸肌醇（IP4-IP5）。这类产物的磷酸基团数量减少，与金属离子的螯合能力下降 40%~50%，就像把保险箱的锁换成了一个不太牢固的锁 [4]。

2. 解离 - 洗脱效应（蛋白粉工艺）：大豆蛋白粉生产中的酸沉步骤，会使植酸与蛋白质间的静电作用减弱，导致两者形成的复合物解离。此时残留的植酸以松散结合态存在，与铁的结合能降低约 1000 倍，相当于彻底打开了“保险箱”。

模拟消化实验显示，大豆蛋白粉中植酸—Fe 复合物在胃酸环境中的解离速率，比生豆粉快 3.8 倍，进一步证明加工可加速铁元素的释放 [5]。这就像把金币从保险箱里取出来的速度大大加快了。

四、主题应用：从实验到生活的科学转化

这项研究不仅具有理论价值，更能为日常饮食与产业实践提供指导，具体体现在两个方面。

1. 育种新策略：培育“营养好吸收”的大豆

科学家通过分子育种技术，靶向编辑大豆中的 GmlPK1 和 GmITPK 两种基因调控植酸合成关键酶的表达。实验表明，基因编辑后的大豆品种，植酸含量显著降低，且不影响大豆产量与抗逆性，实现了“天生易吸收”的突破 [6]。

2. 膳食搭配：让大豆里的铁“活”起来

针对不同大豆制品的特性，可通过膳食搭配进一步提升铁吸收率：

生大豆粉：通过纳豆发酵（利用枯草杆菌产生的植酸酶）来降解植酸，使铁吸收率提升 150%~180%；搭配鲜榨橙汁，富含的维生素 C 能将难吸收的 Fe^{3+} 还原为易吸收的 Fe^{2+}，进一步促进吸收 [7]。

炒制熟大豆粉：与牛肉末混合制作豆饼（图 2），血红素铁与植酸亲和力低，可形成独立吸收通道，使整体铁吸收率提升 60%~75%[8]。

大豆蛋白粉：植酸残留量 <0.5%（图 3），且含游离氨基酸（如半胱氨酸），可促进铁吸收，适合作为婴幼儿辅食添加剂，每 100 g 辅食添加 5 g 蛋白粉即可满足婴幼儿每日的铁需求 [9]。

3. 特殊加工技术：让大豆更营养

发芽处理：大豆经 25 ℃浸泡 24 h，然后避光发芽 3 天，体内植酸酶活性被激活，可降解 40% 的植酸；同时维生素 C 含量增至 21 mg/100 g，铁元素转化为易吸收的 Fe^{2+} [10]。

酶解技术：在 37 ℃条件下，向大豆中添加植酸酶处理 45 min，可降解 56.6% 的植酸，同时释放 60% 以上的锌和钙，且不破坏大豆蛋白结构 [11]。

五、科学意义：重新认识大豆的价值

本研究从分子层面揭示了大豆中铁的生物利用机制，打破了传统“植酸有害论”，提出“植酸形态调控论”这不仅为大豆加工工艺的优化提供了理论依据，更为植物蛋白资源的高值化利用开辟了新途径。

这一结论为大豆加工工艺优化提供了理论支撑，例如食品企业可根据需求选择“炒制 + 酶解”组合工艺，在提升口感的同时最大化铁吸收效率；也为植物蛋白资源的高值化利用开辟新路径，助力解决全球范围内的植物性食品铁缺乏问题 [12]。这就像把一把锁着的宝藏箱，变成了一个随时可以取用宝藏的宝库！

六、结语：科学让饮食更健康

从发现“大豆铁难吸收”的问题，到通过加工技术突破吸收瓶颈，再到提出育种、膳食搭配的综合方案，科学正将营养学难题转化为改善健康的机遇。



【图 2】炒制熟大豆粉（图片拍摄于鄂尔多斯第一中学实验室）



【图 3】大豆蛋白粉（图片拍摄于鄂尔多斯第一中学实验室）

下次享用大豆制品时，或许你会意识到：一碗发酵纳豆、一杯搭配橙汁的豆浆和一块牛肉豆饼，背后都蕴含着“调控植酸形态、优化铁吸收”的科学逻辑。这正是科学的魅力——既解答我们对食物的好奇，又切实改善日常生活。

参考文献

[1] 赵镭, 庞敏, 尹京苑. 植酸对矿物质吸收的影响及降低其含量的方法研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 312-318.

[2] 贺为毅, 王葵, 彭晓赟, 等. 邻二氮菲分光光度法测定稻米中的植酸含量[J]. 湖南农业大学学报（自然科学版）, 2023, 49(3): 377-382.

[3] 王静, 李里特, 辰巳英三. 大豆蛋白-植酸复合物的形成与解离特性[J]. 中国农业科学, 2005, 38(11): 2309-2315.

[4] 张慧, 明建, 陈宗道. 热处理对大豆中植酸含量及体外铁生物利用率的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(8): 136-139.

[5] 刘艳, 谢笔钧, 孙智达. 体外模拟消化法评价食品中铁生物利用率的研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(19): 327-331.

[6] 李琦, 苏银银. 小麦纤维素中植酸含量测定方法的改进研究[J]. 河南预防医学杂志, 2017, 28(7): 508-511.

[7] 王竹, 杨月欣, 王国栋. 维生素C对大豆中铁吸收的促进作用[J]. 营养学报, 2003, 25(2): 165-168.

[8] 李颖, 张拥军, 欧仕益. 血红素铁与非血红素铁吸收机制及影响因素的研究进展[J]. 现代食品科技, 2015, 31(5): 342-348.

[9] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量（2013版）[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 215-220.

[10] 陈季旺, 孙庆杰, 夏文水. 大豆发芽过程中主要营养成分及植酸含量的变化[J]. 食品与发酵工业, 2002, 28(7): 45-48.

[11] 张君朝, 任传英, 黄文功. 米糠和豆粕中植酸的提取及含量的测定[J]. 黑龙江农业科学, 2009(2): 132-134.

[12] 联合国粮农组织. 植物性食品的营养强化策略[R]. 罗马: 联合国粮农组织, 2021.