

羊肚菌中 Ca、Fe、Zn 的体外消化吸收 及其存在形态的相关性

薛淑静, 杨德, 卢琪, 史德芳, 姚芬, 陈健, 李露*

(湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 国家食用菌加工技术研发分中心, 湖北省农业科技创新中心农产品加工分中心, 湖北武汉 430064)

摘要: 该研究为评估羊肚菌中 Ca、Fe、Zn 的消化、吸收, 通过体外消化模型和正辛醇吸收模型, 研究了羊肚菌盖粗粉和超微粉、羊肚菌柄粗粉和超微粉的 Ca、Fe、Zn 生物可及率及分配系数, 并和不同形态的溶出量进行了相关性分析。结果表明: 羊肚菌是很好的 Ca、Fe 和 Zn 食物来源, 羊肚菌盖粉中 Ca、Fe、Zn 平均总量分别为 268.77、467.71、757.84 $\mu\text{g/g}$, 生物可及率分别为 66.44%~75.09%、38.33%~46.17%、35.51%~40.53%; 羊肚菌柄粉中 Ca、Fe、Zn 平均总量分别为 290.25、1234.31、727.59 $\mu\text{g/g}$, 生物可及率分别为 68.81%~75.62%、27.70%~37.86%、37.25%~42.96%。Ca 可溶态、有机态、多糖态、蛋白态与体外胃、肠的生物可及率、分配系数相关; Fe 总量、可溶态、有机态与体外胃、肠的生物可及率、分配系数相关; 而 Zn 的体外消化、吸收和不同形态溶出量相关性不大。研究结果为羊肚菌产品的开发和微量元素摄入提供了一定的理论支撑。

关键词: 羊肚菌; 矿物质元素; 生物可利用性; 形态分析; 体外消化

文章编号: 1673-9078(2022)07-19-26

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.7.0973

In vitro Digestion and Absorption of Ca, Fe and Zn in *Morchella esculenta* and Their Correlations with Their Existing Forms

XUE Shujing, YANG De, LU Qi, SHI Defang, YAO Fen, CHEN Jian, LI Lu*

(Institute of Agro- Products Processing and Nuclear-Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, National R&D Center For Edible Fungi Processing, Agricultural Products Processing Subcenter of Hubei Agricultural Science & Technology Innovation Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: This study aimed to evaluate the digestion and absorption of Ca, Fe and Zn in *Morchella esculenta*. The bioaccessibilities and partition coefficients of Ca, Fe and Zn in the coarse powder and ultrafine powder from the caps of *Morchella esculenta* and the coarse powder and ultrafine powder from the stipes of *Morchella esculenta* were examined by using an *in vitro* digestion model and octanol absorption model. Correlation analysis was carried out with the dissolution amounts of different forms. The results showed that *Morchella esculenta* was a very good food source of Ca, Fe and Zn. The total contents of Ca, Fe and Zn in the caps of *Morchella esculenta* were 268.77, 467.71 and 757.84 $\mu\text{g/g}$, respectively, with the bioaccessibilities being 66.44%~75.09%, 38.33%~46.17% and 35.51%~40.53%, respectively. The total contents of Ca, Fe and Zn in the stipes of *Morchella esculenta* were 290.25, 1234.31 and 727.59 $\mu\text{g/g}$, respectively, with the bioaccessibilities being 68.81%~75.62%, 27.70%~37.86% and 37.25%~42.96%, respectively. The bioaccessibility and partition coefficient of Ca were correlated significantly with the contents of its soluble form, organic form, polysaccharide-binding form and protein-binding form. The bioaccessibility and partition coefficient of Fe were correlated significantly with its total content, and contents of its soluble form and organic form. But the

引文格式:

薛淑静,杨德,卢琪,等.羊肚菌中 Ca、Fe、Zn 的体外消化吸收及其存在形态的相关性[J].现代食品科技,2022,38(7):19-26

XUE Shujing, YANG De, LU Qi, et al. *In vitro* digestion and absorption of Ca, Fe and Zn in *Morchella esculenta* and their correlations with their existing forms [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(7): 19-26

收稿日期: 2021-08-30

基金项目: 湖北省技术创新重大专项 (2019ABA110); 湖北省农业科技创新中心资助项目 (2021-6520-000-001-033)

作者简介: 薛淑静 (1980-), 女, 副研究员, 博士生, 研究方向: 食品科学, Email: 37802227@qq.com

通讯作者: 李露 (1962-), 女, 正高职高级工程师, 研究方向: 食品化学, Email: 1070841800@qq.com

correlations among the *in vitro* digestion, absorption and dissolution amounts of different forms were not observed for Zn. The research results provide certain theoretical support for the development of *Morchella esculenta* products and the intake of trace elements.

Key words: *Morchella esculenta*; mineral; bioaccessibility; speciation analysis; *in vitro* digestion

羊肚菌，别名：蜂窝蘑、狼肚菜^[1]，为子囊菌亚门（Ascomycotina）盘菌纲（Pezizomycetes）盘菌目（Pezizales）羊肚菌科（Morchellaceae）羊肚菌属（*Morchella*）^[2]，是享誉世界的美味食用菌，具有较大的科学和经济价值^[3]。羊肚菌不仅可以作为食物，还可以用作药物治疗多种疾病^[4]，它具有抑菌^[5]、抗氧化^[6]、抗炎^[7]、提高免疫^[8]的作用，在中医上可以用于治疗消化不良、痰多、气短^[9]等症。人工栽培羊肚菌的技术日趋成熟^[10]，其中我国大田栽培技术处于世界领先地位，并得以广泛发展^[11]。

羊肚菌作为食用菌的一种，同样具有矿物质元素的富集能力^[12]，刘敏莉等^[13]检测了羊肚菌中无机元素含量，得出羊肚菌含有 20 种以上的无机元素，其中锌含量远高于一般蔬菜，为国际市场畅销的蔬菜蕨菜（干）含锌量的 1.6 倍，芦笋（干）的 2.6 倍。然而只是关注矿物质元素总含量是不够的^[14]。Malgorzata 等^[15]报道在食物质地、营养成分、硒总量和形态等诸多因素的影响下，食物中 Se 被摄食后只有部分能通过小肠黏膜，进入机体循环系统，被机体各组织器官进一步利用。食物经过消化后，元素从食物中释放到消化液中，是其吸收利用的前提条件^[16]。生物可及率（BA）是指食物经过消化后，释放到消化液中的元素含量占食物中此元素含量的比率，反映了此元素能够吸收利用的最大量^[17]。元素要达到细胞，需要透过多层细胞膜，正辛醇的结构与人体中的碳水化合物和脂肪类似，以正辛醇模拟细胞膜，用分配系数 K_{ow} 值来反应元素的体外吸收， K_{ow} 值越大，说明亲脂性越好，越利于人体吸收^[18]。元素的消化、吸收、活性与元素的形态密切相关^[14]。元素形态包括元素的同位素组成、电荷或氧化态、无机和有机态及生物大分子的结合态等^[19]。食用菌中有害重金属通过生物可及率，形态分析等来进行风险评估^[16]，然而 Ca、Fe、Zn 等对人体健康有益的矿物质元素的消化吸收很少有涉及。Menezes 等^[20]对比了牛肉、鸡肉、猪肉中 Ca、Cu、Fe、Mg、Zn 的生物可及率；本课题组研究了香菇中 Ca、Fe、Zn 的消化吸收利用^[21]，然而不同于香菇的袋装栽培，羊肚菌多采用大田栽培。食用菌中矿物质元素的累积受环境和品种不同影响显著^[22]。因此本文通过体外消化模型和正辛醇吸收模型，评估了羊肚菌不同部位（羊肚菌盖、羊肚菌柄）、不同状态（粗粉、超微粉）的 Ca、Fe、Zn 消化吸收，与元素的形态进行了相关

性分析，以期羊肚菌的矿物质元素吸收利用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

羊肚菌，襄阳大山健康食品股份有限公司提供；D-101 大孔吸附树脂，安徽三星树脂科技有限公司；Fe、Ca、Zn（1000 $\mu\text{g/mL}$ ）标准储备液，国家标准物质中心； α -淀粉酶（50 U/g）、胃蛋白酶（30000 U/g）、胰蛋白酶（4000 U/g）、脂肪酶（30000 U/g）、猪胆粉、氨基葡萄糖盐酸盐、尿素、尿酸、粘蛋白、牛血清白蛋白、葡萄糖醛酸，上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

SQW-100DF-超微粉碎机，济南易辰超微粉碎技术有限公司；TAS-990-原子吸收仪，广东天瑞仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料处理

分别将干燥的羊肚菌样品进行粉碎，过 60 目筛，取部分 60 目筛下物，得到羊肚菌盖粗粉（CC）、羊肚菌柄粗粉（SC）；分别将粗粉进行超微粉碎 10 min，得到羊肚菌盖超微粉（CU）、羊肚菌柄超微粉（SU）。

1.3.2 生物可及性

参照 SUN 等^[16]的仿生体外消化模型并适当调整。体外模拟唾液、胃液、十二指肠液、胆汁成分见表 1。消化过程和工艺参数见图 1。体外胃消化液（G）是口腔和胃消化后经 0.45 μm 的过滤液，体外胃肠消化液（GI）是口腔、胃、肠消化后经 0.45 μm 的过滤液。按照 1.3.5 测定 Ca、Fe、Zn 含量，并通过下式计算生物可及率。

$$BA = \frac{TK}{TZ} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

BA——Ca、Fe、Zn 的生物可及率，%；

TK——G 或 GI 中 Ca、Fe、Zn 的质量， μg ；

TZ——羊肚菌 Ca、Fe、Zn 的总质量， μg 。

1.3.3 体外吸收模拟

参照 LI 等^[23]的方法并适当调整。分别取不同样

品的 G、GI 1 mL，加入 5 mL 的正辛醇，震荡 5 h，分为水相和醇相，分别测 Ca、Fe、Zn 含量，并通过下式计算其分配系数 K_{ow} ：

$$K_{ow} = \frac{T_o}{T_w} \quad (2)$$

式中：

K_{ow} ——Ca、Fe、Zn 的分配系数；

T_o ——G、GI 分别通过体外吸收模拟，醇相中 Ca、Fe、

Zn 质量浓度， $\mu\text{g/mL}$ ；

T_w ——G、GI 分别通过体外吸收模拟，水相中 Ca、Fe、

Zn 质量浓度， $\mu\text{g/mL}$ 。

1.3.4 Ca、Fe、Zn 不同形态溶出量的测定

1.3.4.1 可溶态溶出量测定

按照陈安徽等^[24]的方法，并适当调整。分别取样品 5.0 g，以 1:60 比例加入超纯水，90 °C 水浴 3 h，离心（6000 r/min，15 min），取上清液，0.45 μm 微孔滤膜过滤上清液，按照 1.3.5 测定即为可溶态溶出量。

1.3.4.2 有机态溶出量测定

按照陈安徽等^[24]的方法，并适当调整。1.3.4.1 获

得的可溶态溶液 5.0 g，过大孔树脂，先后用 1% HNO_3 （V/V）和无水丙酮进行洗涤，各洗涤 2 h，收集丙酮洗出液，真空旋转蒸发浓缩后，按照 1.3.5 测定即为有机态溶出量。

1.3.4.3 多糖态溶出量测定

参考 Karadjova 等^[25]的方法，并适当调整。将 1.3.4.1 获得的可溶态溶液 5.0 g，加入 25 mL 无水乙醇混合均匀，离心（6000 r/min，15 min），所得沉淀用 5 mL 超纯水溶解后，按照 1.3.5 进行测定即为多糖态出容量。

1.3.4.4 蛋白态溶出量测定

同 1.3.4.3，将无水乙醇换成丙酮。

1.3.5 Ca、Fe、Zn 含量测定

参考薛淑静等^[21]方法，采用火焰原子吸收光谱法测定，样品 5.0 g 加 15 mL 硝酸和 3 mL 过氧化氢消化。消化条件为 80 °C、0.5 h，180 °C、1 h，250 °C、2 h，280 °C、0.5 h，待其溶液澄清透明则为消化完全。用 1% 的硝酸定容至 25 mL，Ca、Fe 和 Zn 的测定波长分别为 422.7、248.3 和 213.9 nm。

表 1 唾液、胃液、十二指肠液、胆汁组成成分表

Table 1 The components of the artificial saliva, gastric juice, duodenal juice, and bile

消化液种类	配方
唾液 pH=6.5±0.2	89.6 g/L KCl 10 mL; 20 g/L KSCN 10 mL; 88.8 g/L NaH_2PO_4 10 mL; 57 g/L Na_3PO_4 10 mL; 175.3 g/L NaCl 1.7 mL; 40 g/L NaOH 1.8 mL; 25 g/L 尿素 8 mL; 145 mg 淀粉酶; 15 mg 尿酸; 50 mg 粘液素
胃液 pH=1.07±0.07	175.3 g/L NaCl 15.7 mL; 88.8 g/L NaH_2PO_4 3.0 mL; 89.6 g/L KCl 9.2 mL; 22.2 g/L CaCl_2 18 mL; 30.6 g/L NH_4Cl 10 mL; 37% HCl 8.3 mL; 65 g/L 葡萄糖 10 mL; 2 g/L 葡萄糖醛酸 10 mL; 25 g/L 尿素 3.4 mL; 33 g/L 氨基葡萄糖盐酸盐 10 mL; 1 g 牛血清白蛋白; 1 g 胃蛋白酶; 3 g 黏蛋白
十二指肠液 pH=7.8±0.2	175.3 g/L NaCl 40 mL; 84.7 g/L NaHCO_3 40 mL; 8 g/L KH_2PO_4 10 mL; 89.6 g/L KCl 6.3 mL; 5 g/L MgCl_2 10 mL; 3% HCl 0.18 mL; 22.2 g/L CaCl_2 9 mL; 25 g/L 尿素 4 mL; 1 g 牛血清白蛋白; 3 g 胰液素; 0.5 g 脂肪酶
胆汁 pH=8.0±0.2	175.3 g/L NaCl 30 mL; 84.7 g/L NaHCO_3 68.3 mL; 89.6 g/L KCl 4.2 mL; 37% HCl 0.2 mL; 22.2 g/L CaCl_2 10 mL; 1.8 g 牛血清白蛋白; 6 g 胆汁

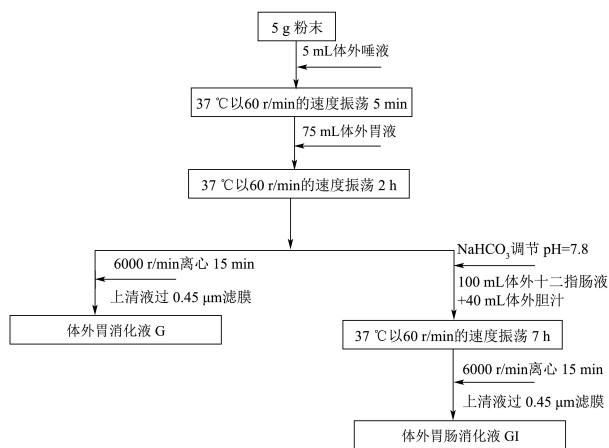


图 1 体外消化流程图

Fig.1 Schematic diagram of in vitro digestion

1.4 统计分析

采用 SPSS Statistics 20 和 Origin 2021 软件进行数据分析，所有试验数据均重复三次，结果以平均值±标准偏差（SD）表示；采用单因素方差分析，并以 Duncan 进行样本差异性分析， $p < 0.05$ 为显著性差异。相关分析采用 Pearson 法。

2 结果与分析

2.1 Ca、Fe 和 Zn 生物可及率

由图 2 可知，与体外胃液消化后的 BA 相比，经过体外胃肠消化后，羊肚菌 Ca、Fe、Zn 的 BA 均有显著性提高（ $p < 0.05$ ）。例如 CU 经过体外胃肠消化后，

Ca 的 BA 比经过体外胃消化后的 BA 提高了 5.67%, Fe 提高了 30.89%, Zn 提高了 18.92%。超微粉碎显著提高了 Ca、Fe、Zn 的 BA ($p<0.05$), 特别是羊肚菌柄粉 Fe 的 BA, 超微粉碎使其粗粉的 BA 提高了 36%。Ca、Fe、Zn 的 BA 差异较明显, Ca 的 BA 最高, 其次是 Fe 和 Zn; 就 Ca、Zn 来说, 羊肚菌柄的 BA 高于盖, 而 Fe, 是羊肚菌盖大于柄。

35.59%~42.83%。和其他种类的食品基质相比, 水果干中 Ca 的 BA 为 12.20%~52%, 香蕉干平均为 12.20%, 苹果干平均为 52%^[27], 牛肉中 Fe、Zn 的 BA 分别为 20%~30%, 10%~15%^[20], 从这点看, 羊肚菌是很好的 Ca、Fe 和 Zn 食物来源。

2.2 Ca、Fe 和 Zn 的体外吸收评价

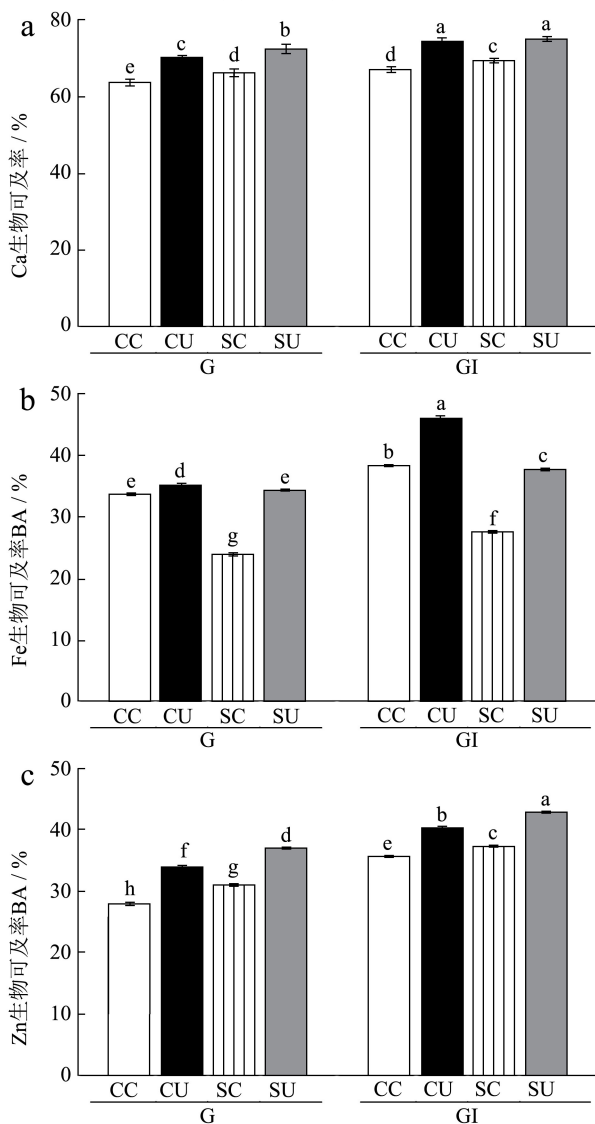


图2 羊肚菌粉 Ca、Fe 和 Zn 的生物可及率

Fig.2 Bioaccessible results of Ca, Fe and Zn in *Morchella esculenta* powders

注: 不同小写字母表示各样品间差异显著, ($p<0.05$); 下同。

食品基质中的膳食纤维、蛋白质、多酚等含量均会影响矿物质元素的生物可及率^[26]。不同食用菌矿物质元素的生物可及率不同, 和香菇对比, 羊肚菌、香菇中 Fe 的 BA 均偏低^[21]; 香菇中 Ca 的 BA 在 50%左右, 低于羊肚菌; 香菇中 Zn 的 BA 在 Ca、Fe、Zn 三元素中最高, 在 70%以上, 而羊肚菌中 Zn 的 BA 为

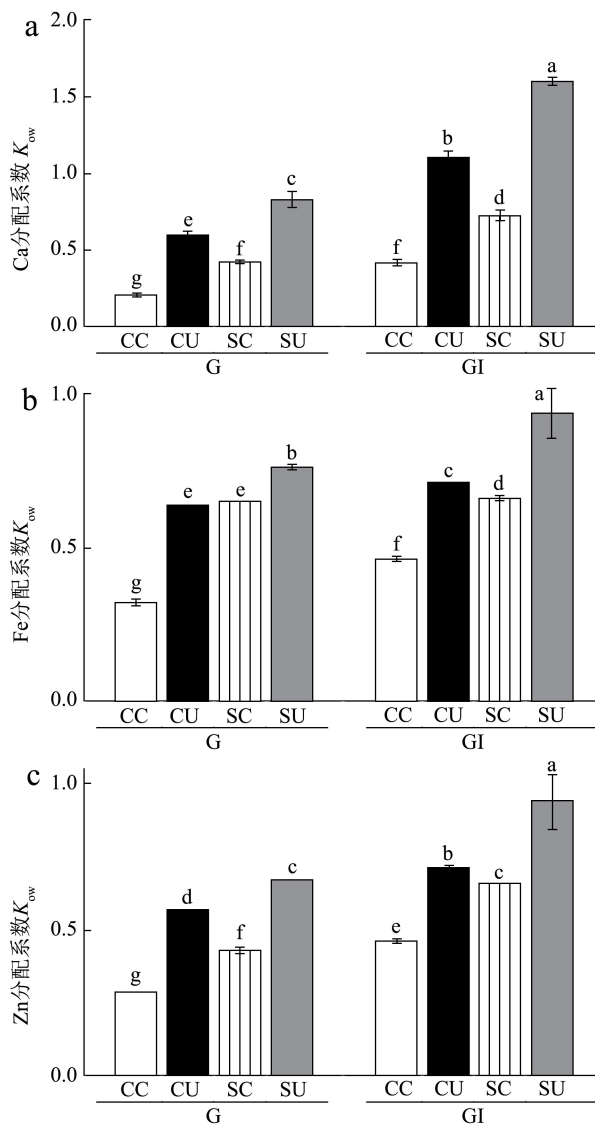


图3 羊肚菌粉 Ca、Fe、Zn 的分配系数

Fig.3 Partition coefficient results of Ca, Fe and Zn in *Morchella esculenta* powders

体外消化胃液和肠液中 Ca、Fe 和 Zn 的 K_{ow} 如图 3 所示。LI 等^[23]认为体外胃、肠消化阶段, pH 值会影响配位元素络合物的电荷性质和数量, 因此不同的消化部位, 其 K_{ow} 有很大的不同。体外胃、肠消化液中 Ca、Fe 和 Zn 的 K_{ow} 有显著不同, 总体来看, 体外肠均大于体外胃。超微粉的体外胃消化液、体外肠消化液中的 K_{ow} 均显著大于粗粉, 例如差异最大的是, CU 体外胃消化液中 Ca 的 K_{ow} 是 CC 的 2.95 倍; 差异最

小的是, SU 体外胃消化液中 Fe 的 K_{ow} 是 SC 的 1.17 倍, 这说明羊肚菌超微粉碎后的 Ca、Fe、Zn 亲脂度更高, 更利于人体的吸收。超微粉碎更利于 Ca 的吸收。对于粗粉来说, Fe 的 K_{ow} 最大, 说明 Fe 的吸收优于 Ca、Zn, 但对于超微粉来说, Ca 的 K_{ow} 最大, Ca 的吸收优于 Fe、Zn。另外羊肚菌柄的 K_{ow} 值均大于羊肚菌盖的 K_{ow} , 说明羊肚菌柄 Ca、Fe、Zn 的吸收好于羊肚菌盖。

2.3 Ca、Fe 和 Zn 的元素形态分析

元素的形态影响其吸收^[28]。为了进一步明确羊肚菌 Ca、Fe 和 Zn 的消化吸收特性, 对羊肚菌中 Ca、Fe 和 Zn 的元素形态进行了分析, 结果如表 2。从表中可以看出, 羊肚菌盖和柄中 Ca、Fe 和 Zn 的总量是不一样的。Ca、Fe 总量是菌柄大于菌盖, 而 Zn 总量是菌盖大于菌柄。矿物质元素在食用菌不同生长部位和生长时期含量是不相同的^[29]。Rudawska 等^[30]报道了波兰 8 种食用菌, Ca 含量菌柄大于菌盖, 这和本研究结果是一致的; Fe 含量菌盖大于菌柄^[30], 这和本研究结果不同。本研究采用的羊肚菌为大田栽培, 环境的 pH 值, 土壤中金属的浓度, 子实体的生长时间以及不同的食用菌品种、不同区域等因素都会影响食用菌中矿物质元素的含量^[31]。可溶态的 Ca、Fe 和 Zn 溶出量占其总量的比例差异很大, 分别为 56.35%~65.76%、15.88%~41.48%、21.06%~28.05%, 有机态 Ca、Fe 和 Zn 占可溶态比分别为 27.77%~45.87%、40.83%~51.48%、28.98%~55.36%, 多糖态和蛋白态 Ca、Fe 和 Zn 占有态比分别为 68.55%~92.70%、78.83%~92.33%、75.41%~88.07%, 这说明有机态中多

以蛋白态和多糖态形式存在, 这和陈琛等^[32]研究灰树花中铁的存在形态结论一致。除了 Zn 可溶态溶出量, 超微粉碎对 Ca、Fe、Zn 不同形态的溶出量均有显著提升 ($p<0.05$)。矿物质元素主要集中在食用菌的细胞壁, 当细胞壁上的结合点达到饱和时, 会进入细胞质和金属硫蛋白结合, 减轻金属离子对细胞的毒害作用^[16]。超微粉碎进一步破坏了细胞壁结构^[33], 可能促进了可溶性氨基酸、细胞壁多糖和金属硫蛋白等结合态金属离子的溶出。然而 Zn 可溶态溶出量的异常还需要进一步的研究。另外, 矿物质元素的存在状态与其药理作用有着密切联系。进一步对羊肚菌转化吸收矿物质元素的机理、矿物质元素与多糖、蛋白等功能因子之间的效应等的研究, 可为羊肚菌资源的利用提供更多的理论支持。

2.4 Ca、Fe 和 Zn 的消化吸收和不同形态溶出量的相关性分析

羊肚菌粉中 Ca、Fe 和 Zn 的体外消化吸收和不同形态溶出量的相关性如图 4, Ca 总量与体外胃、肠的 BA、 K_{ow} 低度相关, 与可溶态、有机态、多糖态、蛋白态显著相关; Fe 总量、可溶态、有机态与体外胃、肠的 BA、 K_{ow} 显著相关, 与多糖态、蛋白态没有相关性。而 Zn 的体外消化、吸收和不同形态溶出量均不相关。矿物质元素总量高, 并不代表着其生物可及性及生物利用度高^[34], 羊肚菌粉中 Fe、Zn 总量大于 Ca, 但 BA 却低于 Ca, 从相关性来看, Ca、Fe、Zn 的 BA、 K_{ow} 与总量的相关性各不相同。

表 2 羊肚菌粉中 Ca、Fe、Zn 不同形态溶出量 ($\mu\text{g/g}$)

Table 2 The dissolution contents of Ca, Fe and Zn in various species of *Morchella esculenta* powders

形态	总量	可溶态	有机态	多糖态	蛋白态	
Ca	CC	268.77 ^b ±4.43	151.46 ^d ±3.69	69.48 ^c ±0.18	26.62 ^b ±2.70	21.01 ^b ±1.73
	CU	268.77 ^b ±4.43	170.15 ^c ±2.04	74.53 ^b ±0.10	36.31 ^a ±2.70	32.78 ^a ±2.70
	SC	290.25 ^a ±2.56	181.77 ^b ±1.21	50.48 ^d ±0.34	21.38 ^b ±1.02	20.71 ^b ±2.70
	SU	290.25 ^a ±2.56	190.86 ^a ±3.54	81.41 ^a ±0.17	32.27 ^a ±4.45	31.81 ^a ±2.70
Fe	CC	467.71 ^B ±1.20	137.53 ^D ±0.28	66.26 ^D ±0.27	29.22 ^C ±1.00	31.96 ^C ±0.28
	CU	467.71 ^B ±1.20	194.01 ^C ±0.28	79.22 ^C ±0.21	30.49 ^C ±0.73	31.96 ^C ±0.73
	SC	1234.31 ^A ±1.83	196.03 ^B ±1.00	99.44 ^B ±0.46	38.41 ^B ±0.28	52.09 ^B ±0.48
	SU	1234.31 ^A ±1.83	286.15 ^A ±0.48	147.32 ^A ±0.16	72.90 ^A ±0.84	61.66 ^A ±0.48
Zn	CC	757.84 ^a ±1.47	193.26 ^b ±0.59	78.26 ^c ±0.20	30.69 ^b ±0.59	28.33 ^c ±0.38
	CU	757.84 ^a ±1.47	159.57 ^d ±0.59	88.34 ^a ±0.12	33.35 ^a ±0.38	44.45 ^a ±0.39
	SC	727.59 ^b ±0.97	204.06 ^a ±0.23	59.14 ^d ±0.05	18.47 ^d ±0.59	29.46 ^d ±0.39
	SU	727.59 ^b ±0.97	170.57 ^c ±0.23	79.60 ^b ±0.05	25.55 ^c ±0.02	39.39 ^b ±0.22

注: 同列相同字母表示差异不显著, ($p<0.05$)。

- characterization and immunomodulatory mechanisms of two novel glucans from *Morchella importuna* fruiting bodies [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 145-157
- [9] Pfister Donald, YING Jianzhe, MAO Xiaolan, et al. Icones of medicinal fungi from China [J]. Mycologia, 1990, 82(2): 285
- [10] 乔俊,支彩艳,陈志文,等.野生和人工栽培羊肚菌营养价值对比分析[J].食品与发酵工业,2021,47(5):211-216
- QIAO Jun, ZHI Caiyan, CHEN Zhiwen, et al. Comparative analysis of nutritional value between wild and cultivated *Morchella* [J]. Food and Fermentation, 2021, 47(5): 211-216
- [11] 乔俊,王焮兴,马琳静,等.中国北方地区羊肚菌暖棚人工栽培实践[J].中国食用菌,2021,40(2):32-36
- QIAO Jun, WANG Xinxing, MA Linjing, et al. Artificial cultivation practice of *Morchella* spp. in greenhouse in northern China [J]. Edible Fungi of China, 2021, 40(2): 32-36
- [12] Gebrelibanos Medhanye, Megersa Negussie, Tadesse Abi M. Levels of essential and non-essential metals in edible mushrooms cultivated in Haramaya, Ethiopia [J]. International Journal of Food Contamination, 2016, 3: 1-12
- [13] 刘敏莉,富力,董然,等.羊肚菌等四种野生食用菌无机元素的分析[J].中国野生植物资源,1994,2:42-44
- LIU Minli, FU Li, DONG Ran, et al. Mineral element contents in four species of wild growing edible mushrooms [J]. Chinese Wild Plant Resources, 1994, 2: 42-44
- [14] Lao Mireia, Companys Encarnació, WENG Liping, et al. Speciation of Zn, Fe, Ca and Mg in wine with the Donnan membrane technique [J]. Food Chemistry, 2018, 23: 1143-1150
- [15] Malgorzata Bodnar, Marzena Szczygłowska, Piotr Konieczka et al. Methods of selenium supplementation: bioavailability and determination of selenium compounds [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 56(1): 36-55
- [16] SUN Liping, LIU Gaoxing, YANG Meizhizi, et al. Bioaccessibility of cadmium in fresh and cooked *Agaricus blazei murill* assessed by *in vitro* biomimetic digestion system [J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(5): 1729-1733
- [17] Menezes E A, Oliveira A F, Franca C J, et al. Bioaccessibility of Ca, Cu, Fe, Mg, Zn, and crude protein in beef, pork and chicken after thermal processing [J]. Food Chemistry, 2018, 240(1): 75-83
- [18] 陈尚龙,陈安徽,刘辉,等.应用消化系统全仿生模型分析酸奶发酵对钙形态的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):289-294
- CHEN Shanglong, CHEN Anhui, LIU Hui, et al. Analysis of effect of yogurt fermentation process on calcium speciation in milk by all bionics models of digestive system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 289-294
- [19] Templeton D M, Ariese F, Cornelis R, et al. Guidelines for terms related to chemical speciation and fractionation of elements. Definitions, structural aspects, and methodological approaches [J]. Pure and Applied Chemistry, 2000, 72(8): 1453-1470
- [20] Menezes Eveline A, Oliveira Aline F, França Celia J, et al. Bioaccessibility of Ca, Cu, Fe, Mg, Zn, and crude protein in beef, pork and chicken after thermal processing [J]. Food Chemistry, 2018, 240: 75-83
- [21] 薛淑静,叶佳琪,杨德,等.超微粉碎促进香菇粉Ca, Fe, Zn的溶出及消化吸收[J].现代食品科技,2021,37(7):176-183
- XUE Shujing, YE Jiaqi, YANG De, et al. Ultrafine grinding improves the dissolution contents, digestion and absorption of Ca, Fe and Zn in *Lentinula edodes* powders [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 176-183
- [22] Sarikurku Cengiz, Yildiz Dilek, Akata Ilgaz, et al. Evaluation of the metal concentrations of wild mushroom species with their health risk assessments [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(17): 21437-21454
- [23] LI Shunxing, Deng Nansheng, ZHENG Fengying. Effect of digestive site acidity and compatibility on the species, lipopoly and bioavailability of iron, manganese and zinc in *Prunus persica* Batsch and *Carthamus tinctorius* [J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters, 2004, 14(2): 505-510
- [24] 陈安徽,巫永华,刘辉,等.利用超滤-原子吸收技术分析3种保健品中钙铁锌的存在形态[J].现代食品科技,2017,33(10): 254-261
- CHEN Anhui, WU Yonghua, LIU Hui, et al. Speciation analysis of calcium, iron, and zinc in three kinds of health-care food by ultrafiltration-atomic [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(10): 254-261
- [25] Karadjova Irina, Izgi Belgin, Gucer Seref. Fractionation and speciation of Cu, Zn and Fe in wine samples by atomic absorption spectrometry [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2002, 57(3): 581-590
- [26] Emanuël D, Heerdt G, Cidade M, et al. Use of *in vitro* digestion method and theoretical calculations to evaluate the bioaccessibility of Al, Cd, Fe and Zn in lettuce and cole by inductively coupled plasma mass spectrometry [J].

- Microchemical Journal, 2015, 119: 152-158
- [27] Mingroni T, Hamada J, Xavier A, et al. *In vitro* evaluation of Ca, Cu, and Mg bioaccessibility in fresh and dried fruits [J]. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2018, 8: 1-8
- [28] ZOU Haimin, ZHOU Chen, LI Yongxin, et al. Occurrence, toxicity, and speciation analysis of arsenic in edible mushrooms [J]. Food Chemistry, 2019, 281: 269-284
- [29] 于德洋,程显好,罗毅,等.大型真菌重金属富集的研究进展[J].中国食用菌,2011,30(1):10-13
- YU Deyang, CHENG Xianhao, LUO Yi, et al. Research progress on accumulation of heavy metal in macro-fungi [J]. Edible fungi of China, 2011, 30(1): 10-13
- [30] Rudawska Maria, Leski Tomasz. Macro- and microelement contents in fruiting bodies of wild mushrooms from the Notecka forest in west-central Poland [J]. Food Chemistry, 2005, 92(3): 499-506
- [31] Dowlati Mohsen, Sobhi Hamid Reza, Esrafil Ali, et al. Heavy metals content in edible mushrooms: a systematic review, meta-analysis and health risk assessment [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 527-535
- [32] 陈琛,苏珂,陈贵堂,等.灰树花中铁的存在形态分析[J].食品科学,2013,34(22):189-192
- CHEN Chen, SU Ke, CHEN Guitang, et al. Speciation of Iron in *Grifolafrondosa* [J]. Food Science, 2013, 34(22): 189-192
- [33] MENG Qinran, FAN Haoran, XU Dan, et al. Superfine grinding improves the bioaccessibility and antioxidant properties of *Dendrobium officinale* powders [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52: 1440-1451
- [34] Souza Laís A, Souza Thaís L, Santana Filipe B, et al. Determination and *in vitro* bioaccessibility evaluation of Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, P and Zn in linseed and sesame [J]. Microchemical Journal, 2018, 137: 8-14

(上接第 112 页)

- [14] 秦南南,夏俊芳,沈玉敏,等.胀袋酱油中产气微生物筛选鉴定及特性研究[J].中国调味品,2018,43(4):9-14
- QIN Nannan, XIA Junfang, SHEN Yumin, et al. Screening, identification and characteristics of gas-producing microorganisms in bagged soy sauce [J]. Chinese Condiments, 2018, 43(4): 9-14
- [15] 张小丽,蒋予箭,李锋.导致酱油胀袋微生物的分离与鉴定[J].食品与发酵工业,2014,40(7):51-55
- ZHANG Xiaoli, JIANG Yujian, LI Feng. Isolation and identification of microorganisms that cause soy sauce bag swelling [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(7): 51-55
- [16] 李慧,卢玉,钟鸣,等.土豆烧牛肉方便菜肴胀袋微生物分离鉴定及产气特性研究[J].粮油食品科技,2020,28(4):36-42
- LI Hui, LU Yu, ZHONG Ming, et al. Microbial isolation, identification and gas production characteristics of bulging bags in potato roast beef convenient dishes [J]. Cereals, Oils and Foodstuffs, 2020, 28(4): 36-42
- [17] 张怀敏,段国锋,李江涌,等.导致老陈醋产气微生物的分离和鉴定[J].山西农业大学学报(自然科学版),2016,36(8):594-598
- ZHANG Huaimin, DUAN Guofeng, LI Jiangyong et al. Isolation and identification of microorganisms that cause gas production in aged vinegar [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 36(8): 594-598
- [18] Setlow P. Observations on research with spores of Bacillales and Clostridiales species [J]. Journal of Applied Microbiology, 2019, 126(2): 348-358
- [19] 张园园,李苗云,赵莉君,等.真空包装食品中芽孢的危害及其控制研究进展[J].包装工程,2021,42(13):29-35
- ZHANG Yuanyuan, LI Miaoyun, ZHAO Lijun, et al. Research progress on the hazards and control of spores in vacuum packaged foods [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(13): 29-35