

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.06.008

尹鹏, 杜稳, 刘虎军. 玉米浆中抗营养因子和有毒物质的脱除及其资源化应用[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(6): 60-66.

YIN P, DU W, LIU H J. The removal of antinutritional factors and toxic substances from corn steep liquer and its utilization[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(6): 60-66.

玉米浆中抗营养因子和有毒物质的脱除及其资源化应用

尹 鹏, 杜 稳, 刘虎军✉

(国家粮食和物资储备局科学研究院 粮油加工研究所, 北京 100037)

摘 要: 玉米浆是玉米淀粉生产过程中产生的副产物, 产量大, 营养丰富, 含有大量的氨基酸、B族维生素和促生长因子, 在发酵工程、饲料添加剂和医药等领域发挥了重要作用。由于玉米浆中亚硫酸根离子残留、真菌毒素污染和渗透压高等问题, 严重限制了其在各领域中的应用, 造成大量浪费, 带来环境污染和经济损失。综述了玉米浆所含抗营养因子、植酸和亚硫酸盐的脱除、真菌毒素的污染与控制及玉米浆的资源化利用, 如在单细胞蛋白、氨基酸发酵、生物肥料等方面的应用最新进展, 旨在为玉米浆的综合利用提供思路。

关键词: 玉米浆; 植酸; 亚硫酸盐; 真菌毒素; 发酵; 生物肥料

中图分类号: TS201.4; S-3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)06-0060-07

The Removal of Antinutritional Factors and Toxic Substances from Corn Steep Liquer and Its Utilization

YIN Peng, DU Wen, LIU Hu-jun✉

(Institute of Cereal and Oil Science and Technology, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: Corn steep liquer, a byproduct of corn starch production, is highly productive and nutritious, containing a large quantity of amino acids, B vitamins and growth-promoting factors, which plays an important role in fermentation engineering, feed additives and pharmaceuticals. Due to sulfite residue, mycotoxin contamination and other issues, its application in various fields is seriously limited, resulting in resource waste, environmental pollution and economic loss. This paper reviews the techniques for removing antinutritional factors, phytic acid, and sulfites in corn syrup and the pollution, prevention of fungal toxins as well as the most recent application of it in single-cell protein, amino acid fermentation and biofertilizer, aiming to provide ideas for the comprehensive utilization of corn steep liquer and maximize its economic benefits.

Key words: corn steep liquer; phytic acid; sulfite; mycotoxins; fermentation; biological fertilizers

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (ZX2236)

Supported by: Fundamental Research Funds of the Central Research Institutes (No. ZX2236)

作者简介: 尹鹏, 男, 1994年出生, 硕士, 助理研究员, 研究方向为粮油副产物高值化利用和真菌毒素防控。E-mail: yp@ags.ac.cn

通讯作者: 刘虎军, 男, 1986年出生, 博士, 助理研究员, 研究方向为真菌毒素污染粮食的安全合理利用。E-mail: lhj@ags.ac.cn

玉米是我国三大粮食作物之一，2021 年产量达到 2.72 亿 t，消费 2.59 亿 t，其中饲用玉米为 59.5%，工业用玉米淀粉加工约 20.6%^[1-2]。玉米浆（Corn steep liquor, CSL）是玉米淀粉制备过程中产生的副产物，经玉米浸泡水浓缩而成，年产量达 340 万 t^[3]，带有芳香气味，因此常用来作为禽畜诱食添加剂。玉米浆中含有大量的营养物质，包括蛋白质、脂类、碳水化合物、维生素和矿物质等组分^[4]，但也存在大量的抗营养成分和有毒物质。目前，符合卫生标准的玉米浆大多直接当作饲料廉价出售，缺乏高附加值开发，然而相当多的玉米浆由于需经污水处理被临时随意储存，造成资源浪费甚至环境污染^[5]。本文就玉米浆的营养组成、抗营养成分和有毒物质的脱除方

法进行分析，并就玉米浆的资源化利用进行综述和思考，以期为玉米浆变废为宝、发挥更大价值提供思路。

1 玉米浆的营养组成

玉米湿法加工过程中可以获得玉米淀粉、玉米蛋白粉、玉米油等产品以及玉米浆、玉米皮和玉米胚芽粕等副产品（见图 1）。玉米经 0.15%~0.35% 的亚硫酸浸泡 48~72 h，所得浸泡水的干物质为 6%~7%，进一步浓缩干物质含量到 50% 左右的粘稠液即是玉米浆。玉米浆干基中粗蛋白含量为 45%，还原糖含量为 10%，维生素含量为 2%，乳酸含量为 18%，富含 B 族维生素和组成蛋白质的 20 种氨基酸^[6]。

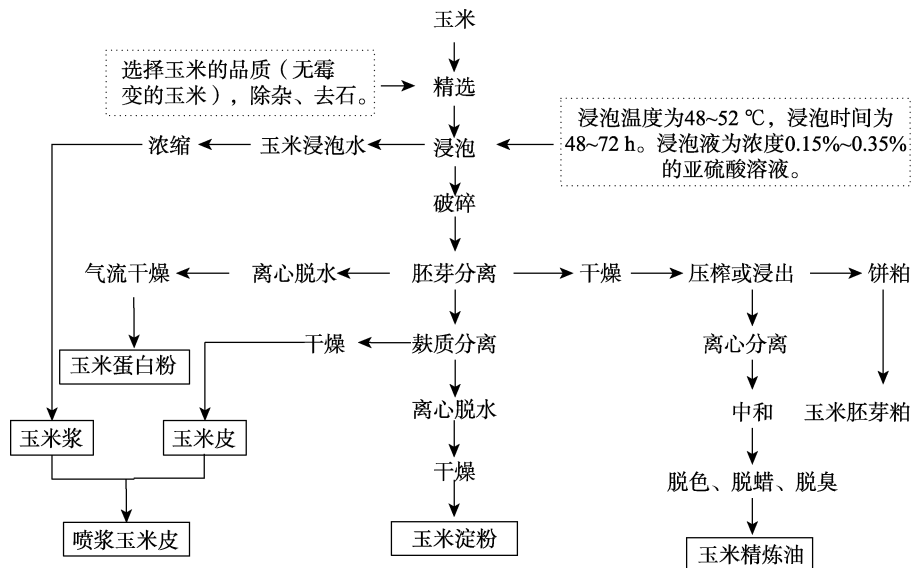


图 1 玉米湿法加工工艺流程

Fig.1 Wet processing flow of maize

2 玉米浆抗营养因子和有毒物质的分析及脱除方法

玉米浆营养丰富，可用作禽畜饲用的植物蛋白，但玉米浆中也存在较多抗营养因子和有毒物质，包括植酸（肌醇六磷酸）、亚硫酸盐和真菌毒素等，造成玉米浆难以大量饲用。植酸对蛋白质和矿物质都具有亲和性，在饲料中会抑制禽畜对蛋白和必须矿物元素等物质的消化吸收，抑制禽畜胃肠中等消化酶活性，增加粪便中干物质、磷和氮的排出量^[7]，造成饲料中营养物质转化效

率降低。亚硫酸盐残留也是玉米浆难以大量饲用的重要原因，摄入超标亚硫酸盐会破坏体内维生素 B₁ 辅酶，会致使禽畜代谢紊乱，长期摄入也会造成维生素 A、D 和 E 缺乏症，影响动物生长、繁殖和泌乳^[8]；而且亚硫酸盐还具有强还原性^[9]，会破坏蛋白中的二硫键，严重时造成动物中毒死亡。除此之外，真菌毒素残留也是影响玉米浆使用的关键因素，会造成急性和慢性中毒，致畸致癌等，长期摄入对禽畜的危害极大，沿着食物链最终威胁人类健康和食品安全^[10]。龚阿琼^[11]检测了 63 种市场上的原料和饲料中真菌毒素含量，发

现在玉米加工副产物中, 脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (Deoxynivalenol, DON) 和玉米赤霉烯酮 (Zearalenone, ZEN) 超标率最高。

2.1 玉米浆中植酸的脱除

目前, 消除植酸的方法主要是植酸酶解或植酸钙提取^[12]。植酸酶可以有效分解植酸成为一磷酸肌醇, 解决植酸抗营养因子的问题^[13], 作为一种饲料添加剂也可有效抑制植酸的亲和力, 具有广泛的应用价值。在含玉米浆饲料中添加植酸酶饲喂动物, 与对照组相比, 实验组 Ca、P 的利用率均显著提升, 蛋白和脂肪的利用率也大幅提高^[14]。植酸钙, 又名菲汀, 是肌醇六磷酸酯钙镁盐, 被广泛应用于医药领域和食品防腐领域, 玉米浆中植酸钙的含量为 0.075~0.09 g/mL, 采用石灰乳可沉淀获得沉淀粗品, 调整 pH 后获得纯品植酸钙^[15]。毛梅芬^[16]设计了一套玉米浆提取植酸钙的工艺, 结果表明待处理的玉米浆加入适量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 NaOH 可以得到纯度高于 70% 的植酸钙。

2.2 玉米浆中亚硫酸盐的脱除

食品中亚硫酸盐脱除的方法很多, 如离子交换法、化学氧化法和酶法。由于玉米浆产量很大, 利用上述方法脱硫, 饲料成本会大幅上升, 而且营养流失严重, 而且会有新的物质加入, 因此, 这些方法均不适合玉米浆规模化脱硫^[17]。目前生物脱硫已取得较大进展, 生物体内都含有亚硫酸盐氧化酶 (SO), 它们的主要作用是催化机体内的硫元素循环代谢。动物的 SO 位于细胞的线粒体内, 可将半胱氨酸和甲硫氨酸等硫代谢产物中的亚硫酸盐转化成硫酸盐, 植物的 SO 是一种过氧化物酶, 位于叶绿体内, 主要作用是同化亚硫酸盐, 即将亚硫酸盐转化成无毒的硫酸盐, 促进机体利用有机亚硫酸盐合成半胱氨酸^[18]。在玉米浆的资源化中, 利用酿酒酵母对其中亚硫酸盐进行脱除是一个切实可行的方法^[17], 一方面酿酒酵母可以亚硫酸盐合成含硫氨基酸及其衍生物, 另一方面提升玉米浆的附加值转化为酵母蛋白。据报道, 酿酒酵母利用亚硫酸盐合成含硫氨基酸的过程较为复杂, 可概括为: 亚硫酸盐在亚硫酸还原酶多酶复合体作用下, 被还原型辅酶 II (NADPH2)

还原为 S^{2-} , 在硫化氢酶的催化作用下, S^{2-} 与 O-乙酰-丝氨酸 (O-AS) 和 O-乙酰-高丝氨酸 (O-AH) 发生螯合反应, 进而生成半胱氨酸和甲硫氨酸, 用其进行生物脱硫, 前景可观^[19]。

2.3 玉米浆中真菌毒素污染及控制

玉米浆中 DON 和 ZEN 是影响其直接饲用的重要因素, 根据韩国一项研究, 玉米浆中 DON 平均污染程度为 7.417 $\mu\text{g/g}$ ^[20], 严重超过卫生饲料标准。DON 和 ZEN 广泛存在于受到污染玉米等粮食作物和副产物, 带来很大的安全风险^[21]。在欧盟, 谷物原料和食品都规定了包括 DON 和 ZEN 在内的真菌毒素的最高限量。我国食品中 DON 不超过 1 000 $\mu\text{g/kg}$, ZEN 不超过 60 $\mu\text{g/kg}$, 饲料原料和饲料产品也分别做了限量^[22-23]。目前, 饲料中真菌毒素防控主要有两种: 一种是利用活性物质作为饲料添加剂来预防和缓解毒素对禽畜的毒性效应; 另一种是即通过物理、化学、生物等技术手段将受污染饲料中的真菌毒素进行脱毒减毒处理, 从饲料源头进行防控, 其中生物法备受关注。

DON 的毒理机制主要包括: 诱导细胞死亡和抑制细胞增殖、诱发猪肠道炎症和免疫毒性、诱发神经毒性和生殖毒性^[24]。生物法防控 DON 毒性的保护机制主要是缓解氧化应激和内质网应激、增强免疫力、抑制炎症和调节肠道菌群等, 而益生菌不仅可以调节肠道菌群稳态, 还能调节宿主免疫系统和增强肠道屏障功能^[25]。因此, 益生菌在缓解 DON 对机体毒性方面备受关注。有研究报道, 鼠李糖乳酸杆菌 *Lactobacillus rhamnosus* RC007 能缓解猪肠道外植体的促炎效应和肠道通透性的改变^[26], 鼠李糖 LGG 菌株可以促进小鼠肠道菌群产生丁酸, 缓解 DON 诱发的内质网应激和肠道损伤^[27]。除了乳酸菌, 德沃氏菌也被报道能够有效降解 DON, 能够有效缓解 DON 对猪的生长抑制, 提高仔猪体重、采食量、免疫功能等^[28]。有研究表明, 猴头菇多糖具有抗氧化活性, 可抑制猪肠道上皮细胞 IPEC-J2 细胞系产生 ROS (Reactive oxygen species) 介导的氧化应激进而表现的细胞毒性和抑制细胞凋亡^[29], 达到抑制 DON 诱导的氧化应激反应的效果。在玉米浆的

DON 脱毒中, Ahmed Shalapy 等^[30]首次利用负载钙的海藻酸盐/羧甲基纤维素钠复合体对玉米浆进行了研究, 结果显示, 最佳吸附效果 3.6 $\mu\text{g/g}$, 并且该材料不能降解和吸附其它真菌毒素, 可以重复使用, 表现出巨大的应该用潜力。

ZEN 具有与 17- β 雌二醇相似的结构, 可竞争性雌激素受体结合, 破坏动物的生殖系统, 同时具有免疫毒性和致癌性^[31], 诱发动物的肝脏、肾脏损伤。家猪中毒时, 体内含有过高水平的雌激素, 导致神经系统过于亢奋, 从而引起脏器中形成大量出血点, 导致动物发生突然死亡^[32]。目前, 对于 ZEN 的脱除主要是物理吸附法和生物降解法。常见的吸附剂有活性炭、硅铝酸盐类等, 这些吸附剂对 ZEN 有一定的吸附性, 但影响饲料的外观, 对后期销售产生影响。有研究表明, 葡甘露聚糖作为一种高分子多糖, 对 ZEN 有一定的吸附效果^[33], 不会影响动物的正常营养吸收, 可作为饲料添加剂进行饲喂。微生物降解中, 通过分泌的酶对 ZEN 进行转化, 生成低毒或无毒的产物, 因而 ZEN 降解菌株的筛选和降解酶的挖掘一直是生物方法脱除 ZEN 的研究热点^[34]。Kakeya 和 Takahashi-Ando 等筛选得到一株粉红螺旋聚孢霉 (*Clonostachys rosea*) IFO7063 能够将 ZEN 转化成无雌激素活性的降解产物, 并确定降解过程的关键酶为内酯水解酶 ZHD101^[35]。段锦等^[36]从发霉饲料、动物粪便等样品分离鉴定出的降解 ZEN 的枯草芽孢杆菌和解淀粉芽孢杆菌能够缓解 ZEN 中毒引起的小鼠脏器损伤。潘药银^[37]筛选到一株酵母菌 *Candida. parapsilosis* PRG501 可以定向催化 ZEN 还原为低雌激素毒性的产物 β -ZOL。陈伟^[38]研究了降解酶 ZHD101 对玉米浆中的 ZEN 脱除效果, 3 h 可以降解率可达 17.1%, 为在玉米浆中 ZEN 的脱除提供一定的指导意义。

3 玉米浆的资源化利用

3.1 玉米浆作为氮源的生物发酵

单细胞蛋白 (single-cell protein, SCP), 也叫菌体蛋白, 常作为饲用的单细胞蛋白有产朊假丝酵母蛋白、酿酒酵母蛋白等^[39], 富含赖氨酸、蛋氨酸和色氨酸等多种氨基酸, 同时有些酵母菌

本身也属于益生菌。为了降低单细胞蛋白生产成本, 玉米浆作为最为廉价的有机氮源具有很大的应用前景, 李婷婷^[40]等基于响应面优化了酿酒酵母培养体系, 最佳发酵条件下, 玉米浆作为唯一有机氮源, 生物量可达到常规酵母浸出粉培养体系的 5.27 倍, 可以有效替代豆类蛋白, 其效果优于豆粕蛋白。

在氨基酸发酵中, 可替代或者降低豆粕水解液、酵母粉、毛发粉等氮源的使用, 更具优势的是玉米浆中含有丰富 B 族维生素, 且玉米浆中生物素和限制性氨基酸对多种氨基酸的发酵影响很大^[41]。李剑^[42]等优化了德氏乳杆菌 (*Lactobacillus delbruecki*) 发酵培养, 发现玉米浆对其发酵及产酸有明显促进作用。在谷氨酸发酵中, 谷氨酸发酵采用生物缺陷型和温度敏感型菌种, 这两种菌发酵工艺差别很大, 玉米浆含量过高或是过低均不利于谷氨酸的合成^[43]。王晓丽^[44]等通过对谷氨酸摇瓶发酵培养的优化发现, 玉米浆/糖蜜为 4:2 时, 有利于发酵谷氨酸的积累。L-苏氨酸的发酵中, 氮源主要是酵母粉、硫酸铵和玉米浆, 不同工艺和菌种条件下, 发酵效果均不相同, 实验结果表明玉米浆对菌体干重的影响仅次于牛肉浸膏, 且远远高于无机氮源, 说明玉米浆对菌株细胞生长非常有利^[45]。

3.2 生物肥料

随着生物技术的发展, 越来越多的农产品加工废弃物 (副产物) 得到利用, 包括生物质能源开发、二次提取以及生物肥料开发。生物肥料由特定功能微生物发酵而成, 含有大量的有益微生物和大量活性物质^[46]。由于玉米浆价廉、呈酸性且含有大量含氮有机物、无机盐的特点, 可以直接作为苏打碱土地改良的肥料。段宏美^[47]等利用玉米浆及配合其它有机物料对苏打碱土改良效果进行了实验, 结果表明, 适量玉米浆的施入有效提升了玉米的产量, 土壤的胡敏酸 (HA) 的脂族性增强, 降低了土壤的 pH 和碱化度。Salam^[48]等利用玉米浆对土壤碳氢化合物降解和土壤微生物群落结构的影响进行了评估, 结果表明, 玉米浆具有乙醛脱氢酶的超家族分解酶, 能够促进脂肪族和芳香族馏分的降解, 且通过宏基因组揭示

了生物群落的差异性，证明了玉米浆组是一种潜在的碳氢化合物污染土壤的修复资源。

玉米浆也可以作为基质，经微生物发酵后施入土壤可有效改善土壤环境，同时降低菌肥生产成本。玉米浆的复杂性要求菌种须具有高抗逆性，不同菌种差异极大。有研究表明地衣芽孢杆菌是开发多功能生物肥料的理想菌株，它能产生吲哚乙酸（Indole Acetic Acid, IAA）、铁螯合剂、溶解磷酸盐，并具有促进植物生长的特性^[49]，枯草芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌共生能够产生抗菌物质，能够抑制多种植物病原菌，与共生的有益菌能够长期共存，使土壤微生态平衡^[50]；黑曲霉能够解磷、解钾，同时可以抑制其它有害真菌的生长^[51]，抑制土壤的有害菌群及代谢产物的生成。任晓洁^[52]等利用 3 种植物根系促生菌（PGPMs）在玉米浆中共生发酵，通过补料流加工业肥料结晶糖母液评估 3 种菌高密度发酵的可行性，实现发酵体系总生物量的提升达到 2.17×10^{10} CFU/mL，52 h 可溶性磷的利用率提高了近 50%，对低成本生物肥料的开发与生产提供了一种新的思路。

4 展望

综上所述，玉米浆含有大量营养物质，可作为最廉价的有机氮源，按其中的营养成分应用于饲料行业，可显著增加其使用价值，提升经济效益。由于含有较多盐分尤其亚硫酸盐、抗营养成分以及真菌毒素等成分，玉米浆规模化应用存在较多的难点。因此，提出解决玉米浆使用主要途径：第一，生物发酵中用于生产高附加值的单细胞蛋白，例如酵母蛋白，能够将玉米浆中的营养物质转化为附加值更高的酵母蛋白，且可减轻玉米浆废水处理的压力。但由于玉米浆成分复杂、强酸性并含有真菌毒素，因此，对菌株的抗逆性要求较高；第二，玉米浆经过脱盐^[14]和脱毒处理后直接应用于禽畜饲料添加，目前玉米浆中真菌毒素的脱除研究较多，有望通过这种技术手段降低成本，提升玉米浆的附加值，实现经济效益的增收。

参考文献：

[1] 马文峰. 适度发展玉米深加工产业，促进玉米产业链高质量

发展[J]. 粮食加工, 2023, 48(1): 1-6.

MA W. Moderately develop the corn deep processing industry and promote high-quality development of the corn industry chain[J]. Grain processing, 2023, 48 (1): 1-6.

[2] 刘宽博, 施晶晶, 何贝贝, 等. 玉米皮及发酵玉米皮的营养特性及研究进展[J]. 饲料工业, 2023, 44(3): 17-22.

LIU K, SHI J, HE B, et al. The nutritional characteristics and research progress of corn husk and fermented corn husk[J]. Feed Industry, 2023, 44 (3): 17-22.

[3] 任晓洁, 班恒, 贺壮壮, 等. 生物转化玉米浆生产生物菌肥的共生发酵特性[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 205-213.

REN X, BAN H, HE Z, et al. Symbiotic fermentation characteristics of biotransformation corn slurry to produce bio bacterial fertilizer[J]. Journal of agricultural engineering, 2022, 38 (17): 205-213.

[4] 唐堂, 王琪, 周卫强, 等. 以玉米浆为主要氮源的 PHA 发酵工艺研究及优化[J]. 当代化工, 2022, 51(10): 2381-2386.

TANG T, WANG Q, ZHOU W, et al. Research and optimization of PHA fermentation process using corn syrup as the main nitrogen source[J]. Contemporary Chemical, 2022, 51(10): 2381-2386.

[5] 雷永伟, 洪元芳, 安艳霞, 等. 玉米精深加工及副产物的开发与综合应用[J]. 粮食与饲料工业, 2022(6): 33-36+39.

LEI Y, HONG Y, AN Y, et al. Development and comprehensive application of corn deep processing and byproducts[J]. Grain and Feed Industry, 2022 (6): 33-36+39.

[6] KEMENG Z, JIAN Y, YAOHONG M, et al. Corn steep liquor: green biological resources for bioindustry. applied biochemistry and biotechnology[J]. 2022(194):3280-3295.

[7] ABBASI F, FAKHUR-UN-NISA T, LIU J B, et al. Low digestibility of phytate phosphorus, their impacts on the environment, and phytase opportunity in the poultry industry[J]. 2019, 26(10): 9469-9479.

[8] 陈健敏, 冉梦楠, 王美霞. 亚硫酸盐在食品中的研究进展[J]. 核农学报, 2021, 35(7): 1639-1647.

CHEN J, RAN M, WANG M. Research progress of sulfite in food[J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2021, 35(7): 1639-1647.

[9] 李海燕. 玉米浆及其副产物的制备与应用[D]. 湖北工业大学, 2013.

LI H. Preparation and application of corn syrup and its by-products[D]. Hubei University of Technology, 2013.

[10] HAQUE A, WANG Y H, SHEN Z Q, et al. Mycotoxin contamination and control strategy in human, domestic animal and poultry: a review[J]. Microbial Pathogenesis, 2020, 142: 104095.

[11] 龚阿琼, 邓娟娟, 郑豆豆, 等. 2018 年上半年原料及饲料毒素检测分析[J]. 中国饲料, 2018(17): 90-92.

GONG A, DENG J, ZHENG D, et al. Analysis of toxin detection in raw materials and feed in the first half of 2018[J]. China Feed, 2018 (17): 90-92.

- [12] 潘丽军, 周俊, 姜绍通, 等. 菜籽粕植酸提取和分离蛋白的制备[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 370-375.
 PAN L, ZHOU J, JIANG S, et al. Extraction of phytic acid from rapeseed meal and preparation of protein isolates[J]. Journal of agricultural engineering, 2011, 27(4): 370-375.
- [13] 白东清, 乔秀亭, 魏东, 等. 植酸酶对鲤钙磷等营养物质利用率的影响[J]. 天津农学院学报, 2003(1): 6-10.
 BAI D, QIAO X, WEI D, et al. The effect of phytase on the utilization efficiency of nutrients such as calcium and phosphorus in carp[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2003(1): 6-10.
- [14] 山东省鲁洲食品集团有限公司. 一种玉米浸泡水除盐方法. 202211600045.3[P]. 2023.01.31.
 Shandong Luzhou Food Group Co., Ltd A Method for Removing Salt from Corn Soaking Water. 202211600045.3[P]. 2023.01.31.
- [15] 白东清, 乔秀亭, 魏东, 等. 植酸酶对鲤钙磷等营养物质利用率的影响[J]. 天津农学院学报, 2003(1): 6-10.
 BAI D, QIAO X, WEI D, et al. The effect of phytase on the utilization efficiency of nutrients such as calcium and phosphorus in carp[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2003(1): 6-10.
- [16] 毛梅芬. 玉米淀粉废水的绿色处理工艺研究[J]. 现代农业科技, 2020, 772(14): 166.
 MAO M. Research on green treatment technology of corn starch wastewater[J]. Modern Agricultural Technology, 2020, 772(14): 166.
- [17] 李红宇, 许丽. 玉米浆的营养特点及应用[J]. 饲料研究, 2017(19): 5-9+18.
 LI H, XU L. The nutritional characteristics and application of corn syrup[J]. Feed Research, 2017(19): 5-9+18.
- [18] 陈志刚. 酿酒酵母中硫代谢的研究[D]. 山东大学, 2018.
 CHEN Z. Research on sulfur metabolism in brewing yeast[D]. Shandong University, 2018.
- [19] 马捷, 刘延琳. 葡萄酒中重要挥发性硫化物的代谢及基因调控[J]. 微生物学报, 2011, 51(1): 14-20.
 MA J, LIU Y. Metabolism and gene regulation of important volatile sulfides in wine[J]. Journal of Microbiology, 2011, 51(1): 14-20.
- [20] PARK J, KIM D H, MOON J Y, et al. Distribution analysis of twelve mycotoxins in corn and corn-derived products by LC-MS/MS to evaluate the carry-over ratio during wet-milling[J]. Toxins, 2018, 10, 319.
- [21] LI M, YANG C, MAO Y, et al. Zearalenone contamination in corn, corn products, and swine feed in China in 2016-2018 as assessed by magnetic bead immunoassay[J]. Toxins, 2019, 11(8).
- [22] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品中真菌毒素限量: GB 2761—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 5.
 National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration Limit of mycotoxins in food: GB 2761—2017[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2017:5.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料卫生标准: GB 13078—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 4.
 General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration Feed hygiene standard: GB 13078—2017[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2017: 4.
- [24] KOWALSKA K, KOZIEL M J, HABROWSKA G, et al. Deoxynivalenol induces apoptosis and autophagy in human prostate epithelial cells via PI3K/Akt signaling pathway[J]. Archives of toxicology, 2021, 96(1).
- [25] REN C, DOKTER-FOKKENS J, LOZANO S F, et al. Lactic acid bacteria may impact intestinal barrier function by modulating goblet cells[J]. Journal of neurosurgical sciences, 2018(6): 62.
- [26] GARCIA G, PAYROS D, PINTON P, et al. Intestinal toxicity of Deoxynivalenol is limited by Lactobacillus rhamnosus RC007 in pig jejunum explants[J]. 2018, 92: 983-993.
- [27] LIN R, SUN Y, MU P, et al. Lactobacillus rhamnosus GG supplementation modulates the gut microbiota to promote butyrate production, protecting against deoxynivalenol exposure in nude mice[J]. Biochemical Pharmacology, 2020, 175: 113868.
- [28] LI X, GUO Y, ZHAO L, et al. Protective effects of Devosia sp. ANSB714 on growth performance, immunity function, antioxidant capacity and tissue residues in growing-finishing pigs fed with deoxynivalenol contaminated diets[J]. Food and Chemical Toxicology, 2018, 121: 246-251.
- [29] GU X, GUO W, ZHAO Y, et al. Deoxynivalenol-induced cytotoxicity and apoptosis in IPEC-J2 cells through the activation of autophagy by inhibiting PI3K-AKT-mTOR signaling pathway[J]. Acs Omega, 2019, 4(19): 18478-18486.
- [30] AHMED S, SHUANGQING Z, CHENXI Z, et al. Adsorption of Deoxynivalenol (DON) from Corn Steep Liquor (CSL) by the microsphere adsorbent SA/CMC loaded with calcium[J]. Toxins, 2020, 12, 208.
- [31] MARTYNA, PAJEWSKA, MARIUSZ, et al. The determination of zearalenone and its major metabolites in endometrial cancer tissues[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2018.
- [32] 樊彦敏. 玉米赤霉烯酮的毒性作用及防治[J]. 农业开发与装备, 2018(10): 197+202.
 FAN Y. Toxic effects and prevention of zearalenone[J]. Agricultural Development and Equipment, 2018(10): 197+202.
- [33] 马小明, 朱连勤, 朱风华, 等. 玉米赤霉烯酮饲料中添加酯化葡甘露聚糖对小鼠生化指标的影响[J]. 饲料研究, 2009(3): 5-7+19.
 MA X, ZHU L, ZHU F, et al. The effect of adding esterified glucomannan to zearalenone feed on biochemical indicators in mice[J]. Feed Research, 2009(3): 5-7+19.

- [34] 赵程程, 孙长坡, 孙晶, 等. 一株新型降解玉米赤霉烯酮的沙福芽孢杆菌及其关键分析[J]. 食品科学, 1-11[2023-04-12].
ZHAO C, SUN C, SUN J. et al. A novel *Bacillus subtilis* degrading zearalenone and its key analysis[J]. Food science, 1-11 [2023-04-12].
- [35] KAKEYA H, TAKAHASHI-ANDO N, KIMURA M, et al. Biotransformation of the mycotoxin, zearalenone, to a non-estrogenic compound by a fungal strain of *Clonostachys* sp[J]. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 2002, 66(12): 2723-2726.
- [36] 段锦, 丁轲, 余祖华, 等. 玉米赤霉烯酮降解菌株的筛选及降解特性研究[J]. 动物营养学报, 2021, 33(9): 5266-5276.
DUAN J, DING K, YU Z, et al. Screening and degradation characteristics of zearalenone degrading strains[J]. *Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(9): 5266-5276.
- [37] 潘药银. 近平滑假丝酵母对玉米赤霉烯酮的脱毒研究[D]. 华南理工大学, 2021.
PAN Y. Study on the detoxification of zearalenone by *Candida nigra*[D]. South China University of Technology, 2021.
- [38] 陈伟, 谷新晰, 李广靖, 等. 玉米赤霉烯酮降解酶 ZHD101 的表达优化及在玉米浆脱毒中的应用[J]. 河北农业大学学报, 2020, 43(6): 26-34.
CHEN W, GU X, LI G, et al. Expression optimization of zearalenone degrading enzyme ZHD101 and its application in detoxification of corn syrup[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2020,43(6): 26-34.
- [39] 黄志东, 张翘楚, 李惠惠, 等. 菌体蛋白作为饲料蛋白原料的研究进展[J]. 饲料工业: 1-13[2023-04-18].
HUANG Z, ZHANG Q, LI H, et al. Research progress on bacterial protein as feed protein raw material[J]. *Feed Industry*: 1-13 [2023-04-18].
- [40] 李婷婷, 陈雪, 程涛, 等. 基于响应面法优化酿酒酵母培养体系[J]. 中国酿造, 2020, 39(11): 126-131.
LI T, CHEN X, CHENG T, et al. Optimization of brewing yeast culture system based on response surface methodology[J]. *China Brewing*, 2020, 39(11): 126-131
- [41] PENG X, NAMITA B, MATTHEOS A K. Engineering plant metabolism into microbes: from systems biology to synthetic biology[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2013, 24(2).
- [42] 李剑, 高年发, 刘伟, 等. *Lactobacillus delbrueckii* 营养条件的研究[J]. 食品与发酵工业, 2003(6): 27-30.
LI J, GAO N, LIU W, et al. A study on the nutritional conditions of *Lactobacillus delbrueckii*[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2003(6): 27-30.
- [43] 刁立兰. 谷氨酸发酵中生物素含量的测定及控制[D]. 山东轻工学院, 2008.
DIAO L. Determination and control of biotin content in glutamic acid fermentation[D]. Shandong University of Light Industry, 2008.
- [44] 王晓丽, 贺玉明, 丛泽峰, 等. 谷氨酸摇瓶发酵培养基的优化[J]. 中国高新技术企业, 2013(18): 24-25.
WANG X, HE Y, CONG Z, et al. Optimization of glutamic acid shake flask fermentation medium[J]. *Chinese High tech Enterprises*, 2013 (18): 24-25.
- [45] 翁宋生. L-苏氨酸发酵条件优化及其动力学研究[D]. 福建师范大学, 2012.
WENG S. Optimization of L-threonine fermentation conditions and its kinetic study[D]. Fujian Normal University, 2012.
- [46] 王粉莲, 苏利民, 王萍, 等. 生物肥料在国内外的研究现状[J]. 内蒙古农业科技, 2010, (6): 74-75.
WANG F, SU L, WANG P, et al. Research status of biological fertilizers at home and abroad[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2010, (6): 74-75.
- [47] 段宏美, 窦森, 王德辉, 等. 玉米浆及配合其他有机物料对苏打碱土改良效果及腐殖质特性变化[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2159-2166.
DUAN H, DOU S, WANG D, et al. The improvement effect of corn syrup and other organic materials on soda alkali soil and the change of humus characteristics[J]. *Journal of agricultural environment Science*, 2021, 40(10): 2159-2166.
- [48] SALAM L B, ISHAQ A G. Biostimulation potentials of corn steep liquor in enhanced hydrocarbon degradation in chronically polluted soil[J]. *Biotech*, 2019, (9): 1-20.
- [49] ARIKAN E B, CANLI O, CARO Y, et al. Production of bio-based pigments from food processing industry by-products (apple, pomegranate, black carrot, red beet pulps) using *Aspergillus carbonarius*[J]. *Journal of fungi (Basel, Switzerland)*, 2020, 6(4).
- [50] WANG D, LI Y, YUAN Y, et al. Identification of non-volatile and volatile organic compounds produced by *Bacillus siamensis* lz88 and their antifungal activity against *Alternaria alternata*[J]. *Biological Control*, 2011, 169: 104901.
- [51] CHOI H W, AHSAN S M. Biocontrol activity of *Aspergillus terreus* anu-301 against two distinct plant diseases, tomato fusarium wilt and potato soft rot[J]. *Plant Pathol J*, 2022, 38(1): 33-45.
- [52] 任晓洁, 班恒, 贺壮壮, 等. 生物转化玉米浆生产生物菌肥的共生发酵特性[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 9.
REN X, BAN H, HE Z, et al. Symbiotic fermentation characteristics of biotransformation corn slurry to produce bio bacterial fertilizer[J]. *Journal of agricultural engineering*, 2022, 38(17): 9. ㊟