

加工过程对稻麦重金属含量影响研究进展

许继平¹, 胡进¹, 叶宏², 于家斌¹, 王小艺¹, 孔建磊¹, 熊科²

(1. 北京工商大学计算机与信息科学学院, 北京 100048) (2. 北京工商大学食品学院, 北京 100048)

摘要: 稻麦是我国的主要粮食作物, 其在生长过程中易富集重金属元素, 稻麦中的重金属元素通过供应链进入人体, 摄入过量的重金属元素会对人的健康造成极大损害。由于我国部分种植地区的土壤或灌溉水源存在受工业排放废弃物污染的现象, 使农作物的重金属含量超标, 从而对食品安全造成很大威胁。目前研究表明稻谷和小麦中的重金属含量受加工过程和方法的显著影响, 稻谷的砻谷、碾米等工艺可以不同程度地降低大米的重金属含量, 小麦的制粉工艺也有降低小麦粉重金属含量的效果; 加工中机械设备可能对产品造成二次重金属污染。明晰加工过程对稻麦重金属含量的影响对稻麦加工环节设计与控制有着重要的指导意义。本文简单介绍了重金属在稻米和小麦中存在的化学价态以及在各部分结构中的分布规律, 并重点评述了典型加工环节对大米和小麦中重金属含量的影响, 并对其研究现状进行了总结梳理与分析, 以期对稻麦加工中重金属污染的防治起到借鉴作用。

关键词: 稻谷; 小麦; 重金属; 加工过程

文章编号: 1673-9078(2019)11-300-309

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.11.041

Advances in Research on the Influence of Processing on the Contents of Heavy Metals in Rice and Wheat

XU Ji-ping¹, HU Jin¹, YE Hong², YU Jia-bin¹, WANG Xiao-yi¹, KONG Jian-lei¹, XIONG Ke²

(1.School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

(2.School of Food and Chemical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: Rice and wheat are staple grain crops in China, however, they are susceptible to the enrichment of heavy metal elements during their growth. The heavy metal elements in rice and wheat enter the human body *via* the supply chain, and an excessive intake of heavy metal elements does great harms to the human health. In China, the soils or irrigation water sources in some crop growing areas are contaminated by industrial wastes, causing the contents of heavy metals in the crops to exceed the relevant standards (which poses a great threat to food safety). Current studies have shown that the contents of heavy metals in rice and wheat are greatly influenced by the processes and methods. Husking, milling and other processes can reduce the contents of heavy metals in rice to different extents; wheat flour milling can also reduce the contents of heavy metals in wheat flour. However, processing machinery may also cause secondary heavy metal contamination of products. The clarification of the influence of processing on the contents of heavy metals in rice and wheat is important for designing and controlling the processing steps of rice and wheat. This paper introduces briefly the chemical valence of the heavy metals in rice and wheat and their distribution in different in parts of the grain structures, and reviews mainly the influence of typical processing steps on the contents of heavy metals in rice and wheat. A summary of the research status is also provided, with the aim of providing a reference for preventing and controlling heavy metal contamination during rice and wheat processing.

Key words: rice; wheat; heavy metal; processing flow

密度在 4.5 g/cm^3 以上的金属或合金类物质被称

收稿日期: 2019-05-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC1600605); 北京市自然科学基金 (2172020); 北京市自然科学基金项目 (6172003); 国家自然科学基金资助项目 (31601408)

作者简介: 许继平 (1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 信息融合与智慧服务平台

通讯作者: 叶宏 (1979-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品质量与安全 and 化工过程控制

为重金属, 包括铜、铅、铁、镍、镉、汞、砷等元素, 其中砷虽然是一种非金属元素, 但其密度较大, 且化学性质与金属类似, 故也归类于重金属中。重金属元素不仅会对农作物的生长造成负面影响^[1-4], 更会在人体中积累超过一定量后, 造成人体中毒, 尤其是砷 (As)、汞 (Hg)、镉 (Cd) 和铅 (Pb) 毒性较强。例如食用镉超标的大米患上“痛痛病”^[5]。铅也会对人的神经系统、骨髓造血系统等造成严重损害^[6]。水稻和小麦的重金属元素首先来源于种植地区工业生产

的污染排放^[7]。其次,来源于农药化肥的不合理使用^[8-10]。此外,稻麦从原粮到初级产品(如大米、大米粉、小麦粉等)的加工过程中,重金属含量也会发生明显的变化。如一部分种皮的去除可能导致重金属含量的下降,从而减轻粮食的重金属污染程度,而加工机械的污染还可能导致重金属含量的增加,形成二次污染。鉴于不同的加工过程会对稻谷中的重金属含量造成不同的影响,许多学者对于稻麦的加工过程中重金属含量的变化进行了研究,但是尚未有比较系统的总结和梳理。本文将以稻谷和小麦为关注对象,对其果实中重金属元素的分布规律以及化学价态作以简述,并以加工过程的不同环节中稻麦的重金属含量的变化规律为重点进行总结和比较分析。

1 重金属在稻谷和小麦各部分结构中的分布规律

稻谷和麦粒作为水稻和小麦的果实,两者具有类似结构,都包括最外层的颖壳、中间的皮层(糠层)、胚和胚乳,其中胚乳是人类主要的可食用部分。

1.1 重金属在稻谷中的分布规律

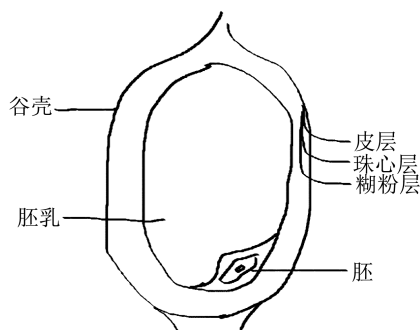


图1 稻谷籽粒结构简图
Fig.1 Structure of rice grain^[11]

对于稻谷来说,其主要由颖壳和颖果组成,颖果即糙米。糙米由皮层、胚和胚乳组成,皮层与胚乳之间紧贴着极薄的珠心层和糊粉层,如图1所示。加工得到的米糠包括皮层、糊粉层和胚^[12]。研究发现不同结构中重金属的含量会有所差异。王金英等^[13]分析了多个不同的水稻品种中砷、铜、铁、锌、钙和锰6种矿质元素在米糠以及精米中的含量,发现6种元素在米糠中的含量都远高于其在精米中的含量,其中,砷元素在米糠中的含量是其在精米中含量的2.71倍。陈义芳等^[14]研究了水稻籽粒的颖壳内、外表面和糙米表面、糊粉层、近糊粉层、米中部等不同部位的Cd和Pb的含量,发现Cd在颖壳内表面和糊粉层积累较多,颖果的糊粉层和近糊粉层则主要是Pb的富集部

位;上述研究均表明许多重金属元素在稻谷各部分的含量是存在明显差异的,这一现象和稻谷各部的成分不同有关,魏帅等^[15]在稻谷加工过程中依次收集颖壳、糙米、米糠和精白米,并测定其镉含量,发现米糠中镉含量最高,颖壳次之,而后是糙米,精白米含量最低,且糙米中的镉主要分布于胚、糊粉层与外胚乳中;其还对稻米中的营养组分进行分离和测定发现蛋白质中镉含量最高,而淀粉中镉含量则较低,由此证明镉在水稻籽粒中的主要存在形态是蛋白质结合态。由以上研究可以看出,尽管不同研究中的元素种类不同,但在稻谷各部分中的含量规律大致相同,即糠层最高、颖壳次之、精米最低,即稻粒中的重金属主要分布于外部皮层结构之中,而胚乳的重金属污染风险较低。

1.2 重金属在小麦中的分布规律

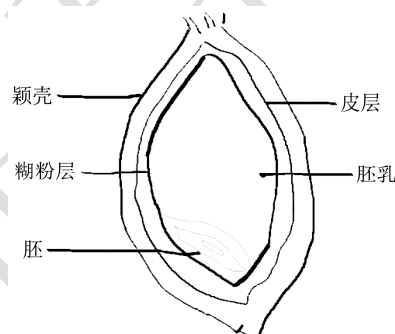


图2 小麦籽粒结构简图

Fig.2 Structure of wheat grain^[11]

对于小麦籽粒来说,如图2所示,最外层结构仍为颖壳,皮层即麦皮。胚乳也称麦芯,是麦粒的主要部分,胚乳外围是糊粉层^[12]。杨居荣等^[16]将小麦粒在解剖镜下剥离出颖壳、皮层、胚和胚乳并分别检测其Cd、Cu和Pb三种重金属的含量。结果发现,相较于主要由淀粉构成的胚乳,三种元素更易聚集在蛋白质含量较高的胚中以及粗纤维含量较高的颖壳中。其在皮层中也有较高浓度的原因较为复杂,除了由于麦皮中含有少量的蛋白质外,可能还因为某些重金属元素与其他金属元素的富集具有一定的相关性。如张军等^[17]发现在小麦籽粒的不同部位中,铅不但与镉、铝的含量存在着显著的正线性关系,而且与镁、磷、钾、钙、硫和硒的相对含量也存在同样显著的线性关系。至于上述线性关系的机理,还有待于进一步的证明。Zhao等^[18]对不同小麦样品经研磨产生的麸皮中的砷含量为面粉砷含量的3.8~4.7倍,同时也发现小麦中麸皮部分的砷含量远高于胚乳部分。

对比稻谷和小麦中重金属的分布规律,可以发现,二者结构中重金属的含量大致呈外部的颖壳、皮

层和胚高于内部胚乳的规律,这与重金属相较于淀粉更易与蛋白质相结合有着密切的联系。从研究的数量来看,对大米重金属分布的研究较多,而对于小麦籽粒中重金属分布的研究相对较少。这与大米更易富集重金属元素,以及近年来大米重金属超标事件频发有直接关系。

1.3 重金属在稻麦中的化学价态及毒性

粮食中重金属的毒性除与含量有关外,还与其在粮食中存在的化学价态有关,不同的化学价态毒性不同^[19]。当前研究对不同重金属价态的研究主要集中于砷和汞两种,其中食品中的砷主要有无机砷和有机砷两种形态,无机砷的毒性远高于有机砷^[20-24]。汞在环境中的存在形态有金属汞、无机汞和有机汞三种,在食品中对人危害较大的是有机汞中的甲基汞^[25]。

粮食中砷的无机态主要为亚砷酸盐(As^{3+})和砷酸盐(As^{5+}),有机砷主要为一甲基砷酸(MMA)和二甲基砷酸(DMA)^[26,27]。文涛等^[28]对13份稻米样品中的总砷和无机砷的含量进行了测定,总砷和无机砷均有检出,且无机砷占总砷的含量为50.0%~93.1%。吕清慧^[29]的研究结果同样表明砷在大米和面粉中主要以无机态的形式存在,也有研究发现除三价无机砷外,二甲基砷酸也是砷在大米中的主要存在形式^[30]。

王瑞婷^[31]对来自矿区的大米中的无机汞(Hg^{2+})、甲基汞(MeHg^+)和乙基汞(EtHg^+)三种汞形态进行研究,发现甲基汞为大米汞污染的主要形式,其次为无机汞,乙基汞最少。赵朦迪^[32]分析了大米和小麦中的无机汞、甲基汞、乙基汞和苯基汞(PhHg^+)四种汞形态进行检测,结果显示无机汞为汞在大米和小麦中的主要存在形式。总之,不同的研究分别证明无机汞和甲基汞是汞在稻麦中的主要存在形式,不同的研究略有差异。

除了针对砷和汞在粮食中不同价态的研究外,还有一些对其他重金属元素在食品中不同价态的研究。对大米和小麦中铅的存在形态研究表明无机铅是铅在稻麦中的主要存在形式^[32],而通常无机铅的毒性要小于有机铅^[33]。食品中金属镉的有机态和无机态都具有一定的毒性^[34]。食品安全国家标准对重金属限量值的规定中仅对砷和汞的化学价态作了区分,且目前针对这两种金属在粮食中的存在形态及其毒性的研究也比较充分,而针对铅、镉等其他重金属的此类研究则相对较少。明晰不同重金属污染物在粮食中的存在形态及对应的毒性大小对于食品安全问题来说非常重要,可以进一步指导国家标准对重金属污染物的限量规定做合理的细分。

2 加工过程对大米中重金属含量的影响

稻谷的加工过程主要由三道工序组成:清理、砻谷和碾米。过程中分别会将杂质、谷壳和米糠等部分依次去除。鉴于重金属易富集于谷粒的外层结构,而稻谷加工成可食用的大米的过程就是将胚乳与其他部分分离的过程。因此稻米加工过程的意义已不仅限于得到初级产品,还是一种大米降镉等重金属元素的方法。

2.1 镉随加工过程的含量变化

镉在大米中的超标情况最为严重,因而成为人们所关注的研究热点。

章月莹等^[35]对加工程度不同的大米进行镉含量测试,发现从糙米加工成三级大米,其镉含量仅降低17.8%左右因此对于镉含量超标不严重的稻谷,可以利用加工方式降镉,对于镉含量超标严重的稻谷不适用。魏帅等^[36]研究稻谷加工工艺(砻谷、碾米)与稻谷镉去除率的关系,也发现了类似的规律并且给出了更加定量的结论。镉含量低于0.226 mg/kg的稻谷,通过砻谷可使镉含量降到0.2 mg/kg以下,从而达到国家标准。此外碾米加工也有降镉效果,碾米时间2.5分钟时降镉效果最佳。镉含量低于0.288 mg/kg的糙米,可通过碾米加工成为合格大米。但是镉含量达到0.323 mg/kg时,难以通过加工工艺使镉含量达标。

田阳等^[37]将稻谷样品经砻谷脱去颖壳,得到糙米,然后在0%~9%、9%~15%和15%~25%的不同精度的碾米工艺下依次得到产物为糠层、外层胚乳、中间层胚乳以及定义为核心层胚乳的精米。对上述各部分进行镉含量测定,结果显示糠层镉含量最高;颖壳镉含量次之;胚乳部分中,外层胚乳、中间层胚乳、核心层胚乳含量依次降低,且都小于颖壳的镉含量。说明随着碾米精度的提高,精米的镉含量呈下降趋势。

2.2 镉在深加工过程中的含量变化

深加工过程由于产品不同,加工过程各异,但是已经发现有一些加工工艺对于镉去除有明显的效果,对于镉超标大米的利用具有指导意义。

田阳等^[37]对由精米加工而成淀粉产品、蛋白产品以及副产品黄粉的镉含量的检测显示:蛋白产品的镉含量最高,平均镉含量为精米的7倍以上;淀粉产品的镉含量仅为精米的25.77%。黄粉虽以淀粉为主,但蛋白含量仍较高,其镉含量接近于原料大米。此结果与前述重金属在稻谷中的分布以及与稻谷中的营养组分相结合的规律大致相符,为重金属超标严重稻谷的

利用提供一种较为可行的思路, 并且对稻米的下游产品加工生产具有指导意义。

重金属难以降解除去, 但却可以在某些条件下迁移。刘晶^[38]研究了大米浸泡过程中 Cd 的迁移规律, 发现大米在浸泡过程中 Cd 会迁移至浸泡液中, 迁移量最多可达 33.71%。Sharafi 等^[39]通过研究得出了类似的结论, 水稻浸泡可以减少大米的镉含量, 且浸泡时间从 1 h 增加到 12 h, 镉的脱除率提高到了 16.6%, 同时, 浸泡也可以减少砷和铅的含量。具体的迁移机制还有待于研究。这也为稻米加工的后处理过程提供了可参考方法。

总的来说, 砻谷、碾米以及浸泡等物理加工工艺, 对重金属均有一定的去除效果, 而且操作简单、成本低, 无须化学试剂, 不过对更高镉含量的大米而言, 物理加工工艺不易达到理想的效果, 而只能借助于化学或生物等工艺和方法, 目前研究较多的方法包括碱法、酸法和生物发酵降镉工艺。姜毅康等^[40]研究了碱法提取大米淀粉的最佳工艺条件, 利用在氢氧化钠碱液在最优条件下, 可以得到纯度为 94.76% 的大米淀粉, 镉脱除率为 87.90%。许艳霞等^[41]采用柠檬酸和氯化钠作为混合溶剂对镉超标稻米进行浸提, 大米的降镉率可以达到 82.2%。其主要机理是利用柠檬酸的酸化作用和氯化钠的络合作用。刘也嘉^[42]等研究了乳酸菌发酵对大米镉含量的脱除效果, 在实验得出的最优条件下, 镉含量为 0.52 mg/kg 的大米降镉率达 79.24%。Zhai^[43]的研究同样证明植物乳杆菌的发酵对于降低大米的镉含量具有很好的效果, 并推断这种降镉效应与大米理化性质的改变有关, 例如大米蛋白质、脂质和灰分含量的减少以及大米多孔微观形态的出现等。吕佩霞等^[44]研究了乳酸菌和酵母菌的组成对大米的降镉效果。在一定条件下最高降镉率达 75.10%。大米发酵的降镉工艺效果优良, 甚至能改变镉含量较高的稻米的可食用性, 有利于大米后期的深加工降镉。以上化学或生物的大米降镉工艺在最佳条件下降镉效果非常明显, 工艺降镉作用机理的研究和权衡降镉工艺的效果和成本的方法研究是此类研究的两个重要方向。

稻谷的镉超标问题较为严重, 因此针对稻谷中镉的分布及加工过程对其含量影响的研究较多, 主要是随加工过程镉含量的降低规律, 目前未有研究报道加工过程中镉元素的二次污染问题。随着环境污染问题日趋严重, 镉以外的其他重金属元素污染日益严重, 不容小觑, 因此, 针对镉以外的重金属在稻谷的加工过程中的含量变化的研究也日益增多。

2.3 其他重金属元素随加工过程的变化

丁哲慧等^[45]研究了加工精度对稻谷籽粒中的 Cd、Pb 和 As 三种重金属含量的影响。结果发现, 砻谷过程对 Pb 的去除率可达 9.57%; As 次之, 为 5.09%; Cd 最低, 仅 3.76%。As、Cd、Pb 在碾米 2 min 后重金属的去除率分别为 37.48%、20.71%、31.82%。通过砻谷、碾米等加工工艺可以一定程度上降低稻谷的重金属含量。但是, 在加工过程中也存在着向稻谷中引入污染的风险。张山坡等^[46]研究小型铁辊分离式碾米机进行大米加工。通过对比砻谷及碾米前后物料中的污染物的含量表明, 碾米机在碾米后使物料中的铅、汞含量增加了 10% 以上, 污染物主要存在于米糠中, 进一步证实污染物主要来源于设备上的油漆。可见, 不合格的加工设备或不规范的加工过程会对物料引入新的污染, 使物料的重金属含量升高, 直接或间接地对人的健康产生危害。

涂鸿等^[47]对半自动开放式和全自动封闭式生产线加工的薏仁谷精米和碎米的重金属污染状况进行了研究, 所检测的重金属元素包括砷、铅、镉、汞、铜、锌和锰。半自动开放式生产线生产的精米出现 Cu 和 Mn 膳食暴露风险, 全自动封闭式生产线生产的精米仅出现了 Cu 膳食暴露风险。推断出现上述结果的原因有如下几点: 设备中含金属元素的残留物和机械部件中的金属元素进入产品中; 用于清洗谷物的水中可能存在重金属污染; 生产环节中更多的手工操作也可能是原因之一。

由以上研究可知, 稻谷加工的机械加工环节虽然能够降低重金属含量, 但是仍需同时关注机械加工的潜在重金属引入危险, 避免加工产物的二次污染。

除在加工过程中通过不同的加工工艺降低重金属含量外, 对成品的某些处理工艺也可以使大米的重金属含量降低。

Yim 等^[48]研究发现对糙米和小米进行漂洗可以减少糙米和小米的总砷含量, 增加漂洗的次数、漂洗过程中的搅拌次数以及水和物料的比率可以加强这种降砷效果。

米糠是稻谷加工过程中的副产物, 富含丰富的蛋白质、纤维素、矿物质以及其他有益的营养元素^[49]。具有非常广阔的开发与综合利用前景^[50], 陈丽萍等^[51]研究了水洗法脱除米糠蛋白中砷的最佳条件。在加水量为米糠蛋白质量的 10 倍、搅拌速度为 200 r/min、水洗时间为 40 min、水洗温度 90 °C 的条件下, 米糠蛋白的脱砷率可达 75.6%。可见水洗法对于米糠脱砷具有非常良好的效果。

赵思明等^[52]基于产业链信息进行了大米重金属污染溯源的研究, 并同时, 通过危害排查确定稻谷原

料、抛光以及配米这三个大米加工环节为重金属超标危害源,是加工过程中重金属含量的主要危害点和控制点。该研究首次将重金属的变化规律由加工环节向产业链扩展,并做趋势线加以分析,使重金属在整个产业链条中的分布更为清晰和定量。

稻谷的各种加工工艺对其重金属含量的影响汇总和对比如表 1 所示。

大米中重金属元素尤其是镉超标的问题是当前

社会关注的热点。从以往文献研究来看,基本可以得出镉元素随加工精度提高而下降的规律,但由于加工去除的皮层和胚的部分中含有稻米中的绝大部分蛋白质,并且还富含维生素和矿物质等对人体有益的营养元素,故出于健康饮食的考虑,人们又提倡“吃粗粮糙米”的饮食习惯^[53]。如何解决二者的矛盾,使人们吃上低镉含量的粗粮,将是一个值得思考和探索的新方向。

表 1 稻谷各加工工艺对其重金属含量影响对比

Table 1 Comparison of the effects of various processing techniques on the content of heavy metals in rice

项目	稻谷				
	磨谷	碾米	浸泡	化学浸提	生物方法
去除效果	对镉的去除率可达 11.5% ^[36] 。对铅和砷的去除率可达 9.57%和 5.09% ^[45] 。	镉去除率可达 17.8% ^[35] 。随碾米精度提高,去除效果更加明显 ^[37] 。	镉去除率也可达 33.71% ^[38] 。	不同提取液镉去除率达 82.2%-87.9% ^[40-41] 。	大米降镉率达 75%以上 ^[42-44] 。

首先,可以考虑将糙米加工的去杂物(主要为皮层等)单独收集进行脱镉处理(如浸泡或者化学生物降镉),之后再将其以所需的产品形态和比例回填入精米(或米粉)可以实现稻谷产品的健康安全和精粗得当。

其次,镉元素不是不锈钢的成分元素,因此一般不由加工机械引入,但是铬、镍、铜、锰等元素均为不锈钢的常见元素,可能由加工环节侵入污染。因此,对稻谷加工机械用不锈钢必须有相应的监管和维护措施。稻谷加工厂家需充分了解不锈钢并非真正意义上的“不锈”,只不过是腐蚀的速度较慢而已。如果不能对其制品进行合理的使用和保养,则会产生重金属的析出和迁移,对大米产品产生二次污染。

此外,还可开发更多更有效的稻谷脱壳新技术,提升行业整体技术进步程度,以避免由加工过程引入的重金属污染。当前普遍采用的机械研磨脱壳方式是导致重金属二次污染的主要原因之一。开发合适的化学碾米方法可以避免重金属元素的二次引入,并且开发新的物理的非机械式脱壳技术,也可以代替复杂的机械结构,比如利用先加压再突然减压的方式造成壳内外的压力差使壳裂,或者采用微波等能量输入实现非机械脱壳^[54]。由于稻米的壳与内部结构结合不像麦粒那样紧密,因此开发新型非机械脱壳技术对于稻米加工具有现实意义和良好的发展前景。

3 加工过程对小麦中重金属含量的影响

小麦制粉的过程是将胚乳与颖壳、麦皮和胚分离,然后将胚乳研磨成粉的过程。小麦制粉的加工过程主要包括清理、润麦和磨粉三道工序。小麦加工的粉路系统较为复杂,加工机理也与稻谷加工不同,这

些都将影响其各阶段产品的重金属含量。

3.1 镉随加工过程的含量变化

章月莹等^[35]对直接将小麦粉碎的全麦粉以及按实物标准样品粉色和麸星要求制成的特制二等粉做镉含量的检测,结果发现小麦加工成全麦粉和标准粉对样品镉含量影响在 46.5%左右,可以通过制粉工艺将镉含量在 0.20 mg/kg 以内的小麦的镉含量降低至允许值以内。

查燕等^[55]分别研究了受污染的水稻和小麦中 Cd 含量在加工过程中的含量变化,结果显示,去除粗麸后,小麦粉 Cd 的去除率为 24.35%,去除细麸后,小麦粉 Cd 的残留率为 38.34%。

从以上研究看出,与水稻的碾米加工相比,小麦制粉的过程降镉作用更加明显。

朱志选等^[56]研究了清洗和制粉对小麦镉含量的影响,结果发现,清洗和制粉对镉含量高的去除效果明显,而对于镉含量低的样品,去除效果则不是很明显,去除率平均值分别为 18.88%和 20.80%。该研究是目前粮食重金属研究中较少的关注清洗对小麦镉含量的影响的研究,但文章并没有给出清洗降镉的机理,具体机理还有待于进一步的研究。但可知清洗对于降低镉含量高的小麦镉含量不失为一种可行的方法。

3.2 其他重金属元素随加工过程的变化

查燕等^[55]研究了污染谷物中包括 Pb 和 Cu 等重金属在加工过程中的含量变化。发现随着加工深度的升级,Pb 和 Cu 的去除率增加,而且小麦加工成面粉后 Pb、Cu 的残留量明显低于水稻,分别为 18.73%、21.63%。说明通过加工过程使受污染小麦的重金属含

量达到安全值比水稻更加有效。

朱志选等^[56]发现清洗和制粉可以显著降低小麦中的铅含量,去除率平均值分别为 89.57%和 83.74%,效果明显。这是由于铅元素除了植物从土壤中吸收之外,还来自于携带铅元素的灰尘附着在小麦表面,采用更为简单的清洗手段即可去除。

Cubadda 等^[57]研究了从小麦粒到意大利面成品的加工过程中 Cd、Cr、Fe、Ni、Pb 五种金属元素的浓度水平。对各个阶段的金属浓度的检测结果表明,清洗工艺可以一定程度的减少小麦中部分金属浓度,例如铅、镉和镍。研磨是较为关键的工艺环节,它显著降低了所有元素的浓度,平均减少率从 68%到 32%不等。但其中 Cr 和 Ni 的减少率的数值并不单调且较为离散,表明不锈钢设备在研磨过程中会一定程度的释放金属元素。在意大利面的制作过程中,水的纯度、工厂空气中的金属元素积累和设备中的金属释放都是污染控制的关键点。

小麦的各种加工工艺对其重金属含量的影响汇总和对比如表 2 所示。

表 2 小麦各加工工艺对其重金属含量影响对比

Table 2 Comparison of the effects of various processing techniques on the content of heavy metals in wheat

项目	小麦	
	制粉	清洗
去除效果	镉的去除率在 24.35%~46.5% ^[35,55] 。	镉的去除率达 18.88%, 铅的去除率达 89.57% ^[56] 。

小麦植株对镉的富集能力弱于水稻,因此长期以来小麦的镉污染问题未受大众特别关注。但近年来,随着环境污染的加剧,小麦的镉污染问题已经呈现范围逐渐扩大,程度日益严重的态势。从加工角度来讲,小麦籽粒与稻米相比,更难去除皮层,所以一般需经过若干道皮磨、渣磨、心磨、尾磨处理得到粉末状产品,传统制粉工艺的流程比较长,研磨次数多,还涉及多级清粉和筛理。因此,小麦制粉加工的重金属污染既可由原料带入,又可由设备引入,而且从当前研究来看,后者的污染更为严重。又由于麦粒只适于加工成粉,无法形成颗粒状产品,因此非机械研磨对于小麦制粉加工无法适用,新的制粉工艺开发存在很大难度。但是仍可从以下几个方面进行改进,以达到降低重金属污染风险的目的。

首先,小麦制粉过程均涉及洗麦和润麦,加大洗麦和润麦的时间和强度可以使物料表面以及内部的部分重金属元素得到洗脱以及溶出。

其次,大范围推广小麦剥皮制粉工艺技术。剥皮

制粉工艺为先剥离麦皮得到裸麦、再从外向里直接破碎的过程,与传统小麦制粉带皮入磨,由内向外逐道破碎剥刮的方法相比具有明显优势,更类似于稻米研磨的设计思路。能够提高研磨质量,更重要的是可以将重金属含量相对较高的皮层先行剥离,使其不易混入后面粉路。

此外,建议加大研究环境空气中重金属对粉路系统的污染。小麦制粉加工与稻米研磨工艺显著不同,小麦籽粒被破碎为微米级的粉末,比表面积很大,且整个粉路均为风机气力输送,因此考虑空气中的重金属对粉路系统的污染是有必要的。目前在雾霾中所发现的重金属种类已涉及镉、锌、铅等多种元素,我国北方饱受雾霾困扰,尤其要考虑到此方面对小麦粉加工过程中重金属含量的影响。

最后,由于小麦制粉不宜采用非机械加工方式,其诸多研磨设备中的不锈钢辊部分定期清理和保养也显得尤其重要,以免由加工设备引入二次污染。这一点已在 2.4 小节中有所讨论,此处不再赘述。

4 展望

不论对于稻米还是小麦,重金属随加工过程进行,均会发生明显的变化。对于稻米加工,当前研究多偏重于通过加工降镉的技术,对其他重金属元素以及其他途径引入的重金属元素关注不多。通过砻谷碾米等物理方式的确对降低重金属含量的有一定的效果,但对于超标量较为严重的稻谷,则难以通过上述方式使其达标。利用化学、生物等加工方法降低重金属含量的研究较为充分,且效果明显,但由于其可能影响到产品质量,因此只适于有限范围内应用。与稻米相比,对于小麦在加工过程中重金属含量变化的研究相对较少,通过简单的清洗、去皮和制粉就可显著地降低小麦中的重金属含量,工艺简单而有效,故而针对小麦的降低重金属的化学或生物方法不多。

随着稻麦由粗加工向精深加工推进,粮食加工行业关键技术的革新与发展,加工过程对重金属含量变化影响的研究必然出现新的发展方向:

首先,研究将不再局限于现有数据的分析比较和定性研究,如采用数学统计工具对加工全链条的重金属含量变化趋势进行拟合分析,建立包含加工条件以及环境参数的数学模型,可实现对大米和面粉产品中重金属含量的定量预测,更易实现对加工过程的控制,降低稻米和小麦中重金属含量超标的风险,保障粮食产品的质量安全。

其次,新材料的发展将对粮食加工行业产生巨大的影响,采用低铬无镍不锈钢材料制作加工设备中的

研磨部件,将大大降低来自于设备的重金属污染。新技术的出现也有望实现稻麦的非机械研磨。

此外,随着精细加工的实现,稻麦加工过程中产生的谷糠等物料有望经过脱除重金属以后加工成新型产品,成为企业绿色循环经济的重要组成部分。

总之,重金属元素含量在稻麦加工过程中的变化,不仅仅与产品合格率相关,更是加工过程工艺以及设备运行情况的反映,包含了很多对生产加工和科学研究有指导意义的信息。对加工过程中稻麦重金属含量变化进行深入研究,将为稻麦加工中重金属污染的防治起到借鉴作用。

参考文献

- [1] 崔俊芳,胡春胜,张玉铭,等.重金属铅对不同品种小麦种子发芽和幼苗生长的影响[J].安徽农业科学,2010,38(2):622-633
CUI Jun-fang, HU Chun-sheng, ZHANG YU-ming, et al. Effects of the heavy metal lead on the seed germination and seedling growth of different wheat varieties [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(2): 622-633
- [2] 郑玉琪.汞对小麦的影响[J].天津农业科学,1981,2:42-46
ZHENG Yu-ying. The effect of mercury on wheat [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 1981, 2: 42-46
- [3] 孙哲,吴宏霞,唐丽娜,等.镉对三种主要农作物毒害效应的研究进展[J].山东农业科学,2009,11:86-89
SUN Zhe, WU Hong-xia, TANG Li-na, et al. Progress of research on toxic effect of Cd on wheat, maize and rice [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2009, 11: 86-89
- [4] Umair, Ashraf, Adam Sheka, et al. Lead toxicity in rice: Effects, mechanisms, and mitigation strategies: A mini review [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(23): 18-32
- [5] 莫若斌,曲伯华.1931年日本发生富山“痛痛病”事件[J].环境导报,2003,16:20-20
MO Ruo-bin, QU Bo-hua. In 1931, the Toyama "painful illness" incident occurred in Japan [J]. Environment Herald, 2003, 16: 20-20
- [6] 张英,周长民.重金属铅污染对人体的危害[J].辽宁化工,2007,36(6):395-397
ZHANG Ying, ZHOU Chang-min. Hazards of Pb pollution to health [J]. Liaoning Chemical Industry, 2007, 36(6): 395-397
- [7] 张东杰.重金属危害与食品安全[M].北京:人民卫生出版社,2011:86-89
ZHANG Dong-jie. Heavy Metal Hazards and Food Safety [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2011: 86-89
- [8] 何其辉,谭长银,曹雪莹,等.肥料对土壤重金属有效态及水稻幼苗重金属积累的影响[J].环境科学研究,2018,31(5):942-951
HE Qi-hui, TAN Chang-yin, CAO Xue-ying, et al. Effects of fertilizer on the availability of heavy metals in soil and its accumulation in rice seedling [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(5): 942-951
- [9] 李方方.土壤重金属污染现状分析及防治对策[J].河南农业,2017,19:29-29
LI Fang-fang. Analysis of current situation of heavy metal pollution in soil and its control countermeasures [J]. Agriculture of Henan, 2017, 19: 29-29
- [10] 张曼,张璟,普冀喆,等.我国农业产地环境污染成因及治理对策-以镉大米为例[J].林业经济,2014,36(6):20-29
ZHANG Man, ZHANG Jing, PU Ming-ji, et al. China's production environmental pollution reasons and countermeasures-taking cadmium-tainted rice as an example [J]. Forestry Economics, 2014, 36(6): 20-29
- [11] 中国农业百科全书总编辑委员会农作物卷编辑委员会,中国农业百科全书编辑部.中国农业百科全书·农作物卷 下[M].北京:农业出版社,1991:501-507
China Agricultural Encyclopedia Editor-in-Chief Committee Crop Volume Editorial Committee, China Agricultural Encyclopedia Editorial Department. China Agricultural Encyclopedia, Crops [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1991: 501-507
- [12] 何东平,白满英,王明星,等.粮油食品[M].北京:中国轻工业出版社,2014:90-91,131-132
HE Dong-ping, BAI Man-ying, WANG Ming-xing, et al. Cereal & Oil Food [M]. Beijing: China Light Industry Press Ltd, 2014: 90-91, 131-132
- [13] 王金英,江川,郑金贵.不同色稻的粳米与米糠中矿质元素的含量[J].福建农林大学学报(自然科学版),2002,31(4):409-413
WANG Jin-ying, JIANG Chuan, ZHENG Jin-gui. The contents of mineral elements in polished rice and bran of various colors[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition), 2002, 31(4): 409-413
- [14] 陈义芳,周卫东,刘爱平等.水稻籽粒不同部位P与Al、Cd、Pb含量的关系[J].江苏农业学报,2007,23(2):93-97
CHEN Yi-fang, ZHOU Wei-dong, LIU Ai-ping, et al. Relationships between content of P and those of Al, Cd and Pb in Different part of rice grains [J]. Jiangsu Journal of

- Agricultural Sciences, 2007, 23(2): 93-97
- [15] 魏帅. 稻米中镉元素分布部位及赋存形态研究[D]. 北京: 中国农业科学院农产品加工研究所, 2016
WEI Shuai. Study on distribution and speciation of cadmium in rice [D]. Beijing: Institute of Food Science and Technology CAAS, 2016
- [16] 杨居荣, 查燕, 刘虹. 污染稻、麦籽实中 Cd、Cu、Pb 的分布及其存在形态初探[J]. 中国环境科学, 1999, 19(6): 500-504
YANG Ju-rong, ZHA Yan, LIU Hong. The distribution and chemical forms of Cd, Cu and Pb in polluted seeds [J]. China Environmental Science, 1999, 19(6): 500-504
- [17] 张军, 王宇鹏, 刘娟, 等. 铅在小麦籽粒中的分布及与其他 8 种元素的关系[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2008, 29(4): 71-75
ZHANG Jun, WANG Yu-peng, LIU Juan, et al. Distribution of Pb in different part of wheat grains and the relationship with other eight elements [J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2008, 29(4): 71-75
- [18] Zhao F J, Stroud J L, Eagling T, et al. Accumulation, distribution, and speciation of arsenic in wheat grain [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(14): 5464-5468
- [19] 杨居荣, 查燕. 食品中重金属的存在形态及其与毒性的关系[J]. 应用生态学报, 1999, 10(6): 766-770
YANG Ju-rong, ZHA Yan. Existing forms of heavy metals and their toxicity in foods [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(6): 766-770
- [20] Marianne Molin, Stine-Marie Ulven, Helle-Margrete Meltzer, et al. Arsenic in the human food chain, biotransformation and toxicology-Review focusing on seafood arsenic [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2015, 31: 249-259
- [21] M Azizur Rahman, Hiroshi Hasegawa, Richard Peter Lim. Bioaccumulation, biotransformation and trophic transfer of arsenic in the aquatic food chain [J]. Environmental Research Environmental Research, 2012, 116118-116135
- [22] Geng W, Komine R, Ohta T, et al. Arsenic speciation in marine product samples: Comparison of extraction-HPLC method and digestion-cryogenic trap method [J]. Talanta, 2009, 79(2): 369-375
- [23] Jomova K, Jenisova Z, Feszterova M, et al. Arsenic: Toxicity, oxidative stress and human disease [J]. Journal of Applied Toxicology, 2011, 31(2): 95-107
- [24] Komorowicz I, Barał Kiewicz D. Arsenic and its speciation in water samples by high performance liquid chromatography inductively coupled plasma mass spectrometry-last decade review [J]. Talanta, 2011, 84(2): 247-261
- [25] 郑徽. 汞的毒性效应及作用机制研究进展[J]. 卫生研究, 2006, 35(5): 663-666
ZHENG Hui. Toxic effects and the mechanism of mercury on health [J]. Journal of Hygiene Research, 2006, 35(5): 663-666
- [26] 谭婷婷, 王瑛. 食品中砷的形态及无机砷降低毒性的研究进展[C]//“食品工业新技术与新进展”学术研讨会暨 2014 年广东省食品学会年会论文集. 广州: 广东省食品学会, 2014: 82-86
TAN Ting-ting, WANG Ying. Research progress on the form of arsenic in food and the reduction of toxicity of inorganic arsenic [C] // "New Technology and New Progress in Food Industry" Seminar and Proceedings of the 2014 Guangdong Food Association Annual Conference. Guangdong: Guangdong Food Society, 2014: 82-86
- [27] Davis M A, Signes-Pastor A J, Argos M, et al. Assessment of human dietary exposure to arsenic through rice [J]. Science of The Total Environment, 2017, 586: 1237-1244
- [28] 文涛, 潘南萍, 钟树良, 等. 稻米中总砷及无机砷含量的测定与分析[J]. 粮食与食品工业, 2014, 21(5): 99-103
WEN Tao, PAN Nan-ping, ZHONG Shu-liang, et al. Determination and analysis on total arsenic and inorganic arsenic of rice [J]. Cereal & Food Industry, 2014, 21(5): 99-103
- [29] 吕清慧. 食品中砷和硒形态的 HPLC-ICP-MS 分析方法研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014
LYU Qing-hui. Analysis method study on arsenic and selenium species in food by HPLC-ICP-MS [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2014
- [30] 侯艳霞, 刘丽萍, 潘浩, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱分析大米中砷形态化合物[J]. 分析实验室, 2013(10): 103-107
HOU Yan-xia, LIU Li-ping, PAN Hao, et al. Determination of arsenic species in rice by HPLC-ICP-MS [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2013(10): 103-107
- [31] 王瑞婷. 农产品中不同形态汞检测方法的建立与应用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010
WANG Rui-ting. Establishment of speciation analysis method of mercury in products and application research [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010
- [32] 赵滕迪. 食品中汞和铅形态的 HPLC-ICP-MS 分析方法研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015
ZHAO Meng-di. Analysis method study on mercury and lead

- species in food by HPLC-ICP-MS [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2015
- [33] 方勇,杨文建,陈悦,等.重金属铅的化学形态及其食品安全[J].中国粮油学报,2013,28(6):123-128
FANG Yong, YANG Wen-jian, Chen Yue, et al. Chemical speciation of heavy metal lead and its food safety [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(6): 123-128
- [34] 刘伏佳.香菇、竹荪、三七中镉的去除、形态分析及其毒性评价[D].广州:华南农业大学,2016
LIU Fu-jia. Study on the removal of cadmium,speciation analysis and its evaluation of the toxicity in *Lentinus edods*, *Dictyophoraindusiata* and *Panax notoginseng* [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016
- [35] 章月莹,李琛.不同加工程度对粮食中镉含量的影响研究[J].粮食储藏,2014,43(1):37-39
ZHANG Yue-ying, LI Chen. Research on the influence of different processing degree on the cadmium of grain [J]. Grain Storage, 2014, 43(1): 37-39
- [36] 魏帅,田阳,郭波莉,等.稻谷加工工艺对产品镉含量的影响[J].中国食品学报,2015,15(3):146-150
WEI Shuai, TIAN Yang, GUO Bo-li, et al. Effect of hulling and milling process on cadmium concentration in rice product [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(3): 146-150
- [37] 田阳.稻米加工技术对产品镉含量的影响[D].北京:中国农业科学院,2013
TIAN Yang. Study on the effect of rice processing on the cadmium concentration of products [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013
- [38] 刘晶,任佳丽,林亲录,等.大米浸泡过程中重金属迁移规律研究[J].食品与机械,2013,29(5):66-79
LIU Jin, REN Jia-li, LIN Qin-lu, et al. Migration of heavy metals in rice during soaking process [J]. Food & Machinery, 2013, 29(5): 66-79
- [39] Sharafi K, et al. The reduction of toxic metals of various rice types by different preparation and cooking processes: Human health risk assessment in Tehran households, Iran [J]. Food Chemistry, 2019, 280: 294-302
- [40] 姜毅康,吴卫国.镉超标大米碱法提取淀粉的工艺条件优化[J].粮食与油脂,2017,30(2):63-67
JIANG Yi-kang, WU Wei-guo. Optimization of alkali extraction of starch from cadmium [J]. Cereals & Oils, 2017, 30(2): 63-67
- [41] 许艳霞,倪小英,袁毅,等.溶剂浸提技术消减稻米中镉含量[J].粮食科技与经济,2015,40(5):36-39
XU Yan-xia, NI Xiao-ying, YAN Yi, et al. Solvent extraction technology to reduce cadmium in rice [J]. Grain Science and Technology and Economy, 2015, 40(5): 36-39
- [42] 刘也嘉,林亲录,肖冬梅,等.大米乳酸菌发酵降镉工艺优化[J].农业工程学报,2016,32(7):276-282
LIU Ye-jia, LIN Qin-lu, XIAO Dong-mei, et al. Process optimization for lactic acid bacteria fermentation to reduce cadmium in rice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 276-282
- [43] Zhai Q, Guo Y, Tang X, et al. Removal of cadmium from rice by *Lactobacillus plantarum* fermentation [J]. Food Control, 2019, 96: 357-364
- [44] 吕佩霞.大米发酵降镉的作用和机制研究[D].长沙:中南林业科技大学食品科学与工程学院,2018
LYU Pei-xia. Effects of fermentation against rice cadmium and the involved mechanisms [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2018
- [45] 丁哲慧,鞠兴荣,袁建,等.加工精度对稻谷籽粒中重金属含量的影响[J].粮油食品科技,2016,24(2):21-23
DIN Zhe-hui, JU Xing-rong, YUAN Jian, et al. Effect of processing accuracy on heavy metal content in paddy [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016, 24(2): 21-23
- [46] 张山坡,陈建,徐涵秋.小型铁辊分离式碾米机对大米污染程度的研究[C]//纪念中国农业工程学会成立三十周年暨中国农业工程学会 2009 年学术年会 (CSAE 2009).中国山西太谷:2009:1-5
ZHANG Shan-po, CHEN Jian, XU Han-qiu. Study on the pollution degree of rice by small iron roller separation type rice milling machine [C] // Commemorating the 30th Anniversary of the Founding of the Chinese Society of Agricultural Engineering and the 2009 Annual Conference of the Chinese Society of Agricultural Engineering (CSAE 2009), Taigu, Shanxi, China: 2009: 1-5
- [47] 涂鸿,秦礼康,韦柳燕,等.不同设备和工艺加工薏仁谷精米和碎米重金属污染评价[J].中国酿造,2016,35(3):120-123
TU Hong, QIN Li-kang, WEI Liu-yan, et al. Heavy metal pollution assessment of polished coix seed and broken coix seed with different equipments and technics [J]. China Brewing, 2016, 35(3): 120-123
- [48] Yim S R, Kim J H, Choi M H, et al. Systematic Investigation of the reduction of inorganic arsenic and bioactive nutrients in rice with various cooking techniques [J]. Journal of Food Protection, 2017, 80(11): 1924-1932

- [49] 吕莹果,季慧,张晖,等.米糠资源的综合利用[J].粮食与饲料工业,2009,4:19-22
LYU Ying-guo, JI Hui, ZHANG Hui, et al. Comprehensive utilization of rice bran resources [J]. Cereal and Feed Industry, 2009, 4: 19-22
- [50] 李壮,叶敏,熊万斌,等.米糠类产品的开发与综合利用[J].现代食品,2016,5:50-52
LI Zhuang, YE Min, XIONG Wan-bin, et al. The comprehensive utilization and foreground of rice bran [J]. Modern Food, 2016, 5: 50-52
- [51] 陈丽萍,郝景波.米糠蛋白中砷元素的脱除[J].黑龙江粮食,2014,5:49-51
CHEN Li-ping, HAO Jing-bo. Study on the removal of arsenic in rice bran protein [J]. Heilongjiang Grain, 2014, 5: 49-51
- [52] 赵思明,牛猛,崔晓晖,等.基于产业链信息的大米重金属污染溯源研究[J].中国粮油学报,2018,33(12):1-6
ZHAO Si-ming, NIU Meng, CUI Xiao-hui, et al. The tracing of heavy metal pollution in rice based on the data from industrial chain [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(12): 1-6
- [53] 张守文.糙米的营养保健功能[J].粮食与饲料工业,2003,12:38-41
ZHANG Shou-wen. The nutritional and health functions of brown rice should be attached great importance to [J]. Cereal and Feed Industry, 2003, 12: 38-41
- [54] 李晓霞,郭玉明.带壳物料脱壳方法及脱壳装备现状与分析[J].农产品加工学刊,2007,4:83-86
LI Xiao-xia, GUO Yu-ming. Actuality of the decladding method and sheller of shell fruit [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2007, 4: 83-86
- [55] 查燕,杨居荣,刘虹,等.污染谷物中重金属的分布及加工过程的影响[J].环境科学,2000,3:52-55
ZHA Yan, YANG Ju-rong, LIU Hong, et al. Distribution of heavy metals in polluted crops seeds and the effect of heavy metals in the food processing [J]. Environmental Science, 2000, 3: 52-55
- [56] 朱志选.清洗和制粉对小麦铅镉含量的影响[J].技术与市场,2015,22(12):120-121
ZHU Zhi-xuan. Effect of cleaning and milling on the content of lead and cadmium in wheat [J]. Technology and Market, 2015, 22(12): 120-121
- [57] Cubadda, F., A. Raggi an, E. Marconi. Effects of processing on five selected metals in the durum wheat food chain [J]. Microchemical Journal, 2005, 79(1-2): 97-102

(上接第 29 页)

- [15] Zhang J, Lin Y, Hu X, et al. VPS52 induces apoptosis via cathepsin D in gastric cancer [J]. J Mol Med (Berl), 2017, 95(10): 1107-1116
- [16] 帅勇锋,王小军,张一中,等.长链非编码 RNA NEAT1 对胃癌细胞增殖和凋亡的影响及其机制[J].中华实验外科杂志,2018,35(7):1259-1261
SHUAI Yong-feng, WANG Xiao-jun, ZHANG Yi-zhong. Effect of long-chain non-coding RNA NEAT1 on proliferation and apoptosis of gastric cancer cells and its mechanism [J]. Chinese Journal of Experimental Surgery, 2018, 35(7): 1259-1261
- [17] 陈冬雪,陈亮.刺五加皂苷对人胃癌 SGC-7901 细胞增殖、凋亡、EMT 及 VEGF、bFGF 表达的影响[J].中药材,2016,39(4):880-882
CHEN Dong-xue, CHEN Liang. Effect of saponins from *Acanthopanax acanthopanax* on proliferation, apoptosis, EMT and expression of VEGF and bFGF in human gastric cancer cells [J]. Chinese medicinal materials, 2016, 39(4): 880-882
- [18] Du X Y, Liu X, Wang Z J, et al. SLPI promotes the gastric cancer growth and metastasis by regulating the expression of P53, Bcl-2 and Caspase-8 [J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2017, 21(7): 1495-1501
- [19] Han X, Shi H, Liu K, et al. Protective effect of gastrodin on myocardial ischemia-reperfusion injury and the expression of Bax and Bcl-2 [J]. Exp Ther Med, 2019, 17(6): 4389-4394
- [20] Wang Y, Yin B, Li D, et al. GSDME mediates caspase-3-dependent pyroptosis in gastric cancer [J]. Biochem Biophys Res Commun, 2018, 495(1): 1418-1425

(上接第 175 页)

- [29] Spricigo D A, Bardina C, Cprtes P, et al. Use of a bacteriophage cocktail to control *Salmonella* in food and the food industry [J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 165: 169-174
- [30] Bao H, Zhang P, Zhang H, et al. Bio-Control of *Salmonella enteritidis* in foods using bacteriophages [J]. Viruses, 2015, 7(8): 4836-4851