

## 研究报告

## 小麦中铝元素在不同粮库储存期和面制品加工方式下的变化特征研究

徐孛<sup>1,2</sup>, 谢继安<sup>3</sup>, 刘柏林<sup>3</sup>, 黄翎华<sup>1,2</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 梁江<sup>1</sup>

(1. 国家食品安全风险评估中心, 北京 100022; 2. 南方医科大学, 广东广州 510515;

3. 安徽省疾病预防控制中心, 安徽合肥 231299)

**摘要:**目的 研究我国标准化粮库储存条件和面制品加工方式对小麦原粮及其制品中铝含量变化规律的影响, 为开展膳食铝精准暴露风险评估提供参数。方法 基于国内标准化粮库对小麦原粒进行12个月的储存, 并对小麦粒作两个阶段, 包括4种不同加工方式(磨粉、蒸制、煮制和烘焙)的处理, 检测铝元素在储存和加工处理前后含量的变化, 并分别计算小麦及其制品中铝的变化系数。结果 经过12个月粮仓储存后小麦中铝含量差异无统计学意义( $P>0.05$ ), 储存温度和湿度对小麦中铝含量的影响也较小( $P>0.05$ ), 储存过程中小麦铝的变化系数为0.19~2.71。在小麦粒研磨制粉阶段, 小麦粉中铝含量显著低于小麦粒( $P<0.05$ )。不同的面制品加工方式所制成品之间铝含量具有差异。其中, 烘焙和蒸制方式下面包和馒头中铝含量高于面条( $P<0.05$ ); 但馒头中铝含量与面包差异无统计学意义( $P>0.05$ )。烘焙方式下小麦制品铝的变化系数最高, 均高于1, 其次是蒸制和煮制, 总范围为0.20~1.89。结论 标准化粮库储存条件下不同储存时间对小麦中铝含量无明显影响, 但是不同的面制品加工方式对小麦粉中铝含量的影响具有显著性。在进行风险评估时, 应结合实际情况, 选择适宜的变化系数, 以提高风险评估精确度。

**关键词:** 铝含量; 小麦; 小麦面粉; 小麦制品; 加工; 储存; 变化系数

中图分类号: R155 文献标识码: A 文章编号: 1004-8456(2024)12-1311-07

DOI: 10.13590/j.cjfh.2024.12.002

### Study of change characteristics of aluminum in wheat during storage and processing

XU Nu<sup>1,2</sup>, XIE Ji'an<sup>3</sup>, LIU Bolin<sup>3</sup>, HUANG Linghua<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, LIANG Jiang<sup>1</sup>

(1. China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China; 2. Southern Medical University, Guangdong Guangzhou 510515, China; 3. Anhui Provincial Center for Disease Control and Prevention, Anhui Hefei 231299, China)

**Abstract: Objective** The impact of standardized grain storage conditions and processing methods of flour products on the migration and alteration of aluminum content in wheat grains and derived products was investigated in order to establish assessment parameters for accurately evaluating the risk of dietary aluminum exposure. **Methods** Wheat grains were stored for 12 months in a standardized grain depot in China. The grains underwent two stages of treatment, involving four distinct processing methods (grinding, steaming, boiling and baking). Changes in aluminum content were measured before and after storage and processing, and variation factors of aluminum in wheat and its products were subsequently calculated. **Results** After 12 months of storage, the aluminum content in wheat showed no significant difference ( $P>0.05$ ). Additionally, the impact of storage temperature and humidity on the aluminum content of wheat was minimal ( $P>0.05$ ). The variation factors of aluminum in wheat during storage ranged from 0.19 to 2.71. At the milling stage, the aluminum content in wheat flour was significantly lower than that in wheat grain ( $P<0.05$ ). Different processing methods exerted varied effects on the aluminum content of wheat flour. Specifically, the aluminum content of bread and steamed bread was higher than that of noodles ( $P<0.05$ ). There was no significant difference in aluminum content between bread and steamed bread ( $P>0.05$ ). The variation factors of aluminum in wheat products was the highest in baking that higher

收稿日期: 2024-09-11

基金项目: 国家食品安全风险评估中心“高层次人才队伍建设523项目”

作者简介: 徐孛 女 在读研究生 研究方向为公共卫生 E-mail: 1501567529@qq.com

通信作者: 张磊 男 研究员 研究方向为食品安全风险评估 E-mail: zhanglei@cfsa.net.cn

梁江 女 研究员 研究方向为食品安全风险评估 E-mail: liangjiang@cfsa.net.cn

张磊和梁江为共同通信作者

than 1, followed by steaming and boiling, with a total range of 0.20-1.89. **Conclusion** No significant effect was observed on the aluminum content of wheat under varying storage durations in a standardized grain depot. However, the influence of different processing methods on the aluminum content of wheat flour was notable. In risk assessment, selecting an appropriate variation factors according to specific circumstances is crucial to enhance the accuracy of the assessment.

**Key words:** Aluminum content; wheat; wheat flour; wheat product; processing; storage; variation factors

铝是一种人体非必需的微量矿物质元素,可在肺、肝、肾、甲状腺和脑等组织中蓄积,过量摄入会影响铁、钙等元素的吸收,导致骨质疏松、贫血,还会引起学习记忆能力下降,与老年痴呆症的发生有关<sup>[1-2]</sup>。联合国粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会认为,除定期服用含铝药物外,膳食暴露是铝的主要暴露途径<sup>[3]</sup>。我国不同地区居民膳食铝暴露评估研究结果表明,小麦及其制品是膳食铝摄入的主要来源<sup>[4-8]</sup>。小麦粉及其制品中的铝不仅来自含铝添加剂残留,还与小麦的铝本底含量有关。小麦中铝本底含量可受其种植环境中土壤和水源等因素的影响:一是土壤的影响<sup>[9]</sup>,一般情况下铝以稳定的铝硅酸盐形式存在于土壤中,但由于酸雨、含铝农药化肥等不确定性的污染源,土壤酸化会引起铝的溶出,造成小麦中铝的积聚。二是使用污水灌溉小麦<sup>[10]</sup>,这可能直接引入额外的铝至小麦生长体系,加剧小麦籽粒中铝的累积现象。

研究表明,小麦储存时间和环境(温度、湿度和气体等)对小麦中矿物质含量有一定影响<sup>[11]</sup>,并且在储存过程中磷化铝被允许作为广谱的储粮药剂用于熏杀粮粒中的储粮害虫,这些因素都有可能影响到小麦的铝含量。对小麦加工工艺的相关研究表明,目前主要存在两种小麦制粉方式,一是普通小麦粉制粉工艺会去除胚芽和麸皮,二是全麦粉制粉保留小麦所有成分,两种方式都使得小麦中矿物质含量发生变化<sup>[12]</sup>。不同加工方式中,水煮和油炸会造成矿物质损失。有国外研究发现,烘焙处理能使小麦面粉中矿物质含量平均增加6%,一些矿物质的生物利用度也可以通过烘焙增加<sup>[13]</sup>。国内外学者对于小麦中富含的有益矿物质作了广泛的研究,然而针对可能有害矿物质尤其是铝还存在研究空白;并且国内鲜有文献基于我国的饮食习惯和传统面制品加工方式,对于小麦中铝元素含量进行系统性研究。因此,开展此类研究对于保障面制品食品安全、揭示传统加工技术的科学内涵以及指导健康饮食实践具有重要意义。

本研究对基于国内粮库储存条件和我国传统面制品加工方式对小麦原粮及其制品中铝含量的变化影响展开研究,为开展膳食铝暴露风险评估提

供更准确的评估参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集与制备

2020年6月到2021年5月,对储存在我国中部省份某标准机械化粮库里的小麦粒每月定点采样,连续12个月,最终获得148份小麦粒样品。对初始小麦样品进行加工,得到21份加工成品样品。

#### 1.1.1 粮库储存时间和条件对小麦原粮中铝含量的影响

将初始小麦粒样品随机分为A、B、C3组,测量其平均初始浓度,再将每组样品随机分为5个平行样分别包埋于标准化粮库的西北、东北、西南、东南、中间5个方位,储存期为12个月,每月于5个不同方位不同分组分别取小麦约1kg,对样品中铝含量进行检测。在整个储存实验过程中,每天记录环境气象条件(温度、湿度)数据,以供后期分析温度、湿度对于储存过程中铝元素含量的影响。

#### 1.1.2 面制品加工方式对小麦原粮及小麦粉中铝含量的影响

初始小麦粒样品被随机分为A、B、C3组,每组取样小麦粒约1kg,分别按照标准方法加工成全麦粉、面条、馒头和面包。小麦粒加工分为两个阶段。

第一阶段:制粉。全麦粉:将各点小麦样品带皮放入研磨机,粉碎样品,为了保证样品的代表性,每次取样时先舍去三分之一左右的研磨样再进行采样。采取每份100g作为试样,置于-20℃以下避光保存。

第二阶段:煮制、蒸制、烘焙。面条:依照《面条用小麦粉》(LS/T 3202—1993)加工煮制,其中面粉100g,水33mL,成品经搅拌机混合均匀。

馒头:依照《小麦储存品质判定规则》(GB/T 20571—2006)加工蒸制,其中面粉200g,水100mL,成品经搅拌机混合均匀。

面包:依照《粮油检验 小麦粉面包烘焙品质评价 快速烘焙法》(GB/T 35869—2018)加工烘焙,其中面粉200g,水100mL,糖12g,盐3g,淀粉酶0.4g,酵母5.4g,黄油6g,成品经搅拌机混合均匀。

面粉、面条、馒头、面包等置于-70℃冰箱冷冻过

夜,取出后迅速用钢磨粉碎样品,取 100 g 作为试样,置于-20 ℃以下避光保存。

### 1.2 样品检测

按照国家标准 GB/T 23374—2009《食品中铝的测定电感耦合等离子体质谱法》对样品中铝含量进行检测。

### 1.3 变化系数

以经过不同储存期或者不同加工条件下样品的铝含量与原始样中的铝含量比例作为变化系数(Processing factor, Pf),来反映铝经过储存或者加工之后的变化特征,当  $Pf < 1$  时,表明处理因素导致小麦及其制品中铝含量水平降低;当  $Pf > 1$  时,表明处理因素导致小麦及其制品中铝含量水平升高。计算公式如下<sup>[14]</sup>:

$$\text{变化系数} = \frac{m \text{ 变化或储存之后样品中的铝含量}}{m \text{ 原始样品中的铝含量}}$$

表1 粮库储存条件下不同储存期的小麦铝含量比较

Table 1 Analysis of aluminum content in wheat at different storage periods under standard grain storage conditions

储存时间(月)	分组[M(Q1, Q3), mg/kg]		
	A	B	C
初始	64.80(34.20,75.70)	55.60(47.55,90.15)	33.55(22.50,51.28)
3	43.50(31.90,49.35)	43.60(34.95,58.95)	44.65(43.85,50.48)
4	35.10(24.35,48.65)	55.30(39.55,59.45)	45.95(33.75,53.13)
5	27.20(25.70,30.90)	51.20(25.45,63.05)	56.05(43.35,75.95)
6	28.20(20.40,35.40)	46.90(18.00,78.20)	47.95(36.88,50.33)
7	30.20(22.15,57.55)	32.60(30.60,37.50)	42.65(36.83,49.75)
8	45.50(26.35,57.40)	60.10(31.80,73.80)	43.65(35.90,53.35)
9	28.60(20.00,36.40)	66.10(48.10,100.40)	39.65(25.43,49.68)
10	37.50(29.60,46.15)	48.80(29.70,90.60)	36.95(25.98,47.33)
11	41.10(35.33,55.13)	43.45(32.43,54.85)	28.70(17.80,-)
12	39.60(26.50,61.00)	46.10(26.08,61.78)	51.70(-,-)
H	15.692	12.714	15.934
P	0.153	0.312	0.144

注:M:中位数;Q1:第一四分位数;Q3:第三四分位数

### 2.1.2 小麦储存温度、湿度变化对铝含量的影响

对小麦 12 个月储存期间的粮库环境进行检测,研究温度和湿度的变化对小麦中铝含量的影响,铝含量变化趋势如图 1 所示。根据斯皮尔曼相关性分析,小麦中铝含量与温度和湿度之间没有显著的相关性( $r=0.071$ ,  $P=0.827$ ;  $r=0.493$ ,  $P=0.122$ )。

### 2.1.3 基于不同储存期小麦中铝含量的变化系数

如表 2 所示,对一年储存期各月份小麦样品铝含量的 Pf 分析结果表明,与初始样的铝含量相比,小麦粒中的铝经不同储存月的 Pf 差异性较小,平均为 0.94(0.19~2.71)。

### 2.2 加工方式对小麦中铝含量变化的影响

#### 2.2.1 不同面制品加工方式对小麦中铝含量的影响

阶段一:制粉。在加工第一阶段中,将平均铝

### 1.4 统计学分析

利用 SPSS 26.0、Origin 2021 和 Microsoft Excel 2016 处理数据分析。各组数据均为计量资料且不服从正态分布,选用中位数和四分位数描述,计量资料两组间比较采用 Wilcoxon 符号秩和检验,多组间比较采用 Kruskal-Wallis 检验。相关分析采用斯皮尔曼相关性检验。 $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 粮库储存对小麦原粮中的铝含量变化的影响

#### 2.1.1 不同储存期小麦铝含量的变化规律

3 组小麦平均初始铝含量范围为 33.55~64.80 mg/kg。每月铝含量数据见表 1。基于 Kruskal-Wallis 检验对每组各个时间段小麦铝含量进行差异检验,结果显示在粮库不同储存期不同初始含量组小麦的铝含量差异均无统计学意义( $P > 0.05$ )。

含量分别为:64.8、55.6、33.55 mg/kg 的 3 组小麦粒加工研磨成小麦粉,取得 3 个面粉样本,其铝含量分别为:7.25、6.28、6.74 mg/kg,使用 Wilcoxon 符号秩检验,小麦原粒和小麦粉铝含量的差异有统计学意义( $P=0.050$ )。

阶段二:煮制、蒸制、烤焙。将第一阶段制成的 3 份面粉每份分成两组,经过烤焙、煮制和蒸制 3 种加工方式制成面包、面条和馒头 3 种小麦制品,每种制品取得 6 个样本,共 18 个样本。3 种制品中铝含量见表 3。该组数据量较小,不服从正态分布,使用 Kruskal-Wallis 检验不同面制品加工方式对小麦制品中铝含量的影响,结果显示小麦粉加工成为小麦制品后铝含量差异有统计学意义( $P=0.001$ )。具体的差异做各组之间的多重比较,结果如图 3 所示,在小麦粉制成 3 种成品后铝含量均无显著变化( $P=0.204$ 、 $0.134$ 、 $0.641$ );然而,不同加工方

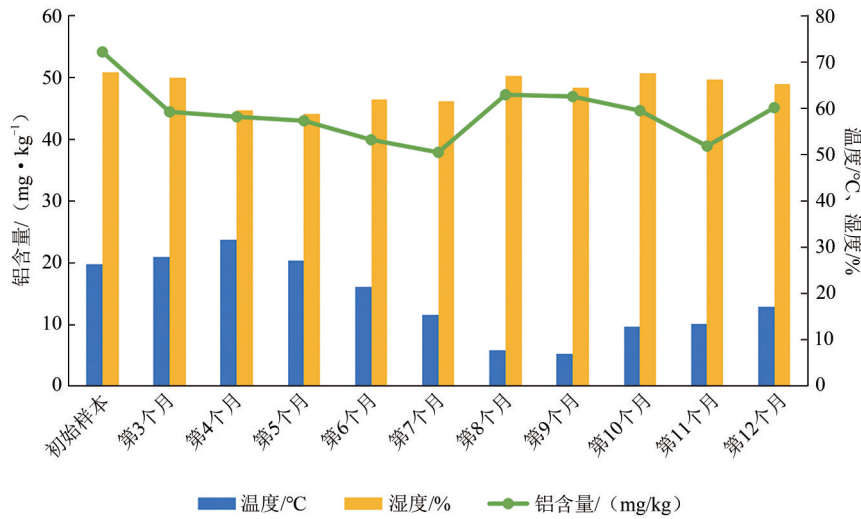


图1 温度、湿度和小麦中铝含量的变化趋势

Figure 1 Variation trend of temperature, humidity and aluminum content in wheat

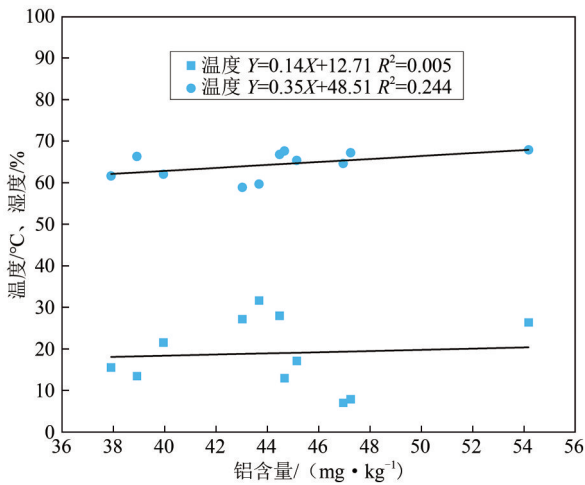


图2 小麦中铝含量与储存温度和湿度的散点图

Figure 2 Scatter plot of aluminum content in wheat with storage temperature and humidity

式之间小麦制品的铝含量差异有统计学意义,其中,面条的铝含量低于面包和馒头( $P=0.001$ 、 $0.034$ ),面包和馒头的铝含量差异无统计学意义( $P=0.206$ )。

### 2.2.2 不同加工方式下小麦制品中铝含量的变化系数

如表4所示,不同加工方式下,加工前后小麦制品中铝的Pf均存在差异。小麦粒研磨成小麦粉之后,铝含量降低,导致其Pf较小,平均值为0.14(0.10~0.22)。小麦粉经蒸制和烤焙,铝含量升高,

表2 不同储存期小麦中铝含量的变化系数

Table 2 variation factors of aluminum content in wheat under different storage periods

储存时间/月	变化系数*	
	平均值	范围
3	1.01	0.29~2.25
4	0.99	0.35~2.29
5	0.97	0.34~2.50
6	0.89	0.19~1.72
7	0.87	0.27~2.34
8	0.95	0.61~1.84
9	1.03	0.33~2.71
10	1.01	0.30~2.64
11	0.75	0.36~1.17
12	0.94	0.34~2.30

注:\*变化系数为不同储存月小麦籽粒与初始小麦籽粒铝含量之比

变化系数较高。其中,平均变化系数最高的是面包,为1.65(1.27~1.89),其次是馒头,为1.24(0.62~1.70)。面条成品中的铝含量降低,平均Pf<1,为0.35(0.20~0.68)。总体来看,蒸和烤的加工方式下小麦制品中铝的平均变化系数高于煮制方式,并且都大于1,说明蒸制和烤焙的加工工艺会使小麦制品中铝含量水平升高。从整个过程来看(小麦粒制成小麦制品的全过程),平均变化系数最高的是面包,为0.24(0.14~0.36);其次是馒头,为0.17(0.08~0.27);最小的是面条,为0.05(0.02~0.15)。小麦粒在制作成小麦制品后铝含量大幅降低,变化系数均Pf<0.5,为0.14(0.02~0.36)。

表3 不同面制品加工方式下小麦制品中的铝含量变化分析

Table 3 Analysis of aluminum concentration in different wheat products

小麦制品	样本量/份	加工温度/°C	加工时间/h	中位数(M(Q1,Q3),mg/kg)	范围/(mg/kg)	F	P
小麦粒	3	—	—	55.60(33.55,64.80)	33.55~64.80		
小麦粉	3	室温(22~30)	—	6.74(6.28,7.25)	6.28~7.25		
面条	6	100	5	2.07(1.53,3.00)	1.42~4.69	19.357	0.001**
面包	6	215	40	11.75(9.95,12.33)	8.00~12.70		
馒头	6	100	20	8.94(5.08,10.83)	4.52~11.20		



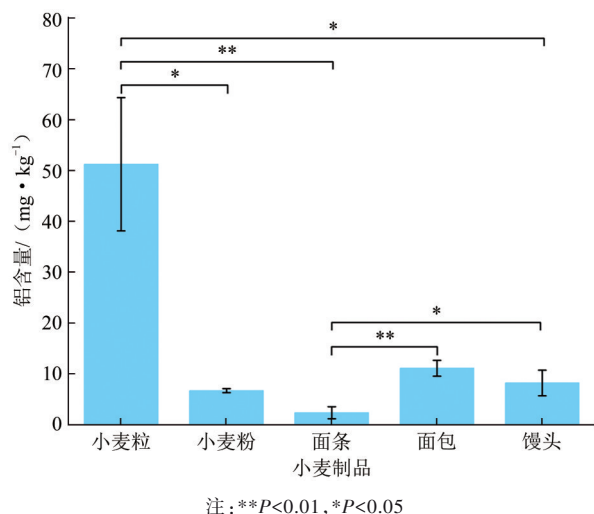


图3 小麦制粉到面制品加工各环节中铝含量变化的比较分析

Figure 3 Variation of aluminum concentration in different wheat products

表4 不同加工方式下小麦制品中铝的变化系数

Table 4 Variation factors of aluminum in wheat products under different processing methods

加工阶段	小麦制品	平均值	范围
第一阶段 <sup>1</sup>	小麦粉	0.14	0.10~0.22
	面条	0.35	0.20~0.68
第二阶段 <sup>2</sup>	面包	1.65	1.27~1.89
	馒头	1.24	0.62~1.70
全阶段 <sup>1</sup>	面条	0.05	0.02~0.15
	面包	0.24	0.14~0.36
	馒头	0.17	0.08~0.27

注:<sup>1</sup>为不同小麦制品与小麦籽粒中铝含量的比值;<sup>2</sup>为不同小麦制品与小麦粉中铝含量的比值

### 3 讨论

本研究结果表明,小麦籽粒中铝含量与储存时间无显著性相关,这与 KESKIN 和 OZKAYA<sup>[11]</sup>得出的小麦中的矿物质含量在贮藏期内均未出现明显变化的结论一致。小麦的结构从外到里分别是:果皮、糊粉层、胚乳和胚芽。据报道,铝在小麦中的积累存在差异,其中内胚乳中铝积累量最高,其次是外胚乳和麸皮,而糊粉层中积累量最低,这种差异可能与籽粒内部的养分运输途径有关<sup>[15]</sup>。小麦储存期间通常是带壳储存,坚硬的外壳能够保护小麦内部结构,使得其矿物质含量较为稳定,部分阳离子(包括铝)会通过金属螯合途径进入植物细胞中积累,使得铝在小麦中更为稳定<sup>[16-17]</sup>。

本研究对粮仓中的储存温度和湿度进行了监测,结果表明,储存温度和湿度与小麦中铝含量没有相关关系,这与 KIBAR 和 KILIC<sup>[18]</sup>提出的小麦的储存温度和湿度对其矿物成分的比例变化有一定影响的结论不一致,这种差异可能与矿物质之间的理化性质、粮仓其他环境(气体等)、温湿度的控制

范围等有关,目前还没有关于温、湿度与小麦铝含量之间的相关研究。小麦储存温度和湿度与小麦的水分含量密切相关,而小麦水分含量又能直接影响其中矿物质的含量<sup>[18]</sup>。储存温度越高,湿度越大,小麦籽粒的呼吸作用越强,对环境存在的金属离子越敏感,同时导致小麦水分含量增加,使得小麦中对金属离子的吸收和运输增强,金属离子积累增多<sup>[19]</sup>,小麦水分含量变化最终会对其储藏稳定性和加工品质造成影响。水分含量偏低,小麦色泽下降,品质较差;水分含量过高,麸皮与胚乳剥离困难,导致出粉率下降,同时面粉的安全储藏时间也随之缩短<sup>[20]</sup>。小麦储藏环境(温度、湿度、气体等)则是影响小麦含水量的重要因素,有研究表明小麦的安全储藏水分在 12% 以下,安全温度在 15℃ 以下,大多数虫霉不能发育,呼吸缓慢,能够实现粮食品质保鲜和虫霉防控<sup>[21]</sup>。

本研究发现,小麦制粉工艺对于最终面粉产品中铝元素含量有显著影响,这一观察结果与 GUO 等<sup>[22]</sup>人的研究结果相似。小麦粉铝含量受小麦粉加工精度的影响,首先,在小麦籽粒中,铝主要分布在小麦细胞的细胞壁和细胞器<sup>[16]</sup>,在加工过程中,小麦籽粒中的细胞壁和细胞器受到干燥和粉碎的破坏,这可能造成小麦粉中铝含量的变化。其次,小麦中铝有部分集中在麸皮中<sup>[15,23]</sup>,麦麸残留在小麦粉中的比例会影响小麦粉的铝含量,比如特一粉、麦芯粉加工精度较高,麦麸残留少,铝含量相对较低。在制作小麦粉的过程中,通常食用提取率为 70%,已有研究得出麦麸铝含量平均值为 35.1 mg/kg,远远高于同一实验小麦粉铝含量的平均值 4.36 mg/kg<sup>[24]</sup>。脱皮后再进行制粉有利于去除小麦中的铝。

在第二阶段中,基于我国传统面制品加工方式(煮制、蒸制和烤焙)对小麦面粉进行加工,结果显示,小麦面粉与小麦制品的铝含量差异较小,但不同加工方式所得的小麦制品的铝含量之间存在差异。相关研究表明,不同的加工方式会使小麦中矿物质含量发生变化<sup>[12]</sup>。但目前还没有研究发现加工面制品和铝含量的关系。本研究结果中小麦粉经加工煮制为面条后铝含量显著低于面包和馒头,可能原因是,虽然铝不溶于水,但是在面条煮制的过程中,面条中的铝会有一部分析出到面汤里,从而导致面条铝含量的下降。王怡斌等<sup>[12]</sup>也提出煮制会造成小麦面粉中矿物质极大的损失。小麦粉经过加工烤焙成面包后,铝含量上升,这与 BREDARIOL 等<sup>[25]</sup>的研究结果相似,植酸是一种矿物质抵抗物,在植物体内能和大多数矿物质形成稳定的络合物,而在面包烤焙过程中,持续较高温度使得植酸酶被激活,植酸

被降解,从而提高了一些矿物质的浓度<sup>[26]</sup>;并且制作面包需要添加淀粉酶、黄油、糖等辅料,有利于面包的发酵,发酵也能使植酸盐降解<sup>[27]</sup>。DORDEVIC等<sup>[28]</sup>评估了多种食物(牛肉,鱼片,洋葱,猪肉,鸡肉和土豆)在经过烤焙后铝含量的变化,结果发现,所有食物在经过高温烤焙后,其铝含量都增加,这可能与在热处理过程中,高温加速了蛋白质的降解、重量和水分的流失有关。最后,馒头与面包铝含量也存在一定差异,可能是因为馒头虽然和面包一样需要发酵,但其加工温度没有达到面包烤焙时的高温,所以其铝含量相对稳定。3种加工方式的小麦制品中铝含量差异可能来自温度、添加辅料和加热时间等不同。

本研究中还提供了小麦在加工过程中铝的变化系数,该系数适用于消费量数据为经过烹调加工后食物的消费量数据的暴露评估,对未经烹调加工的食品原料中污染物浓度进行校正。研究结果显示,不同小麦加工方式下有害元素浓度的变化系数存在一定差异,但都呈下降趋势,说明小麦加工能够有效降低其有害元素的浓度,并在收采加工销售过程中控制外来铝的污染,能有效降低人群的膳食铝暴露。变化系数对评估小麦制品在不同加工阶段的铝摄入风险是有益的,主要运用于:(1)变化系数可向食品安全检查机构提供有关食品加工过程中残留水平变化范围的信息,从而对评估原料是否符合法律标准至关重要;(2)向风险评估人员提供信息,以进行精确的膳食暴露估计,主要在食品加工后的消费情况下进行更现实的评估;(3)在同类食品中,加工工艺往往存在差异,在实际评估工作中可能会遇到加工产品的实际因素范围的信息缺乏,在实验室中模拟加工操作一定程度上模仿了食品加工业的技术手法,但不能涵盖所有的方面,变化系数在极大程度上可促进研究结果的关联<sup>[14]</sup>。有相关指导文件<sup>[29]</sup>表明,关于加工商品中农药残留程度的变化系数,对于处于相同加工程序的同批产品,从一种产品获得的结果可以外推到这一组中其他类似加工的产品。该外推规则是否能运用于产品中的矿物质元素的变化系数也有待进一步研究。

#### 4 小结

储存时间和储存环境(温度、湿度)对小麦中铝含量的影响较小。不同加工方式与小麦及其制品中的铝含量密切相关。采用变化系数可对消费者通过膳食途径污染物的暴露量进行校正,优化评估方法、提高评估结果准确性。本研究仅获得了我国局部区域小麦及其4种加工产品的铝含量数据和

变化系数,相关数据和方法仍需进一步地补充和系统研究。

#### 参考文献

- [1] KREWSKI D, YOKEL R A, NIEBOER E, et al. Human health risk assessment for aluminium, aluminium oxide, and aluminium hydroxide[J]. *Journal of Toxicology And Environmental Health-part B-critical Reviews*, 2007, 10 (Suppl 1): 1-269.
- [2] MEIRI H, BANIN E, ROLL M. Aluminum ingestion--is it related to dementia? [J]. *Reviews on Environmental Health*, 1991, 9(4): 191-205.
- [3] Lead: environmental aspects (EHC 85, 1989)[EB/OL]. [2024-07-08]. <https://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc85.htm>.
- [4] 蒋皓, 黄利明, 王玲莉, 等. 杭州市居民膳食中铝暴露风险评估[J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(2): 224-229.  
JIANG H, HUANG L M, WANG L L, et al. Risk assessment of dietary exposure of aluminium in residents of Hangzhou [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2023, 35(2): 224-229.
- [5] 李娜, 任钊, 王坦, 等. 河南省小麦面粉制品中铝含量调查研究[J]. *农产品加工*, 2021(14): 75-79.  
LI N, REN Z, WANG T, et al. Investigation of aluminum content in flour products in He'nan Province [J]. *Agricultural Processing*, 2021(14): 75-79.
- [6] 张倩, 郭学斌. 青海省成年居民膳食铝暴露风险评估[J]. *中国食品卫生杂志*, 2021, 33(5): 605-609.  
ZHANG Q, GUO X B. Assessment on dietary exposure of aluminum among adult residents in Qinghai Province [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2021, 33(5): 605-609.
- [7] 薛敏敏, 刘芳芳, 朱礼, 等. 湖南省市售豆制品中铝含量测定及差异性分析[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(4): 282-287.  
XUE M M, LIU F F, ZHU L, et al. Determination and difference analysis of aluminum content in commercial soybean products in Hunan province [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2023, 49(4): 282-287.
- [8] 吴英, 罗长琴, 熊双, 等. 渝东北片区食品中铝含量监测结果分析[J]. *现代食品*, 2022, 28(17): 186-189.  
WU Y, LUO C Q, XIONG S, et al. Analysis of monitoring results of aluminum content in food in northeast Chongqing [J]. *Modern Food*, 2022, 28(17): 186-189.
- [9] 郑新. 铝对人体健康的影响及食品中铝含量的测定[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2007(1): 36-37, 48.  
ZHENG X. Influence of Aluminum to People's health and testing the content of aluminum in Food [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007(1): 36-37, 48.
- [10] 王祖伟, 李宗梅, 王景刚, 等. 天津污灌区土壤重金属含量与理化性质对小麦吸收重金属的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 4: 1406-1410.  
WANG Z W, LI Z M, WANG J G, et al. Absorption to heavy metals by wheat and influencing features in sewage-irrigated soil in Tianjin [J]. *Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 2007, 4: 1406-1410.
- [11] KESKIN S, OZKAYA H. Effect of storage and insect infestation on the mineral and vitamin contents of wheat grain and flour [J].

- Journal of Economic Entomology, 2013, 106(2): 1058-1063.
- [12] 王怡斌, 姬汉轩, 孙晓涵, 等. 制粉工艺和加工方式对彩色小麦矿物质的影响[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(5): 71-74.  
WANG Y B, JI H X, SUN X H, et al. The effect of milling technology and processing methods on the mineral content of colored wheat[J]. Food and Oil, 2023, 36(5): 71-74.
- [13] LYONS G H, GENC Y, STANGOULIS J C, et al. Selenium distribution in wheat grain, and the effect of postharvest processing on wheat selenium content[J]. Biological Trace Element Research, 2005, 103(2): 155-168.
- [14] SCHOLZ R, HERRMANN M, MICHALSKI B. Compilation of processing factors and evaluation of quality controlled data of food processing studies[J]. Journal of Consumer Protection and Food Safety, 2016, 12(1): 3-14.
- [15] 冉莉萍, 陈昕钰, 杨阳, 等. 小麦籽粒不同部位铝的积累及其对氮素的响应[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2018, 39(1): 79-85.  
RAN L P, CHEN X Y, YANG Y, et al. Accumulation of aluminum in different parts of wheat grain and the response to nitrogen supply[J]. Journal of Yangzhou University (Agriculture and Life Sciences Edition), 2018, 39(1): 79-85.
- [16] FARIA J M S, TEIXEIRA D M, PINTO A P, et al. Aluminium, iron and silicon subcellular redistribution in wheat induced by manganese toxicity[J]. Applied Sciences, 2021, 11(18): 8745.
- [17] BHARGAVA A, CARMONA F F, BHARGAVA M, et al. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 105: 103-120.
- [18] KIBAR H, KILIC I. Mineral composition and technological properties of einkorn wheat as affected by storage conditions[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(12): e14951.
- [19] KIBAR H. Assessing mineral composition and morpho-physiological properties of de-hulled einkorn wheat during storage at different moisture levels[J]. Journal of Stored Products Research, 2019, 83: 200-208.
- [20] 吴琼, 倪浩然, 王海荣, 等. 偏高水分粮储藏研究现状与展望[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 133-140.  
WU Q, NI H R, WANG H R, et al. Research status and prospect of grain storage with high moisture[J]. Journal of He'nan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(5): 133-140.
- [21] 张立学, 黄盼盼, 许子彬, 等. 小麦安全储藏技术研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2022, 47(4): 79-81, 85.  
ZHANG L X, HUANG P P, XU Z B, et al. Advances in safe storage technology of wheat[J]. Food Science and Economy, 2022, 47(4): 79-81, 85.
- [22] GUO J, PENG S, TIAN M, et al. Dietary exposure to aluminium from wheat flour and puffed products of residents in Shanghai, China[J]. Food Additives And Contaminants Part A-chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment, 2015, 32(12): 2018-2026.
- [23] 尹红娜, 郑纯宇, 张亚勋, 等. 河南省小麦和小麦粉中铝本底调查研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(23): 8906-8911.  
YIN H N, ZHENG C Y, ZHANG Y X, et al. Investigation of aluminum background in wheat and wheat flour in He'nan Province[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(23): 8906-8911.
- [24] 周红, 彭姝, 韩德娟, 等. 小麦粉及其制品中铝本底含量测定及铝污染控制分析[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(3): 144-147.  
ZHOU H, PENG S, HAN D J, et al. Determination of aluminum background content in wheat flour and its products and analysis of aluminum pollution control[J]. Food and Oil, 2024, 37(3): 144-147.
- [25] BREDARIOL P, CARVALHO R A DE, VANIN F M. The effect of baking conditions on protein digestibility, mineral and oxalate content of wheat breads[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127399.
- [26] 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.
- [27] L L, Y L, JA I, et al. Fermentation affects heavy metal bioaccessibility in Chinese mantou[J]. Environmental Science And Pollution Research, 2023, 30(20).
- [28] DORDEVIC D, BUCHTOVA H, JANCIKOVA S, et al. Aluminum contamination of food during culinary preparation: Case study with aluminum foil and consumers' preferences[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(10): 3349-3360.
- [29] OECD. Guidance Document on Magnitude of Pesticide Residues in Processed Commodities[M]. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2008.