DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80652

迁移条件对返青箬叶中铜迁移的影响

刘立萍[1] 张志军[2] 沈宏桂[1] 罗宏泉[1] 谌海群[1]

（1. 怀化市检验检测中心，湖南 怀化 418000；2. 湖南医药学院医学检验学院，湖南 怀化 418000）

摘要：[**目的**]研究迁移温度、时间及铜含量对返青箬叶中铜向食品模拟物中迁移的影响。[**方法**]用五水硫酸铜溶液浸泡箬叶制备返青箬叶，食品模拟物包括超纯水、2.5%(质量分数)氯化钠溶液、4%(体积分数)乙酸溶液、10%(质量分数)白砂糖溶液、大豆油和5‰(质量分数)碳酸氢钠溶液；考察迁移温度、时间及铜含量对返青箬叶中铜迁移量的影响。[**结果**]除大豆油外，返青箬叶在乙酸溶液中的迁移量最大，其次是氯化钠溶液；当迁移温度为100 ℃时，所有食品模拟物中的铜迁移量在2 h时达到峰值，然后随着时间的延长呈下降趋势；当迁移时间为24 h时，超纯水、氯化钠溶液和大豆油的迁移峰值在40 ℃；乙酸和白砂糖溶液的迁移峰值在25 ℃；返青箬叶中铜含量越高，迁移量越大。[**结论**]食品模拟物性质、加热时间和温度是影响返青箬叶中铜迁移的重要因素；返青箬叶中铜含量越高，迁移量越大，酸性食品更有利于铜迁移。

关键词：返青箬叶；重金属铜；食品模拟物；迁移量

Effect of migration conditions on copper migration from regreen *Indocalamus* leaves

LIU Liping[1] *ZHANG Zhijun*[2] *SHEN Honggui*[1] *LUO Hongquan*[1] *CHEN Haiqun*[1]

（1. *Huaihua Inspection & Testing Center*, *Huaihua*, *Hunan* 418000, *China*;
2. *School of Medical Laboratory*, *Hunan University of Medicine*, *Huaihua*, *Hunan* 418000, *China*）

Abstract: [**Objective**] To analyze the effects of migration temperature, heating time, and copper content on the migration of copper from regreen *Indocalamus* leaves to food simulants. [**Methods**] Regreen *Indocalamus* leaves were prepared by being soaked in copper sulfate pentahydrate solutions. Food simulants included ultrapure water, 2.5% (mass fraction) sodium chloride solution, 4% (volume fraction) acetic acid solution, 10% (mass fraction) white sugar solution, soybean oil, and 5‰ (mass fraction) sodium bicarbonate solution. The effects of migration temperature, heating time, and copper content on the migration amount of copper from regreen *Indocalamus* leaves were analyzed. [**Results**] Except for soybean oil, the migration amount of copper from regreen *Indocalamus* leaves was the largest in 4% acetic acid solution, followed by 2.5% sodium chloride solution. When the migration temperature was 100 ℃, the copper migration amount in all food simulants reached peaks in 2 hours, and then decreased as time elapsed; when the migration time was 24 hours, the migration amount reached peaks in ultrapure water, 2.5% sodium chloride solution and soybean oil at 40 ℃, and the migration amount reached peaks in 4% acetic acid solution and 10% white sugar solution at 25 ℃; The higher the copper content of regreen *Indocalamus* leaves is, the greater the migration amount is. [**Conclusion**] The properties of food simulants, heating time, and temperature are important factors affecting the copper migration from regreen *Indocalamus* leaves. As the copper content of regreen *Indocalamus* leaves is higher, the migration amount is greater, and acidic food is more conducive to copper migration.

Keywords: regreen *Indocalamus* leaves; heavy metal copper; food simulants; migration amount

---

基金项目：湖南省自然科学基金项目(编号：2022JJ90058)

通信作者：张志军(1977—)，女，湖南医药学院副教授，硕士。E-mail：hcj6713@126.com

收稿日期：2024-07-11 **改回日期：**2025-01-08

引用格式：刘立萍，张志军，沈宏桂，等. 迁移条件对返青箬叶中铜迁移的影响[J]. 食品与机械，2025，41(3)：33-38.

Citation: LIU Liping, ZHANG Zhijun, SHEN Honggui, et al. Effect of migration conditions on copper migration from regreen *Indocalamus* leaves[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 33-38.

箬叶具有良好的包装定型和防腐抑菌特性，是民间常用的食品包装材料，如南方一般用箬叶包裹传统美食粽子。不良厂商为了迎合大众的消费心理，用工业硫酸铜溶液浸泡制备能长久保持鲜绿而不退色的返青箬叶，其外表与天然箬叶难以区分，但铜含量远远超过正常水平，天然箬叶中铜含量一般为 3.2~86.0 mg/kg，而返青箬叶中铜含量高达 434~2 468 mg/kg[1−11]。铜是人体必需的微量元素，参与人体铜蛋白和多种酶的构成，但摄取过量会损害健康甚至危及生命。

目前，已有关于陶瓷、玻璃、不锈钢、纸等食品包装材料中重金属迁移规律的研究[12−16]，而关于天然植物叶类食品包装材料中重金属迁移规律的研究较少。石艳等[1−2]研究了返青箬叶中铜的迁移情况，但未考虑被包裹食品性质的稳定性、返青箬叶的使用量、加热时间和介质的使用量。刘立萍等[17]建立了箬叶中铜迁移量的准确测定方法，但未系统分析迁移条件的影响规律。

研究拟选择超纯水、2.5%（质量分数）氯化钠溶液、4%（体积分数）乙酸溶液、10%（质量分数）白砂糖溶液、大豆油和 5‰（质量分数）碳酸氢钠溶液 6 种物质为食品模拟物，研究食品模拟物种类、迁移温度、迁移时间、返青箬叶中铜含量对铜迁移的影响，旨在为返青箬叶的安全使用提供一定的参考依据。

1　材料与方法

1.1　仪器、试剂与材料

1.1.1　仪器

原子吸收光谱仪：ICE 3500 型，赛默飞世尔科技（中国）有限公司；

智能样品处理器：VB24PLUS 型，天津博纳艾杰科技有限公司；

高效微波消解仪：ETHOS UP 型，北京莱伯泰科仪器股份有限公司；

中药材高速粉碎机：FD-15-T250A 型，上海市闵行区舰艇工贸有限公司；

电热恒温干燥箱：GZX-9140MBE 型，天津市泰斯特仪器有限公司；

超纯水处理系统：Milli-Q 型，美国 Millipore 公司。

1.1.2　试剂与材料

铜元素标准溶液：1 000 μg/mL，国家标准物质研究中心；

茶叶标准物质：成分铜认定值与不确定度为（8.3±0.5）mg/kg，中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所；

乙酸：色谱纯，天津市科密欧化学试剂有限公司；

碳酸氢钠、氯化钠：优级纯，国药集团化学试剂有限公司；

五水硫酸铜：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；

硝酸：高纯，赛默飞世尔科技（中国）有限公司；

白砂糖、大豆油：市售；

箬叶：分别于 2022 年 7 月和 2023 年 6 月采集于怀化市鹤城区盈口乡；

试验用水为超纯水。

1.2　试验方法

1.2.1　返青箬叶的制备及预处理　用不同浓度五水硫酸铜水溶液浸泡箬叶 24 h，用清水洗去叶面残留的硫酸铜，沥干，去掉叶柄和叶片焦黄部分，制得铜含量不同的返青箬叶；为获取足够试样，称 25 g 返青箬叶（每份平均面积为 12.48 dm^2，叶片厚度＜0.5 mm），剪成 4~9 cm^2 碎片，装入规格为 1 000 mL 带磨口塞的广口瓶中，备用。同时取适量返青箬叶，烘干，粉碎，测定其脱水率及初始铜含量。

1.2.2　迁移试验方法　向广口瓶中加入 0.95 L 食品模拟物，盖上磨口塞，在瓶外液面处画一横线，于电热恒温干燥箱或冷藏柜中开展迁移试验，观察试样液面是否下降，如下降明显，试验作废。试验后，清水快速洗去箬叶表面食品模拟物，烘干，粉碎，恒重，测定试样中铜残留量，并计算迁移量。

1.2.3　标准曲线绘制　用 4% 硝酸溶液作为铜元素标准溶液的稀释液，配成 0，0.2，0.4，0.8，1.6，2.0 μg/mL 标准系列溶液，于原子吸收光谱仪（火焰法）下测定吸光度，以质量浓度为横坐标，吸光度值为纵坐标，绘制标准曲线。

1.2.4　试样消解及样品测定　参照文献[17]的方法。以茶叶标准物质中铜的测定为试验结果控制方式，测定迁移试验前后返青箬叶中铜含量。

1.2.5　迁移量计算　根据迁移试验前后返青箬叶中铜的残留量，按式（1）计算铜的迁移量。

$$X = M \times (C_1 - C_2) \times (1 - f) \times 0.48/V, \quad (1)$$

式中：

X——食品模拟物中铜的迁移量，mg/L；

M——试样质量，kg；

C_1——迁移试验前返青箬叶中铜含量，mg/kg；

C_2——迁移试验后返青箬叶中铜含量，mg/kg；

f——试样脱水率，%；

V——食品模拟物体积，L；

0.48——结果换算成 S/N=6 dm^2/L 时的换算系数。

1.2.6　食品模拟物种类对铜迁移的影响　取 2 组不同返

青箬叶,每组装瓶6个,分别加入0.95 L超纯水、2.5%氯化钠溶液、4%乙酸溶液、10%白砂糖溶液、5‰碳酸氢钠溶液和大豆油6种食品模拟物,完全浸没试样,100 ℃电热恒温干燥箱中保温24 h,测定返青箬叶中铜残留量,并计算迁移量。

1.2.7　加热温度对铜迁移的影响　取30份25 g返青箬叶(铜含量1 3559.33 mg/kg,脱水率49.69%),分成6组,分别加入0.95 L超纯水、2.5%氯化钠溶液、4%乙酸溶液、10%白砂糖溶液和大豆油5种食品模拟物,完全浸没试样,将其中1组于2~5 ℃冷藏柜中,其余5组分别置于25,40,60,80,100 ℃电热恒温干燥箱中保温24 h,测定返青箬叶中铜残留量,并计算迁移量。

1.2.8　加热时间对铜迁移的影响　取30份25 g返青箬叶(铜含量1 3559.33 mg/kg,脱水率49.69%),分成6组,分别加入0.95 L超纯水、2.5%氯化钠溶液、4 %乙酸溶液、10%白砂糖溶液和大豆油5种食品模拟物,完全浸没试样,100 ℃恒温干燥箱中分别保温1,2,6,12,18,24 h,测定返青箬叶中铜残留量,并计算迁移量。

1.2.9　返青箬叶中铜含量对铜迁移的影响　取铜含量为489.81,662.96,878.02,1 171.40,1 734.29 mg/kg的5种返青箬叶(脱水率58.00%),每种取5份25 g,分别加入0.95 L超纯水、2.5%氯化钠溶液、4%乙酸溶液、10%白砂糖溶液和大豆油5种食品模拟物,于100 ℃恒温干燥箱中保温2 h,测定返青箬叶中铜残留量,并计算迁移量。

2　结果与分析

2.1　标准系列测定

按1.2.3的方法对质量浓度为0.000~2.000 μg/mL铜标准系列进行吸光度测定,测得曲线方程为Y=0.147 41x+0.002 56,相关系数R^2=0.999 9,线性关系良好,符合试验要求。

2.2　食品模拟物种类对铜迁移的影响

箬叶主要为蒸煮类食品的内包装材料,该类食品通常呈中性、酸性和碱性,可含油、盐和糖,蒸煮介质为水,一般咸味食品氯化钠含量为2%~3%,加糖甜味食品通常含糖10%左右。碳酸氢钠是一种常用的食品添加剂,GB 2760—2024规定,在食品中按生产需要适量使用,碱水粽一般1 kg糯米加4~6 g碳酸氢钠,因此,选择超纯水、2.5%氯化钠溶液、4%乙酸溶液、10%白砂糖溶液、5‰碳酸氢钠溶液和大豆油为食品模拟物。

根据GB 5009.156—2016,在试样接触面积与食品模拟物体积比(S/N)不确定的情况下,则按标准规定选择S/N=6 dm^2/kg,或者将实际情况换算成此条件下食品模拟物中某物质的迁移量。由表1可知,铜在5‰碳酸氢钠溶液中迁移不明显,迁移量<0.2 mg/L,在其他5种食品模拟物中迁移显著,迁移量为2.0~3.5 mg/L,其中在大豆油中的迁移量最大,与文献[2,17－18]的结论类似。

表1　食品模拟物种类对返青箬叶中铜迁移的影响结果†

Table 1　Effect of food simulant on copper migration from regreen *Indocalamus* leaves

样品	试样初始铜含量/(mg·kg^{-1})	铜含量/(mg·kg^{-1})						铜迁移量/(mg·L^{-1})					
		超纯水	氯化钠	乙酸	碳酸氢钠	白砂糖	大豆油	超纯水	氯化钠	乙酸	碳酸氢钠	白砂糖	大豆油
1号	1 359.33	1 034.98	912.01	902.99	1 355.53	1 009.75	810.85	2.1	2.8	2.9	<0.2	2.2	3.5
2号	1 198.28	889.69	749.30	828.11	123.02	796.69	745.59	2.0	3.0	2.5	<0.2	2.7	3.0

†　茶叶标准物质中铜含量为(8.3±0.5) mg/kg;1号样品脱水率为49.69%,2号样品脱水率为47.00%。

GB 5009.13—2017规定,火焰原子吸收光谱法测定铜的方法检出限为0.2 mg/L,因此,试验认为返青箬叶中铜在5‰碳酸氢钠溶液中未迁移,该溶液呈碱性,说明碱性物质对返青箬叶中铜的迁移有阻隔作用,用返青箬叶包裹碱性食品风险可控。

返青箬叶是一个有机体,铜主要键合在叶绿素中,为铜代叶绿素,其中铜离子被活化、迁移受食品模拟物体系的多因素影响,如酸性、碱性、含盐等。酸能活化铜离子,乙酸食品模拟物能显著增大铜的迁移量[19];卤盐有利于铜的活化和迁移[20－21];油脂对返青箬叶中铜的迁移有利,碱性条件阻止了铜迁移[2],酸(包括乙酸和脂肪酸)的H^+能活化铜代叶绿素中的铜,而溶液中的OH^-不能取代铜代叶绿素中的铜。白砂糖食品模拟物的影响机理有待进一步研究。

2.3　加热温度对返青箬叶中铜迁移的影响

考虑到蒸煮类食品存在冷藏、加热保温销售和常温放置的实际情况,设定试验温度梯度为2~5,25,40,60,80,100 ℃,其中,100 ℃为蒸煮温度,2~5 ℃为冷藏温度。由图1可知,铜的迁移量先随温度升高而增大,超纯水和氯化钠的迁移峰值在40 ℃,大豆油的迁移峰值在40,100 ℃,乙酸

和白砂糖的迁移峰值在25 ℃;除大豆油外,其他模拟物的迁移量随着温度的升高而降低。总体上看,返青箬叶在乙酸溶液中的迁移量最大,其次为氯化钠。

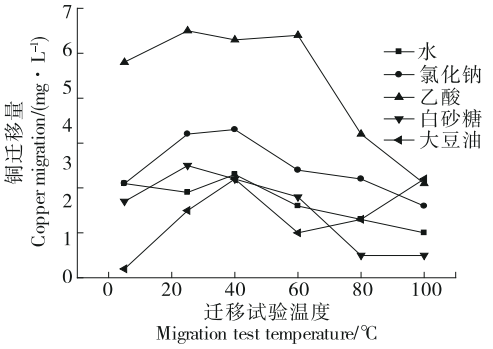

图 1　加热温度对返青箬叶中铜迁移的影响

Figure 1　Effect of heating temperature on copper migration from regreen *Indocalamus* leaves

姜紫薇等[19]研究发现,乙酸食品模拟物可促进复合聚丙烯食品接触材料中铜迁移;任彩霞等[20−21]研究发现,NaCl和酸性溶液有利于铜的活化和迁移。试验结果与之相似,可能是Cl^{-1}、H^{+}也能活化返青箬叶中铜元素,使之迁移,水、乙酸、脂肪酸均为H^{+}供体;升高温度可能改变箬叶中有机物结构,活性铜与叶绿素等有机物之间发生键合与分解,产生迁移和返迁移,其机理有待进一步研究。

2.3　加热时间对返青箬叶中铜迁移的影响

调查发现,民间煮粽时间最多24 h,而工业化生产一般不超过2 h,因此,试验时间最长设定24 h,同时考察1,2,6,12,18 h多个时间点。由图2可知,100 ℃保温2 h时,5种食品模拟物的铜迁移量达到峰值,除大豆油外,随着加热时间的延长,迁移量有所降低。乙酸溶液中的铜迁移量最大,明显高于其他模拟物。

董玉杰等[22−23]发现,在24 h甚至更长时间内,不锈钢

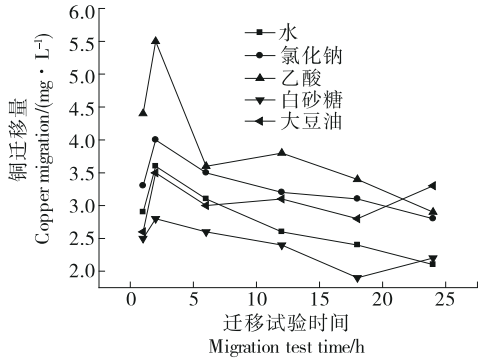

图 2　加热时间对返青箬叶中铜迁移的影响

Figure 2　Effect of heating time on copper migration from regreen *Indocalamus* leaves

中元素Cr和Ni迁移量随接触时间延长及温度的升高而增大;肖黎等[24−26]发现,陶瓷制品中重金属铅、钴、镍、锌的溶出量随时间的延长、温度的升高而增加,溶出量在较长时间内与时间呈线性关系;Yan等[27−29]研究发现,食品模拟物温度和接触时间对陶瓷制品中铅、镉的溶出有较大影响,金属元素的释放量在短时间内迅速增加,然后趋于平稳,高温促进金属元素的迁移。试验保温2 h内的研究结果与其相似,其他时间的结果并不相同。这可能是因为箬叶与不锈钢、陶瓷制品的物质组成不同,不锈钢、陶瓷制品的组分为无机物,结构简单,无机离子迁移是简单的扩散过程[30];箬叶的物质组成主要为有机物,物质结构变化可能受加热时间和温度影响较大,反应复杂,在蒸煮用箬叶包裹的食品过程中,铜元素的迁移行为不是简单的无机离子扩散,而是铜离子与不同有机物之间键合与分解、在食品模拟物中迁移与反迁移的过程,其机理有待进一步验证。

2.4　铜含量对铜迁移量的影响

由图3可知,在温度100 ℃、时间2 h的条件下,返青箬叶中铜向5种食品模拟物的迁移量随铜含量的升高而增加,呈正相关性。但不构成理想的线性关系,与文献[18]的研究结果相似。

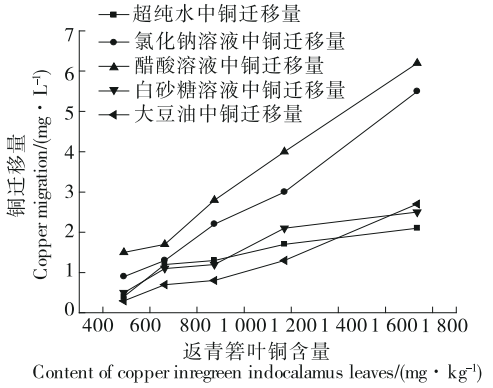

图 3　返青箬叶铜含量对铜迁移的影响

Figure 3　Effect of copper content in regreen *Indocalamus* leaves on copper migration

2.5　返青箬叶中铜迁移的风险评估

GB 9685—2016规定,添加有含铜元素添加剂的食品接触材料及制品中铜迁移量限量为5 mg/kg(或5 mg/L)。现实生活中,用箬叶包裹食品的实际*S*/*N*值大小不一。调查发现,如果单个粽子质量100 g,所用箬叶质量平均为10 g,即1 kg粽子使用箬叶100 g,则粽子的实际*S*/*N*=49.92 dm^2/kg(12.48 dm^2/25 g鲜叶),为国家标准规定(*S*/*N*=6 dm^2/kg)的8.32倍。如果试样是上述规格的粽子

模型,以此推算,粽子中实际铜迁移量>5 mg/L,存在食品安全风险。

3 结论

返青箬叶中铜含量越高,其在食品中的迁移量就越大;酸性食品更有利于铜的迁移,碱性食品对铜迁移有阻隔作用;迁移温度和时间对返青箬叶中铜的迁移影响显著,100 ℃下煮制,在较短时间内,铜向食品中迅速迁移,用返青箬叶包裹食品存在一定的食品安全风险。该研究局限于返青箬叶在食品包装中的应用,由于返青箬叶的应用广泛,其铜的迁移规律甚至机理尚需进一步研究。

参考文献

[1] 石艳, 章发盛. 硫酸铜浸泡箬叶包裹粽子实验中铜离子迁移分析[J]. 食品安全导刊, 2017(19): 68-70.
SHI Y, ZHANG F S. Analysis of copper ion migration in *Indocalamus* leaves with cupric sulfate soaked[J]. China Food Safety Magazine, 2017(19): 68-70.

[2] 陈召桂, 朱玲琳, 张路. 微波消解—原子吸收法测定不同条件下返青箬叶中铜离子的迁移情况[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(9): 2 791-2 794.
CHEN Z G, ZHU L L, ZHANG L. Determination of copper ion migration in regreen indocalamus leaves under different conditions by microwave digestion and atomic absorption spectrometry[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(9): 2 791-2 794.

[3] 蒋珊珊. 真空包装肉粽中铜和油脂氧化的风险评估[D]. 厦门: 集美大学, 2019: 8-9.
JIANG S S. Risk assessment of copper and oil oxidation in vacuum-packed meat rice dumplings[D]. Xiamen: Jimei University, 2019: 8-9.

[4] VIJ M, SANKARANARAYANAN S, SANKARANARAYANAN V S, et al. Giant cell hepatitis in copper toxicosis[J]. Journal of Clinical and Experimental Hepatology, 2022, 12(2): 719-720.

[5] YU H T, WANG D, ZOU L Y, et al. Proteomic alterations of brain subcellular organelles caused by low-dose copper exposure: implication for Alzheimer's disease[J]. Archives of Toxicology, 2018, 92(4): 1 363-1 382.

[6] GAETKE L M, CHOW-JOHNSON H S, CHOW C K. Copper: toxicological relevance and mechanisms[J]. Archives of Toxicology, 2014, 88(11): 1 929-1 938.

[7] 洪凰, 周黎霞, 邵铭, 等. 粽子国家标准中关键指标的研究[J]. 食品工程, 2015(2): 34-37, 51.
HONG H, ZHOU L X, SHAO M, et al. Research on critical indicators in rice dumplings national standard[J]. Food Engineering, 2015(2): 34-37, 51.

[8] 杜青. 电感耦合等离子体发射光谱法测定粽叶和粽子中的铜[J]. 现代科学仪器, 2017(2): 101-103.
DU Q. Determination of copper in reed leaves and zongzi by inductively coupled plasma optical emission spectrometry[J]. Modern Scientific Instruments, 2017(2): 101-103.

[9] 葛芳芳, 朱洪亮, 钱非. 微波消解-ICP-MS法测定粽叶中11种元素[J]. 食品工业, 2023, 44(8): 293-295.
GE F F, ZHU H L, QIAN F. Determination of 11 elements in reed leaves by microwave digestion with ICP-MS[J]. The Food Industry, 2023, 44(8): 293-295.

[10] 刘立萍, 陈慧, 罗宏泉, 等. 怀化市食品包装用箬叶所属物种调查和7种元素含量测定[J]. 包装工程, 2022, 43(5): 122-129.
LIU L P, CHEN H, LUO H Q, et al. Species survey and seven elements determination of *Indocalamus* leaves for food packaging in Huaihua[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(5): 122-129.

[11] SHEN M, CHEN L Y, HAN W, et al. Methods for the determination of heavy metals in indocalamus leaves after different preservation treatment using inductively-coupled plasma mass spectrometry[J]. Microchemical Journal, 2018, 139: 295-300.

[12] 高维亚, 张茜琳. 食品接触用玻璃制品重金属迁移检测分析[J]. 食品安全导刊, 2023(24): 119-122.
GAO W Y, ZHANG X L. Detection and analysis of heavy metal migration in glass products for food contact[J]. China Food Safety Magazine, 2023(24): 119-122.

[13] 禄春强, 温士强, 罗婵. 食品接触用纸中铅、砷迁移分析[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13(4): 326-329.
LU C Q, WEN S Q, LUO C. Analysis on the migration of Pb and As in food contact paper[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(4): 326-329.

[14] 朱晨, 蒋鑫. 陶瓷包装容器中铅、镉、铜、锌向食醋迁移的研究[J]. 现代食品, 2020, 26(18): 208-211.
ZHU C, JIANG X. Migration of lead, cadmium, copper and zinc from ceramic food packaging materials into vinegar[J]. Modern Food, 2020, 26(18): 208-211.

[15] 钟文健, 李冕锐, 吴婉君, 等. 食品接触用不锈钢制品在不同浓度含氯模拟物中重金属迁移行为研究[J]. 广东化工, 2019, 46(13): 34-35.
ZHONG W J, LI M R, WU W J, et al. Migration behavior of heavy metals in stainless steel with different concentrations of chlorine[J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(13): 34-35.

[16] REBENIAK M, WOJCIECHOWSKA-MAZUREK M, MANIA M, et al. Exposure to lead and cadmium released from

ceramics and glassware intended to come into contact with food[J]. Roczniki Panstwowego Zakladu Higieny, 2014, 65(4): 301-309.

[17] 刘立萍, 沈宏桂, 罗宏泉, 等. 返青箬叶中铜和锌在不同食品模拟物中迁移情况[J]. 包装工程, 2021, 42(21): 72-78.
LIU L P, SHEN H G, LUO H Q, et al. Migration of copper and zinc of regreen *Indocalamus* leaves in different food simulants [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(21): 72-78.

[18] 罗宏泉, 刘立萍, 沈宏桂, 等. 返青箬叶中铜向不同食品迁移的模拟研究[J]. 包装工程, 2023, 44(23): 135-141.
LUO H Q, LIU L P, SHEN H G, et al. Simulation on the migration of copper from regreened *Indocalamus* leaves to different food[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(23): 135-141.

[19] 姜紫薇, 胡长鹰, 石玉杰, 等. 纳米铜/聚丙烯复合膜中铜向食品模拟物的迁移及其对膜性能的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 68-74.
JIANG Z W, HU C Y, SHI Y J, et al. Migration of copper from nano-copper/polypropylene composite films and its effects on the properties of films[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(5): 68-74.

[20] 任彩霞, 汤庆峰, 马黎春, 等. 卤水盐度对铜活化—迁移影响的模拟实验[J]. 矿床地质, 2012, 31(S1): 515-516.
REN C X, TANG Q F, MA L C, et al. Simulation experiment on the effect of brine salinity on copper activation-migration [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(S1): 515-516.

[21] 任彩霞, 马黎春, 汤庆峰, 等. 低温常压条件下 NaCl-H_2O 体系对铜活化迁移的影响因素Ⅱ: pH 值和盐度[J]. 矿床地质, 2015, 34(3): 581-588.
REN C X, MA L C, TANG Q F, et al. Influence factors II: pH and salinity on copper activation migration in NaCl-H_2O system under condition of atmospheric pressure and low temperature[J]. Mineral Deposits, 2015, 34(3): 581-588.

[22] 董玉杰, 卢莉璟, 徐莉, 等. 食品接触用不锈钢材料中铬元素迁移规律[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(13): 254-260, 276.
DONG Y J, LU L J, XU L, et al. Migration regularity of Cr from food-contact stainless steel[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(13): 254-260, 276.

[23] 卢莉璟, 董玉杰, 徐莉, 等. 食品接触用不锈钢材料中镍、铅元素的迁移规律[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(5): 150-156.
LU L J, DONG Y J, XU L, et al. Migration law of nickel and lead from food-contact stainless steel to food[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(5): 150-156.

[24] 肖黎, 董占华, 孙长江, 等. 陶瓷食品接触材料中铅向酸性食品模拟物迁移的规律[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 15-24.
XIAO L, DONG Z H, SUN C J, et al. Migration pattern of lead from ceramic food contact materials into acidic food simulants[J]. Food Science, 2021, 42(1): 15-24.

[25] DONG Z H, LU L X, LIU Z G, et al. Migration of toxic metals from ceramic food packaging materials into acid food simulants[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2 014(1): 759018.

[26] DONG Z H, LU L X, LIU Z G. Migration model of toxic metals from ceramic food contact materials into acid food[J]. Packaging Technology and Science, 2015, 28(6): 545-556.

[27] LI Y. Migration of metals from ceramic food contact materials. 1: effects of pH, temperature, food simulant, contact duration and repeated-use[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 24: 100493.

[28] ADEREMI T A, ADENUGA A A, OYEKUNLE J A O, et al. High level leaching of heavy metals from colorful ceramic foodwares: a potential risk to human[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(20): 17 116-17 126.

[29] DEMONT M, BOUTAKHRIT K, FEKETE V, et al. Migration of 18 trace elements from ceramic food contact material: Influence of pigment, pH, nature of acid and temperature[J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(3/4): 734-743.

[30] 董占华. 陶瓷食品包装材料中重金属有害物的迁移试验与理论研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 3-4.
DONG Z H. Experimental and theoretical study on migration of heavy metals from ceramic food packaging material[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015: 3-4.