# 甘蔗浆餐盒在不同工况下释放产生的微颗粒分析

胡毅<sup>1</sup>, 莫春茹<sup>2</sup>, 余稳稳<sup>2</sup>, 胡长鹰<sup>1,2</sup>

(1.暨南大学 包装工程学院广东省普通高校产品包装与物流重点实验室,广东 珠海 519000;2.暨南大学 理工学院食品科学与工程系,广州 510000)

摘要:目的 研究植物基一次性甘蔗浆(Sugarcane Pulp, SCP)餐盒在经历高温高湿、摇晃、冷冻和微波等 工况后产生的微颗粒的粒径、浓度和形貌,为 SCP 餐盒的生产和规范使用等提供一定的参考。方法 根据购 买的 15 种商用 SCP 餐盒在水中的总迁移情况进行聚类分析,并利用激光衍射粒度分布仪测定不同组别的餐 盒在经历不同工况后,模拟与食品接触的过程中释放产生的微颗粒的粒径,利用扫描电子显微镜(SEM) 对产生的微颗粒数量浓度和形貌进行测定。结果 大部分 SCP 餐盒在 70 ℃的水中 2 h 的总迁移量超过 10 mg/dm<sup>2</sup>,经历不同工况后的产生的微颗粒的粒径主要集中在 0~500 µm,平均粒径主要分布在 (12.19±0.45)~(123.90±28.80)µm。SEM 结果显示,微颗粒大多呈纤维状和球状,可能是从餐盒的表面 直接脱落产生的。此外,模拟外卖配送的摇晃工况促进了微颗粒的脱落,且样品经过 270 d 的高温高湿处理 后表现出显著的促进作用(P<0.05)。结论 SCP 餐盒在水中脱落的微颗粒的平均粒径和浓度表现出了一定 的差异,且模拟外卖配送的摇晃工况会促进餐盒表面微颗粒的脱落,从而随饮食摄入进入人体。这类微颗 粒对有机污染物和金属离子具有一定的吸附作用,从而表现出一定的毒性,因此,一方面,应进一步对微 颗粒的毒性进行研究,另一方面,应改进和规范 SCP 餐盒的生产和使用,减少微颗粒或其他污染物的产生。 关键词:甘蔗浆餐盒;微颗粒;工况;迁移实验

中图分类号: TB484.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)05-0130-09 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.05.017

# Microparticles Released from Sugarcane Pulp Lunchbox under Different Working Conditions

HU Yi<sup>1</sup>, MO Chun-ru<sup>2</sup>, YU Wen-wen<sup>2</sup>, HU Chang-ying<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Product Packaging and Logistics of Guangdong Higher Education Institutes, College of Packaging Engineering, Jinan University, Guangdong Zhuhai 519000, China;

2. Department of Food Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the size, concentration, and morphological structure of microparticles released from sugarcane pulp (SCP) lunchbox under different conditions including high temperature and humidity, shaking, freezing and microwave, so as to provide some references for the production and normative use of SCP lunchbox. According to the overall migration value of microparticles released by 15 kinds of commercial SCP lunchboxes in water, cluster analysis was carried out, and the size of microparticles released by different groups of lunchboxes was measured by laser diffrac-

收稿日期: 2022-11-11

基金项目:广州市基础与应用基础研究项目(202102020309);广东省重点领域研发计划(2019B020212002);"十三五" 国家重点研发计划重点专项(2018YFC1603205)

作者简介:胡毅(1999—),女,硕士生,主攻为食品包装安全。

通信作者: 胡长鹰 (1968—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为食品包装技术与安全、功能性食品; 余稳稳 (1989—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能性碳水化合物。

• 131 •

tion particle size distribution analyzer after different working conditions during the simulated process of contact with food. The concentration and morphological structure of the released microparticles were determined by scanning electron microscope (SEM). The overall migration value of microparticles of most SCP lunchboxes in water (70 °C for 2 h) exceeded 10 mg/dm<sup>2</sup>, and the average size was mainly distributed between  $(12.19 \pm 0.45) \sim (123.90 \pm 28.80) \,\mu\text{m}$ . The size of the released microparticles after different working conditions was mainly in the range of  $0 \sim 500 \,\mu\text{m}$  and most of microparticles were fibrous and spherical, and might be produced by shedding from the surface of the lunchboxes. The shaking conditions simulating the take-out delivery process promoted the shedding of microparticles, and showed a significant promoting effect after 270 days of high temperature and high humidity treatments (P < 0.05). The average size and the concentration of SCP lunchbox microparticles to shed from the lunchbox surface and enter the human body with dietary intake. The microparticles have certain adsorption effects on organic pollutants and metal ions, thus showing specific toxicity. Therefore, on the one hand, the toxicity of microparticles should be further studied. On the other hand, the production and normative use of SCP lunchboxes should be improved and standardized.

KEY WORDS: sugarcane pulp lunchbox; microparticle; working conditions; migration test

在"碳达峰"和"碳中和"目标的提出后,各行业纷 纷致力于推进可降解等环境友好产品的研发和应用。 当前,植物基一次性甘蔗浆(Sugarcane Pulp, SCP) 餐盒成为外卖行业常用的聚丙烯(Polypropylene, PP) 餐盒的有限替代品。SCP 通常含有 33.5%~55%的纤 维素、17%~32%的半纤维素、17%~32%的木质素和 0.7%~8%的灰分<sup>[1-2]</sup>。SCP 餐盒是以制糖业废甘蔗渣 为原料,混合相关填料(如木薯淀粉<sup>[3]</sup>)等辅料,经 均质、成型、消毒而成的一种可堆肥的环保餐盒<sup>[4]</sup>。 Liu 等<sup>[5]</sup>以制糖业剩余的甘蔗渣为原料,添加竹纤维 以增强甘蔗渣浆的机械强度,开发了一种环保、完全 可生物降解、可回收和可堆肥的甘蔗浆餐具,并使用 烷基烯酮二聚体来改性餐盒的耐水性和耐油性。目 前,市面上的甘蔗浆餐盒通常具有外观洁净、强度和 韧性适中的优点,广受消费者和食品企业的追捧。

微塑料(粒径<5 mm 的塑料颗粒)的污染和危害 是当前全球关注的热点问题。例如,Su等<sup>[6]</sup>在蒸汽消毒 过的硅胶奶嘴的洗涤水中检测到由蒸汽诱导聚二甲基 硅氧烷原料和聚酰胺树脂添加剂降解产生的大量片状 或油膜状微(纳米)塑料(0.6~332 μm)。目前,已在 一次性塑料外卖餐盒和一次性纸杯中检出微塑料<sup>[7-9]</sup>, 这些微塑料大多与食品接触后从材料表面脱落/破碎进 入食品,随食物和饮用水摄入<sup>[10-11]</sup>,进入人体器官<sup>[12]</sup>、 血液<sup>[13]</sup>、胎盘<sup>[14]</sup>等部位后易引起氧化应激和炎症等反 应,且可能增加心血管和呼吸系统疾病或肺癌的死亡风 险<sup>[15]</sup>。与塑料餐盒类似,SCP 餐盒在与食品接触过程 中或被丢弃暴露在自然环境中也会产生微颗粒。

植物纤维制成的纸浆模塑餐盒吸湿性强且力学性 能差<sup>[16]</sup>,在实际使用过程中性能可能会发生改变。Jiang 等<sup>[17]</sup>比较了湿热处理、冻融循环和人工风化循环3种加 速老化方法对竹纤维餐盒的抗拉强度、动态黏弹性和化 学成分的影响。SCP 餐盒在实际使用过程中,可能会遭 受高温高湿的储存环境,摇晃、微波和冷藏或冷冻等使 用情况,这些条件可能会对产生的微颗粒的粒径、浓度 及形貌等产生影响。综上,本文基于以下 2 种假设展开 研究:一方面,基于材料性质的差异,可以推测 SCP 餐 盒产生的微颗粒数量要高于塑料餐盒(PP 餐盒)产生的 微颗粒数量;另一方面,餐盒在使用过程中可能经历的 工况,如摇晃(模拟外卖配送)、冷冻、微波等可能会影 响餐盒释放产生的微颗粒的粒径、数量浓度和形貌等。

# 1 实验

# 1.1 材料与仪器

主要材料:购买来自不同商家的15种一次性SCP 餐盒,这些餐盒均由甘蔗浆模塑而成,分别来自广州、 上海、江苏等9个省或直辖市。为避免餐盒受到污染, 所有餐盒收到后均避光密封保存,分别命名为 S-1—S-15,详细信息见表 1。其中使用测厚仪对餐 盒的厚度进行测定,即对餐盒底部正中的厚度进行5 次测定,并计算平均值。

餐盒产品说明书表明,这 15 种餐盒大多能承受 100 ℃以上的高温(S-13 仅能承受 80 ℃),且均具有防 水和防油的特性,适用于中西餐的盛放以及微波、冷藏 或冷冻等使用方式。除外卖平台的商家用来打包食物以 外,也有消费者自行购买并使用,省去清洗餐具的麻烦。

主要仪器:数显测厚规,德清盛泰芯电子科技有限公司;HCS-165A-A型BOD生化培养箱,广州恒 创实验仪器有限公司;SHA-CA型数显水浴恒温振荡器,常州澳华仪器有限公司;M1-L213B型微波炉,广 东美的厨房电器制造有限公司;BCD-603WKPZM(E) 型冰箱,合肥美的电冰箱有限公司;101-3AB型鼓风 干燥箱,天津泰斯特仪器公司;SALD-2300型激光衍 射粒度分布仪器,日本岛津公司;EVOMA15型扫描 电子显微镜,德国蔡司公司;Vortex KB3型涡旋混合 器,其林贝尔仪器制造有限公司。

表 1 SCP 餐盒的详细信息 Tab.1 Detail information of SCP lunchboxes

序号	样品命名	容积/mL	来源	厚度/mm
1	S-1	700	广州	$0.73 {\pm} 0.02$
2	S-2	700	苏州	$0.72{\pm}0.03$
3	S-3	500	山东	$0.69{\pm}0.00$
4	S-4	450	四川	$0.60{\pm}0.03$
5	S-5	550	浙江	$0.74{\pm}0.02$
6	S6	450	浙江	$0.63{\pm}0.05$
7	S-7	500	上海	$0.63 {\pm} 0.02$
8	S-8	500	安徽	$0.66{\pm}0.02$
9	S-9	600	上海	$0.65 {\pm} 0.02$
10	S-10	450	上海	$0.50{\pm}0.01$
11	S-11	650	上海	$0.61{\pm}0.03$
12	S-12	500	江苏	$0.62{\pm}0.03$
13	S-13	600	福建	$0.56{\pm}0.08$
14	S-14	500	天津	$0.71 {\pm} 0.02$
15	S-15	500	浙江	$0.75 {\pm} 0.07$

# 1.2 方法

## 1.2.1 总迁移分析

参考 GB 31604.1—2015<sup>[18]</sup>和餐盒的实际使用情况确定模拟迁移温度和迁移时间。餐盒的接触面积与 食物模拟物质量的比值为 6 dm<sup>2</sup>/kg,各种液态食品的 密度通常以 1 kg/L 计,即: 6 块面积为 1 cm<sup>2</sup>的餐盒 (采用双向迁移的面积 12 cm<sup>2</sup>)浸泡在提前预热 至 70 ℃的 20 mL 的食物模拟物中。选用水作为汤类 等水性食品的模拟物,每组 3 个平行,并设置空白对 照。于 70 ℃的烘箱中迁移 2 h 后,将迁移液倒入提 前恒重并冷却的蒸发皿中,置于水浴锅上蒸发至干 燥,将皿底水分擦干,转入(105±2)℃烘箱中恒重 2 h,再置于干燥器中冷却 40 min 至恒重,称量。根 据式(1)进行计算。

$$X_1 = \frac{m_1 - m_2}{V_2 \times S} \times V_1 \tag{1}$$

式中:  $X_1$ 为 SCP 餐盒的总迁移量, mg/dm<sup>2</sup>;  $m_1$ 为样品蒸发残渣的蒸发皿质量, mg;  $m_2$ 为空白蒸发皿的质量, mg;  $V_1$ 为浸泡液的总体积, mL;  $V_2$ 为测量用浸泡液的体积, mL; S为浸泡液接触面积, 即 12 cm<sup>2</sup>。

#### 1.2.2 微颗粒提取

在微颗粒提取前,需使用食品模拟物浸泡餐盒。 食品模拟物的体积根据餐盒规定的盛装体积来确定 (见表 1),即:一个餐盒对应的食品模拟物的体积 取自其规定的盛装食物的体积。采用全浸泡的方式将 餐盒完全浸没在提前预热至特定温度的模拟物中,浸 泡结束后,将餐盒小心夹出,并用去离子水轻轻冲洗 表面,并将冲洗液并入浸泡液中。

使用循环水式减压真空泵、砂芯过滤装置和0.22 µm

的尼龙滤膜的方式对浸泡液进行过滤。小心取出滤膜, 使用移液枪吸取 15 mL 去离子水将滤膜上的微颗粒冲 洗至三角锥形瓶中,少量多次冲洗,尽可能保证所有 微颗粒被冲洗进入锥形瓶中形成浓缩液。取 1 mL 用 于微颗粒的数量浓度的测定和形貌分析,并将其储存 在-20 ℃冷冻条件下,备用。剩余浓缩液用于粒径分 析测定。整个实验应紧闭实验室门窗,减少人员流动, 尽量减少环境中灰尘等微颗粒的影响。采用 3 组平 行,并设置过程空白以校正背景。

### 1.2.3 聚类分析

采用系统聚类的方法,以样品在 70 ℃的水中浸 泡 2 h 产生的微颗粒的平均粒径和总迁移量为变量, 组间连接为聚类方法,欧氏距离为测量区间,对 15 种 SCP 餐盒在不同食品模拟物中的迁移量进行分类 用于工况处理。

#### 1.2.4 工况处理

1)高温高湿处理。参考黄鑫茜等<sup>[19]</sup>的做法,将 样品储存在 50 ℃、相对湿度>80%的环境中,模拟餐 盒在储存过程中高温高湿的影响,并分别于第 0、90、 180 和 270 天取样,分别标记为 HS0、HS90、HS180、 HS270。高温高湿处理后的样品进一步与摇晃、微波 和冷冻等工况处理相结合。

2)摇晃工况。一般而言,外卖从商家到消费者 手中需要经过骑手配送的过程。在配送过程中,餐盒 会经历不同路况而引起摇晃,因此,使用水浴恒温振荡 器模拟了餐盒经历摇晃的过程,转速设置为 120 r/min, 水浴温度为 70 ℃,振荡时间为 60 min。

3)冷冻工况。冷藏或冷冻是保持食品新鲜度和延 长食品保质期的最常用手段。通过将餐盒置于-20 ℃冰 箱中冷冻 24 h来模拟短时冷冻对 SCP 餐盒产生的微 颗粒粒径、数量浓度和形貌的影响。

4) 微波工况。冷冻后的食品,需要经过复热后 才能食用,目前常用的复热方式是使用微波炉复热。 对冷冻后和摇晃前的餐盒进行微波炉复热,考察微波 对餐盒微颗粒产生的影响。根据生活经验,将火力设 置为 750 W 中高火,加热时间为 10 min,来模拟正 常食物加热的过程。

#### 1.2.5 工况设置及其组合

在整个餐盒的使用中,经历的工况并不单一,如 储存在高温高湿环境中的餐盒可能会受到摇晃、冷冻 或微波等工况,因此,本实验将高温高湿处理后 0、 90、180、270 d 的餐盒与摇晃、微波和冷冻工况相结 合,探讨其对 SCP 餐盒产生的微颗粒的粒径、数量 浓度和形貌的影响,具体组合方式见表 2。

在探讨工况时,根据 GB 31604.1—2015<sup>[18]</sup>选择 浸泡温度为 70 ℃,并根据实际使用情况(即从盛装 外卖食物到食用完毕通常在 60 min 左右)将浸泡时 间设置为 60 min。由于食品在配送过程中会与餐盒盖 发生接触,尤其是汤类食物,因此,考虑了餐盒盖产 生的微颗粒,即分成餐盒和餐盒盖两部分,同时将餐 盒和餐盒盖浸泡在与餐盒容积相等的模拟液(水)中。 由于不便于对餐盒摇晃后(即模拟外卖配送)再经微波 工况进行模拟,于是将微波处理工况提前至摇晃处理前 来考察微波的影响。每组均设置3个平行和空白对照。

表 2 串联工况设置及组合 Tab.2 Setting and combination of series working conditions

序号	样品名称	组合方式		
1	HS0/90/180/270	高温高湿处理后的餐盒		
	70 °C+60 min	在 70 ℃的水中浸泡 60 min		
2	1150/00/190/270	高温高湿处理后的餐盒		
	70 °C+W60	在 70 ℃的水浴中浸泡并摇		
	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	晃 60 min		
	1150/00/190/270	高温高湿处理后的餐盒经微		
3	HS0/90/180/2/0 70M+W60	波后在 70 ℃的水浴中浸泡		
	, 0111 - 11 00	并摇晃 60 min		
	1100/00/100/270	高温高湿处理后的餐盒−20℃		
4	HS0/90/180/270 R	冷冻24h后,在70℃的水中		
	R	浸泡 60 min		
	1100/00/100/000	高温高湿处理后的餐盒−20 ℃		
5	HS0/90/180/270 R+M	冷冻24h后,经微波复热后		
	1 1 1 1	在 70 ℃的水中浸泡 60 min		

#### 1.2.6 微颗粒测定

1) 微颗粒粒径测定。为避免因长时间放置导致 微颗粒团聚而使得粒径增大,提取后马上使用激光衍 射散射法进行粒径测定,并基于 LDR(光强分布再 计算)原理自动调整与待测颗粒适宜的折射率,即折 射率为1.35-0.00i。测量粒径范围为0.17~2500 μm。 由于颗粒分布的各向异性,同时为了减小偶然误差, 因此,每组设置3个平行,单个平行测量6次,取各 组平均值确定为粒度分布。

2)微颗粒定量和形貌分析。扫描电子显微镜用 于对 1.2.2 节中收集到的微颗粒进行颗粒数量浓度测 定和形貌观察。将储备液解冻后,使用涡旋仪震荡混 匀 1 min 后,吸取 10 μL 滴在贴有 Al 导电胶的铜台 上,经过 30 ℃的烘箱烘干后喷覆一层镀层,使用 SEM 调整合适的倍数使得可以观察到液滴边缘形成的"咖 啡环"内颗粒的数量浓度和形貌。借助 Photoshop 中的 二值化和计数工具对其进行计数,每组设置 3 个平 行。餐盒产生的微颗粒数量浓度按式(2)进行计算。

$$C = \frac{Q_i \times V_i \times 100}{V_0} \tag{2}$$

式中: C 为换算后浸泡液中的微颗粒数量浓度, 个/mL;  $Q_i$  为 SEM 图像中的微颗粒的总数量平均值, 个;  $V_i$  为浓缩液体积,  $V_i$ =15 mL;  $V_0$  为原始浸泡液体 积,即餐盒满载食物体积, mL(这里单样取用半个 餐盒和餐盒盖进行实验); 100 为体积换算。

# 1.3 数据处理

使用 Excel 2021 进行数据处理和图像绘制;使用 IBM SPSS Stastics 25 进行聚类分析和差异性分析; 使用 Adobe Photoshop 2020 中的二值化和计数功能对 SEM 图像中的颗粒进行计数。

# 2 结果与分析

### 2.1 15 种 SCP 餐盒在水中总迁移分析

一次性餐盒经常盛装如汤类等的水性食品,图1 为15种餐盒在水中的总迁移量分析结果。如图1a所示,S-1的迁移量最大,为(18.89±2.19)mg/dm<sup>2</sup>;S-14 的迁移量最小,为(4.44±0.39)mg/dm<sup>2</sup>。经过单因 素方差分析可知S-1与S-4、S-8—S-15之间存在极 显著差异(P<0.01)。总迁移结束后的蒸发残渣呈现 出白色的絮状纤维(图1b),其微观放大图(图1c) 与餐盒表面的SEM是一致的(图1d),因此可以推 测,这些不挥发的蒸发残渣主要是从SCP餐盒的内 表面脱落的,且这些蒸发残渣表现出具有一定形貌差 异的微颗粒状(粒径<5 mm)。

尽管在餐盒制备过程中往往需要加入防水剂阻止 食品中的水/油分渗透进入餐盒,如木质素<sup>[20]</sup>和烷基烯 酮二聚体,但实验结果表明,水浸泡餐盒产生的不挥发 性物质总迁移量仍然较高,但目前仍缺乏相关标准对这 类餐盒进行规范。由 GB 4806.8—2016<sup>[21]</sup>可知食品接触 用纸和纸板的总迁移量限量为 10 mg/dm<sup>2</sup>,而大部分样 品总迁移量均超过这一限量值。这可能是由于对样品 裁切后再进行全浸泡的方法使得物质从刀口处脱落, 从而使得总迁移量被高估。结论表明,15 种样品种 只有 S-9、S-13 和 S-14 的总迁移量符合标准。值得 注意的是,Hu 等<sup>[22]</sup>研究表明,SCP 餐盒中残留的糖 在与食品接触过程中可能促进了米饭中氨基酸的降 解,从而产生呋喃物质,如 2-戊基呋喃。目前,SCP 餐盒的安全性研究较少,其与食品之间的相互作用和从 表面脱落的不挥发性物质(微颗粒)值得引起注意。

#### 2.2 微颗粒平均粒径及样品分类

图 2a 是使用激光衍射粒度分布仪测定的从餐盒 脱落产生的微颗粒的平均粒径。由图 2a 可知, 15 种 SCP 餐盒在 70 °C的水中 2 h 产生的微颗粒的平均粒径 主要分布在(12.19±0.45)~(123.90±28.80)µm,其中 S-4 产生的微颗粒的平均粒径最大,其次是 S-1。S-7 产生的微颗粒的平均粒径最小,且与 S-4 和 S-1 之间 存在显著差异(*P*<0.05)。Liu 等<sup>51</sup>将长竹纤维与短甘蔗 渣纤维混合制备成了一种高度交织的复合材料,打浆 度(SR)为 20°~23°,材料中竹浆的平均纤维长度为 18.6µm,甘蔗渣纤维为 24.1µm。不同样品表现出的差 异性可能与用于制备餐盒的甘蔗浆或用于增强力学性 能的竹浆的打浆度<sup>[23]</sup>和浆料预处理方式<sup>[24-25]</sup>有关。





为了探究不同工况对 SCP 餐盒在释放的微颗粒 的影响,以15种 SCP 餐盒在70℃的水中2h总迁移 量和颗粒的平均粒径为变量,进行了快速、简单的系 统聚类分析。如图2b所示,15种餐盒被划分为2类, 以S-4和S-10为代表探究相关工况处理对餐盒产生 的微颗粒的粒径、数量和形貌的影响。

# 2.3 不同工况下产生的微颗粒粒径

图 3 为 S-4 和 S-10 在经历 90、180 和 270 d 的高温

高湿处理(温度为50℃、相对湿度>80%)后与摇晃、 微波和冷冻工况相结合在70℃的水中浸泡60min释 放的微颗粒的累积分布数据,将0d作为对照,并将 整个粒径范围细分为5个分量,包括<10、10~100、 100~500、500~1000和1000~2500μm。

如图 3a 所示, S-4 和 S-10 当在 70 ℃的水中浸 泡 60 min 后的微颗粒主要分布在 0~1 000 µm。与 S-10 不同,当 S-4 经过 270 d 的高温高湿处理后,其 在 70 ℃中浸泡 60 min 产生粒径小于 10 µm 的微颗粒 的占比显著减小,而粒径为 10~500 μm 的微颗粒占比 显著增大。这可能是由于餐盒在经受高温高湿后,稳 定性较差的甘蔗纤维性能发生改变<sup>[26]</sup>,在高湿的综合 作用下纤维发生断裂或降解等,从而导致脱落出的纤 维的粒径减小。同时,未经高温高湿处理的 S-4 和 S-10 在 70 ℃的水中摇晃 60 min 也都表现出这种现象。此外,结合图 5 可以确定,模拟外卖配送的摇晃工况会导致餐盒脱落产生更多粒径更大的微颗粒。



图 3 各工况产生的微颗粒的粒径堆积

Fig.3 Size stacking of microparticles generated under various working conditions 注: I 表示 70 ℃+60 min, II 表示 70 ℃+W60, III 表示 70M+60W。 微波工况对经高温高湿处理后的 S-4 的影响比 S-10 的影响明显,但在未经高温高湿处理的样品中 的影响表现出一致性,即在模拟外卖配送过程(摇 晃 60 min)前的微波工况会导致粒径小于 10 μm 的 微颗粒的占比增加。经高温高湿处理后 S-4 表现出 的相反作用,即微波工况降低了粒径小于 10 μm 的 颗粒的占比,但微波工况总体对 S-10 的影响不明显。 Wang 等<sup>[27]</sup>的研究表明,微波处理会导致玉米淀粉的 平均粒径增大,而微波工况处理对甘蔗浆这类植物 纤维制成的餐盒中的纤维长度及其相关力学性能的 影响及其背后的机理有待进一步研究。尽管微波工 况在一定程度上表现出对 SCP 餐盒产生微颗粒粒径 的影响,但是不同生产厂家生产餐盒的配方和工序 存在差异,对微波工况的敏感程度也是存在一定差 异性的。

如图 3b 所示,高温高湿、隔夜冷冻与微波相结 合的工况对微颗粒粒径产生的影响没有显著差异。总 体来说,粒径<10、10~100 和 100~500 μm 的微颗粒 占比分别为 29.23%~44.46%、27.47%~32.91% 和 22.92%~31.64%。

# 2.4 不同工况下产生的微颗粒数量浓度

餐盒在经历不同工况后产生的微颗粒数量浓度如 图 4 所示。与预期结果类似的是,摇晃工况增加了样品 从餐盒脱落的微颗粒的数量浓度,在经过高温高湿处理 270 d 后的样品中表现出显著作用(P<0.05)。其中, S-4 中脱落的颗粒浓度达到了(8600±466)个/mL, S-10 为(3133±266)个/mL,均显著高于 Du 等<sup>[9]</sup>在塑料外 卖容器中检测到的微颗粒(一周预定 4~7 次外卖可 能摄入 12~203 个微塑料 )。一方面, 高温高湿环境可 能[26]改变了餐盒的性能,如纤维长度减小导致餐盒的紧 密度变低。另一方面,摇晃过程进一步加速了微颗粒的 脱落。不同的是, 微波工况对经高温高湿处理 270 d 后 的 S-10 和 S-4 的影响表现出差异性,即微波抑制了 S-4 餐盒脱落的微颗粒,而进一步促进了 S-10 微颗粒释放。 图 5c 结果表明,高温高湿工况结合冷冻对餐盒产生的 微颗粒的影响不显著(P<0.05)。总体来说,微颗粒浓 度为(707±100)~(1117±323)个/mL。尽管各工况对 餐盒产生的微颗粒的影响的机理有待进一步研究,但 其产生的微颗粒的数量可能引起的安全问题是不能 忽视的。

## 2.5 不同工况下产生的微颗粒形貌

将 1.2.2 节中储存在-20 ℃冷冻条件下的储备 液解冻后,采用扫描电子显微镜观察微颗粒的形 貌。如图 5c 所示,将观察到的长纤维颗粒视为微 纤维颗粒,而将出现的球形和点状颗粒视为球状颗 粒,将交错、缠绕和其他形貌的微颗粒记录为其他 类别。





如图 5 所示,2 种餐盒在经历不同工况后脱落产 生的微颗粒的形貌占比的差异较小,且从图 5c 中明 确观察得知,纤维状的微颗粒主要是从餐盒内表面脱 落产生。由于未逐一对每一微颗粒进行定性分析, 尚不确定球状微颗粒的成分,但 SCP 餐盒在不同工 况下产生的球状微颗粒的占比较大,约为 50%,因 此,进一步对 SCP 餐盒产生的微颗粒,尤其是球状 微颗粒进行定性分析显得尤为重要。







# 3 结语

在本研究中,首次对市场上的 SCP 餐盒释放产 生的微颗粒展开研究,研究 SCP 餐盒在经历不同工 况后产生的微颗粒的粒径、数量浓度和形貌的差异。 研究结果表明,市场上大部分餐盒在水中的总迁移量 超过了 GB 4806.8—2016 食品接触用纸和纸板的规 定。这些不挥发的物质主要是从餐盒上脱落的微颗 粒,微颗粒的粒径主要集中在 0~500 µm,少部分粒 径大于 500 μm。纤维状和球状是微颗粒的主要形貌, 而其他形貌中仍也有纤维状的微颗粒交叠在一起。高 温高湿可能通过影响餐盒内纤维的长度和紧密度等 性能进一步影响餐盒在浸泡条件为温度 70 ℃、时间 60 min 的模拟条件下产生的微颗粒数量和粒径。微波 对这2类样品的影响表现出一定的差异,但总的来说 高温高湿结合冷冻及微波工况对 SCP 餐盒产生的微 颗粒没的粒径、数量和形貌有显著作用, 但摇晃工况 会导致更多微颗粒从餐盒表面脱落进入食品随饮食 摄入人体中,尤其是在经历高温高湿处理后的餐盒。 目前,对这类 SCP 等植物基餐盒产生的微颗粒的规 律和危害并未引起关注,一方面,餐盒微颗粒含有的

金属或吸附的其他化学物质的含量值得关注;另一方面,这类微颗粒及其吸附的化学物质引起的综合毒性 应予以关注。

#### 参考文献:

- MUSTAFA G, ARSHAD M, BANO I, et al. Biotechnological Applications of Sugarcane Bagasse and Sugar Beet Molasses[J]. Biomass Convers Bior, 2023, 13(2): 1489-1501.
- [2] SZCZERBOWSKI D, PITARELO A P, ZANDONÁ FILHO A, et al. Sugarcane Biomass for Biorefineries: Comparative Composition of Carbohydrate and Non-Carbohydrate Components of Bagasse and Straw[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 114: 95-101.
- [3] JIANG H, WANG G, CHEN F M, et al. Degradation Characteristics of Environment-Friendly Bamboo Fiber Lunch Box Buried in the Soil[J]. Forests, 2022, 13(7): 1008.
- [4] 胡毅,余稳稳,胡长鹰.植物基可降解一次性餐具及 其潜在危害研究进展[J].包装工程,2022,43(7): 63-74.

HU Yi, YU Wen-wen, HU Chang-ying. Research Progress of Plant-Based Degradable and Disposable Tableware and Its Potential Hazards[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 63-74.

- [5] LIU C, LUAN P C, LI Q, et al. Biodegradable, Hygienic, and Compostable Tableware from Hybrid Sugarcane and Bamboo Fibers as Plastic Alternative[J]. Matter-Us, 2020, 3(6): 2066-2079.
- [6] SU Yu, HU Xi, TANG Hong-jie, et al. Steam Disinfection Releases Micro(Nano)Plastics from Silicone-Rubber Baby Teats as Examined by Optical Photothermal Infrared Microspectroscopy[J]. Nature Nanotechnology, 2022, 17(1): 76-85.
- [7] FADARE O O, WAN Bin, GUO Liang-hong, et al. Microplastics from Consumer Plastic Food Containers: Are We Consuming It?[J]. Chemosphere, 2020, 253: 126787.
- [8] RANJAN V P, JOSEPH A, GOEL S. Microplastics and other Harmful Substances Released from Disposable Paper Cups into Hot Water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 404: 124118.
- [9] DU Fang-ni, CAI Hui-wen, ZHANG Qun, et al. Microplastics in Take-Out Food Containers[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 399: 122969.
- [10] NELMS S E, GALLOWAY T S, GODLEY B J, et al. Investigating Microplastic Trophic Transfer in Marine Top Predators[J]. Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987), 2018, 238: 999-1007.
- [11] CARBERY M, O'CONNOR W, PALANISAMI T. Trophic Transfer of Microplastics and Mixed Contaminants in the Marine Food Web and Implications for Human Health[J]. Environment International, 2018, 115: 400-409.
- [12] JENNER L C, ROTCHELL J M, BENNETT R T, et al. Detection of Microplastics in Human Lung Tissue Using μFTIR Spectroscopy[J]. The Science of the Total Environment, 2022, 831: 154907.
- [13] KUHLMAN R L. Letter to the Editor, Discovery and Quantification of Plastic Particle Pollution in Human Blood[J]. Environ Int, 2022, 167: 107400.
- [14] RAGUSA A, SVELATO A, SANTACROCE C, et al. Plasticenta: First Evidence of Microplastics in Human Placenta[J]. Environment International, 2021, 146: 106274.
- [15] PRATA J C, DA COSTA J P, LOPES I, et al. Environmental Exposure to Microplastics: An Overview on Possible Human Health Effects[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 702: 134455.
- [16] CÉLINO A, FRÉOUR S, JACQUEMIN F, et al. The Hygroscopic Behavior of Plant Fibers: A Review[J]. Frontiers in Chemistry, 2014, 1: 43.
- [17] JIANG Huan, WANG Ge, CHEN Fu-ming, et al. Effect

of Accelerated Aging on Bamboo Fiber Lunch Box and Correlation with Soil Burial Degradation[J]. Polymers, 2022, 14(19): 4220.

- [18] GB 31604.1 —2015, 食品安全国家标准 食品接触材 料及制品迁移试验通则[S].
   GB 316041—2015, National Food Safety Standard General Rules for Migration Test of Food Contact Materials and Products[S].
- [19] 黄鑫茜, 余稳稳, 胡长鹰. 淀粉基餐盒的霉变和堆肥 菌填埋降解分析[J]. 包装工程, 2021, 42(17): 39-46.
  HUANG Xin-qian, YU Wen-wen, HU Chang-ying.
  Analysis of Mold Deterioration and Composting Bacteria Bury Degradation of Starch-Based Meal Boxes[J].
  Packaging Engineering, 2021, 42(17): 39-46.
- [20] WANG H Q, WANG J L, SI S R, et al. Residual-Lignin-Endowed Molded Pulp Lunchbox with a Sustained Wet Support Strength[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 170: 113756.
- [21] GB 4806.8—2016, 食品安全国家标准 食品接触用纸 和纸板材料及制品[S].
  GB 48068—2016, National Food Safety Standard Food Contact Paper and Board Materials and Products[S].
- [22] HU Yi, ZHOU Xiang-long, HU Chang-ying, et al. HS-GC-IMS Identification of Volatile Aromatic Compounds of Freshly-Cooked Rice Packaged with Different Disposable Lunchboxes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 438: 129516.
- [23] KHRISTOVA P, KORDSACHIA O, PATT R, et al. Environmentally Friendly Pulping and Bleaching of Bagasse[J]. Industrial Crops and Products, 2006, 23(2): 131-139.
- [24] JIA W C, ZHOU M F, YANG C F, et al. Evaluating Process of Auto-Hydrolysis Prior to Kraft Pulping on Production of Chemical Pulp for End Used Paper-Grade Products[J]. Journal of Bioresources and Bioproducts, 2022, 7(3): 180-189.
- [25] PRABHU R, GANESH S, MAHESHA G, et al. Physicochemical Characteristics of Chemically Treated Bagasse Fibers[J]. Cogent Engineering, 2022, 9(1): 2014025.
- [26] NURAZZI N M, ASYRAF M R M, RAYUNG M, et al. Thermogravimetric Analysis Properties of Cellulosic Natural Fiber Polymer Composites: A Review on Influence of Chemical Treatments[J]. Polymers, 2021, 13(16): 2710.
- [27] WANG Lu-yu, WANG Meng, ZHOU Yi-han, et al. Influence of Ultrasound and Microwave Treatments on the Structural and Thermal Properties of Normal Maize Starch and Potato Starch: A Comparative Study[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131990.