灭菌乳中微纳米塑料污染的风险评估综述

马宏伟，许孝峰，王 静，任 魁，高文杰，郝瑞霞，葛旭升

内蒙古蒙牛乳业（集团）股份有限公司，内蒙古呼和浩特市 010000

摘 要：微纳米塑料（MNPs）在环境中广泛存在，其潜在生态毒性及健康风险已成为全球研究热点。MNPs具有良好亲脂性，但灭菌乳中MNPs的污染风险尚未引起关注。本研究分析原奶端及工厂端灭菌乳中MNPs的污染来源，论述MNPs的提取、检测和去除方法，尤其是膜分离技术在乳品行业中的应用。计算人体饮用灭菌乳接触MNPs的估计日摄入量（EDI）和致癌风险指数（MPCR），论述饮用灭菌乳中MNPs的风险。在此基础上，建议未来研究应重新评估MNPs联合污染物毒性效应及其在动植物体内的转移效率，建立标准化测定方法，以更好地评估MNPs通过食物链向人类富集并危害人类健康的风险。

关键词：微纳米塑料；暴露途径；灭菌乳；去除；风险评估

文章编号：1671–4393（2025）04–0089–09 DOI:10.12377/1671–4393.25.04.16

0 引言

塑料因成本低、轻便和耐用等优势，在众多行业中广泛应用，同时由于其化学性质稳定、能在环境中长期存在，被认为是一种持久性有机污染物[1]。随着塑料不断释放到环境中，在外力作用下逐渐降解成粒径更小的塑料颗粒，其中直径小于5 mm的塑料颗粒称为微塑料（MPs），直径小于1 μm的塑料颗粒称为纳米塑料（NPs），二者统称为微纳米塑料（MNPs）[2, 3]。目前已在海洋[4]、淡水[5]、土壤[6]、食品[7]等介质中检测到MNPs，类型包括：聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚氯乙烯（PVC）、聚氨酯（PU）、聚对苯二甲酸乙二酯（PET）、乙烯–

作者简介：马宏伟（1998–），男，新疆乌鲁木齐人，硕士，研究方向为生乳质量与食品安全研究；
许孝峰（1990–），男，吉林省敦化人，本科，研究方向为原奶食品安全管控；
王 静（1983–），女，内蒙古通辽人，本科，轻工高级工程师，研究方向为生乳质量与食品安全研究；
任 魁（1984–），男，内蒙古巴彦淖尔人，本科，轻工中级工程师，研究方向为原奶质量管理；
高文杰（1988–），女，内蒙古巴彦淖尔人，本科，研究方向为原奶质量管理；
郝瑞霞（1985–），女，内蒙古呼和浩特人，硕士，中级兽医师，研究方向为生乳质量与食品安全研究；
葛旭升（1985–），男，河北保定人，硕士，中级畜牧师，研究方向为原奶食品安全管控。

中国乳业线上阅读

醋酸乙烯酯（EVA）和聚苯乙烯（PS）。MNPs具有粒径小、比表面积大、亲脂性、疏水性强的特性，这使其可作为某些污染物、重金属甚至有毒物质的载体[8, 9]，此外塑料中的添加剂如邻苯二甲酸酯、双酚A、多溴二苯醚等也会随塑料的老化而浸出[10, 11]，最终通过环境或食物链释放其毒性。

MNPs与人类健康关系较密切。人体监测研究发现，肺部[12]、血液[13]、母乳[14]、胎盘[15]和粪便[16]样本中都检测到不同类型的MNPs，表明环境中的MNPs已进入人体。人体对MNPs的暴露途径主要是空气吸入、饮水/食物摄入以及皮肤、黏膜接触[17]。肺是吸入MNPs的主要靶向器官。Jenner等[12]证实了肺组织中MNPs沉积：13 个人体肺组织样本中，有11 个样本检出MNPs，平均为（0.69±0.84）个/g，其中PP和PET分别占总MNPs的23%和18%。人体经呼吸道摄入的大部分MNPs会被黏膜纤毛清除，但粒径≤10 μm的MNPs可躲避清除机制并沉积于肺深部，诱导肺部炎症细胞增殖。有研究评估人类通过空气和食物的日均暴露量分别为（594±269）个和（1 036±493）个[18]，可见通过空气和食物摄入是人体暴露MNPs的主要途径。目前已在海鲜[19]、饮用水[20]、蜂蜜[21]、果蔬[22]和牛奶[23]等多种食品中检测到MNPs。MNPs经口摄入后，主要作用于肠道。欧洲胃肠病学联合组织的一项研究首次在人类粪便中发现粒径50～500 μm的MNPs，类型多达9 种[16]。Yan等[24]研究指出，粪便MNPs浓度与炎症性肠病（IBD）严重程度呈正相关，IBD患者粪便中MNPs的浓度显著高于健康人群，而促炎介质的释放能诱导恶性肿瘤的形成和发展。此外，随着粒径的减小，MNPs吸附有毒物质并造成细胞氧化应激的能力随之增加。研究表明，MNPs在45 min内能在水中吸附约236 μg/L多环芳烃，从而增加摄入MNPs的患癌风险[25]。

MNPs污染是当前生态和健康研究领域的热点问题，国内外学者对MNPs的环境迁移、食物赋存、检测和生物毒性进行了广泛总结。牛奶作为消费量最大的食品种类之一，富含多种蛋白质、矿物质（钙、镁、钾、锌和磷）和维生素等营养物质，对人类健康和发育起关键作用。牛奶供应链跨度大且复杂，包括奶源供应、加工、包装和销售。从牧草种植到牧场饲喂、挤奶、再到产品加工以及最终包装，MNPs污染可能发生在各环节，但国内关于牛奶中MNPs污染的相关研究鲜有报道。本文以乳制品中灭菌乳为例，论述灭菌乳中MNPs污染来源、检测及去除方法，计算日摄入量和致癌风险指数，评估灭菌乳中MNPs的赋存风险，为今后开展牛奶MNPs污染综合防治提供参考。

1 灭菌乳MNPs的污染风险

1.1 奶牛食源污染

奶牛食源污染主要是饲料和饮水污染。农业土壤中的MNPs来源主要包括生活垃圾、地膜覆盖、污水灌溉和大气沉降[26, 27]。塑料地膜能提高地温、保持土壤湿度以及抑制杂草生长，在农业中广泛应用。一旦塑料在土壤中积聚，在紫外线辐射和生物分解的共同作用下，田间塑料会慢慢分解成MPs和NPs。西班牙最近一研究显示，覆盖塑料薄膜的农场土壤样本中均含有MNPs[（2 116±1 024）个/kg土壤]。检测粪便样本中，92%都检测到MNPs[（997±971）个/kg粪便][28]。研究表明，作物籽粒会富集土壤中的MNPs颗粒。研究人员利用荧光标记，证实MNPs能通过植物根系、维管组织、质外体途径和叶片发生累积和转移[29]。Li等[30]测试0.2 μm、0.5 μm、1 μm、2 μm和5 μm PS-MPs对玉米幼苗生长的影响，结果在玉米幼苗所有组织中观察到0.2 μm的PS-MPs，其主要积聚在木质部的细胞壁上，这证实了植物吸收与MNPs粒径大小有关。塑料颗粒本身携带电荷，由于静电吸引，可增强其在植物根系中的吸附，Wang等[31]发现，玉米叶片具有较高的吸附带正电荷塑料的能力，这些带正电塑料颗粒被叶片吸收后难以发生转移。综上所述，饲用植物对MNPs的吸收和转移受到MNPs粒径、表面电荷等因素影响，这使估算在植物对MNPs

中国乳业线上阅读

的吸收效率具有挑战性。此外，饲用植物包装可能造成二次污染。Meyer等[32]在屠宰的100 头牛中，发现30%的牛消化道中含有塑料，其中最丰富的是包裹干草包的网纤维和覆盖青贮饲料的塑料碎片。Wu等[33]对猪、鸡、奶牛场的饲料进行MNPs分析，结果表明，奶牛饲料的MNPs丰度最低[（36 ± 63）个颗粒/kg]，这可能是由于奶牛饲喂过程中使用的塑料制品相对较少（表1）。

表 1 不同国家的动物样本中检测到 MNPs 来源 [28，32~34]

动物	国家	样本	MNPs 种类	污染源	MNPs 丰度（个 /kg）
牛	中国	粪	PP、PE	饲料	36 ± 63
牛	中国	粪	PE、PET、PP	堆肥	4 520
羊	西班牙	粪	PE	青贮饲料	997 ± 971
牛、羊	德国	胃肠道	塑料碎片	摄入塑料	–

在衣物洗涤和日常洗护过程中，尼龙、腈纶、合成纤维以及微珠随生活用水排放到污水处理系统，小尺寸MNPs能穿过过滤系统流向地表水[35]。Tong等[36]研究中国38 个城市的自来水样本，MNPs平均为440 个颗粒/L。用该数值估算，假设牧场1 头奶牛的产奶量为36 kg/d，饮水量约为190.8 L/d（产奶量与饮水量之比约为1∶5.3），那么该奶牛每天通过饮水摄入约83 952 个MNPs。

MNPs在食源动物的转移是尚未得到广泛研究的领域，尤其是在家畜将植物营养转化为人类食用必需蛋白质方面发挥的关键作用。目前迫切需要确定可靠的方法来检测动物源性产品（如血、肉、乳）的MNPs丰度以及转移效率，这对整个食物链的全面风险评估至关重要。

1.2 加工过程污染

食品接触材料是牛奶受MNPs污染的重要来源。挤奶机挤出原料奶汇集到集乳罐，奶泵过滤后输送至缓存罐。机械过滤是牧场原料奶过滤中的一种工艺，过滤孔径100～250 μm，牛奶中的脂肪球及其他营养成分可通过过滤纸，而稻草、毛发、昆虫、粪便等颗粒物质则被截留，同时可去除原料奶中较大的MNPs，低于100 μm的MNPs通过初滤，流转到后续过程。原料奶与冰水在不锈钢板式换热器中换热降温，通过输奶管道输送到奶仓保温储存，奶仓冷藏鲜奶通过奶泵输送到奶罐车，直至运输到工厂进行过滤、灭菌、均质、灌装操作，最终来到消费者的餐桌上。

食品级不锈钢罐体一般不涉及MNPs污染。牛奶中MNPs污染的主要来源可能在加工、包装过程。膜过滤作为一种有效的浓缩、分离、提取技术已被广泛应用于灭菌乳加工的各环节，热塑性砜聚合物是灭菌乳工艺中常用的膜材料[37]。Da Costa Filho等[23]研究表明，牛奶加工过程中，由于超滤膜和微滤膜的磨损会引入聚砜塑料（PSU）。Kutralam-Muniasamy等[38]调查MNPs在全脂和脱脂牛奶中的含量，发现小于11 μm的MNPs平均有（6.5 ± 2.3）个，同样证实PSU的存在。此外，研究人员在MNPs表面微孔发现硅（Si）、铝（Al）、钛（Ti）、铅（Pb）、镁（Mg）、钠（Na）、氯（Cl）和铁（Fe）等金属成分（表2）。

1.3 包装容器污染

MNPs的脂溶性较强，牛奶会逐渐渗透塑料内

表 2 牛奶中 MNPs 的赋存 [38~42]

食品类型	国家	MNPs 丰度	MNPs 种类	MNPs 大小
脱脂奶	厄瓜多尔	16 ～ 53 MNPs/L	PP、PE	2.48 ～ 183.37 μm
全脂、脱脂奶	墨西哥	6.5 ± 2.3 MNPs/L	PE、PP、PSU	> 11 μm
牛奶 A	土耳其	6 ± 5 MNPs/L	PP、PET、PU、EVA	–
原料奶	土耳其	19 MNPs/100 mL	PE、PP	1 ～ 5 000 μm
牛奶 B	孟加拉国	182.27 ± 55.13 MNPs/L	PE、PET、PS、PP	> 0.1 mm

中国乳业线上阅读

部，塑料聚合物分子间距增大，相互作用力降低，塑料逐渐断键并脱落[29]。目前市售的乳制品除巴氏鲜奶、奶粉等少数采用玻璃或金属包装外，主要使用的聚合物是PET，可能会增加包括灭菌乳在内的乳制品MNPs污染风险。一项关于袋装和罐装奶粉的研究表明，塑料包装与MNPs释放有关。袋装奶粉[（7±3）个/100 g）]污染程度高于罐装奶粉[（4±3）个/100 g]。此外，婴儿奶瓶被认为是MNPs的潜在来源，Zhang等[43]研究发现，奶瓶的MNPs比奶粉高6 倍以上。Li等[44]将奶瓶灭菌并暴露在70 ℃水中，发现释放的MNPs颗粒多达1 620 万个/L；水温升至95 ℃时，每升可释放多达5 500 万个PP-MNPs。水壶、饭盒等其他聚丙烯塑料器皿中，MNPs颗粒的释放量与聚乙烯婴儿奶瓶的MNPs释放量呈相似水平。

2 灭菌乳MNPs的检测方法

灭菌乳中MNPs，一方面在奶牛代谢、产品加工等过程中，可产生多种存在形态，另一方面由于其具有较多的活性位点、较大的比表面积等，可不断吸附重金属、病原体、污染物，产生复杂共同体，这不仅对灭菌乳质量和消费者健康造成潜在影响，同时也增加MNPs的提取和定量鉴定难度。

2.1 MNPs 的提取

在提取灭菌乳MNPs的过程中，既要去除蛋白质、矿物质和维生素等非塑料干扰物质，同时要保证不损坏塑料颗粒及产生新的MNPs，样品化学消解和物理过滤是常用方法。消解法是对生物样品进行的首要预处理，样品常通过酸性酶解、碱性酶解进行预处理。酸性酶解可降解不同塑料（如PA和PU）；利用氢氧化钾（KOH）的碱性消化已被证明不会影响大多数塑料类型，同时在降解有机物质方面有很高效率[45]。

过滤是提取液体中MNPs的最佳方式。Kutralam-Muniasamy等[38]对23 种品牌牛奶加热处理，将样品泵入过滤器（孔径0.22 μm、0.45 μm、5 μm和11 μm）中过滤，随后检测MNPs。Da Costa Filho等[23]在乳样中使用多酶洗涤、热碱水解来消化有机物，通过硅滤膜过滤（孔径5 μm），建立一种有效的提取方法，Buyukunal等[41]验证了该方法的有效性。

除化学消解和物理过滤外，密度分离也能对MNPs分离提取。使用由氯化钠（NaCl）、溴化钠（NaBr）、碘化钠（NaI）和溴化锌（ZnBr）制成不同盐水溶液，在自来水中测试MNPs的回收率，结果表明，NaI和ZnBr溶液与沉积物中的高密度聚合物一起使用时，MNPs的回收率最高[46]。

但在提取过程中可能发生其他杂质引入或MNPs丢失，因此亟需一个可控的环境来确保提取效果的稳定。

2.2 MNPs 的检测

灭菌乳中MNPs定量分析常借助肉眼或光学显微镜识别，该方法操作简单、成本低廉，但人的感知差异容易造成计数错误，不同实验人员用显微镜检测相同MNPs样本，会得出不同结论[47]。

合成聚合物具有独特的拉曼光谱。拉曼光谱技术利用非弹性散射光频移来识别未知粒子成分，分析聚合物的振动模式，能够通过光谱比较进行MNPs分类。与显微镜结合时，显微-拉曼光谱可表征尺寸范围1～10 μm的MNPs[48]。Schymanski等[49]通过激发波长为532 nm的微拉曼光谱鉴定，在瓶装水和饮料中发现PET、PE、PP和PA存在，范围1～500 μm。但环境样品中颜料、添加剂或污染物荧光效应会影响拉曼光谱法对样品的测量，因此，识别样品拉曼光谱前需纯化样品，减少荧光对光谱的影响。

热裂解-气相色谱-质谱法（PY-GC-MS）是一种定量鉴定MNPs的技术。合成聚合物能产生特定的裂解产物，据此可对原样品进行表征鉴定。王燕等[50]建立了一种PY-GC-MS快速定性定量分析灭菌乳中常见的4 种MNPs的方法。但不同聚合物热解过程中可能产生相似裂解产物，这些产物在热解曲

中国乳业线上阅读

线上可能相互重叠，导致最终分析结果出现偏差。

傅立叶变换红外光谱法（FTIR）是目前准确识别MNPs的最佳方法，根据聚合物独特红外光谱鉴定特定MNPs，FTIR衰减全反射（ATR）、透射和反射模式都可应用于MNPs的测定分析。Visentin等[51]利用FTIR对8 个欧洲国家奶粉中MNPs进行定性定量分析，结果证实了该方法的有效性：脱脂奶粉中PP、PE、PS和PET较丰富。

3 灭菌乳MNPs去除

液体中MNPs去除方法包括：混凝/沉降、活性炭过滤、臭氧消毒等。考虑到灭菌乳严格的质量要求和加工工艺，本文主要介绍膜分离技术。膜分离技术是使用特定半透膜过滤器，将一种混合液体浓缩或分离成两种不同成分液体的分离技术。根据膜孔径或其截留性能的不同，可将膜分离分为微滤（MF，孔径0.1～10 μm）、超滤（UF，孔径0.01～0.1 μm）、纳滤（NF，孔径1 nm）和反渗透（RO，0.1 nm）4 类。膜分离可有效去除奶中的细菌、孢子和悬浮物，可作为去除MNPs的方法。从原料奶验收到产品上市过程中，牛奶通过膜滤过，理论上可去除大部分MNPs。

Ziajahromi等[52]结合UF和RO，实现对＞25 μm的MNPs去除效率超过92%。然而，RO过程的高压操作可能损伤滤膜。Pizzichetti等[53]研究20～300 μm的尼龙和聚苯乙烯微塑料对不同材料滤膜（聚碳酸酯、醋酸纤维素和聚四氟乙烯）的磨损影响，结果显示，硬度较低的醋酸纤维素膜更易磨损。Da Costa Filho等[23]在奶中检测到滤过膜的材料—PSU。因此，当用膜分离技术处理牛奶时，需针对开发更抗磨损的膜材料，避免过滤过程中的二次污染。

4 灭菌乳MNPs风险评估

风险评估是评价污染物是否对生态环境和人类健康造成影响的重要手段。MNPs在环境中的积累和生物放大作用导致其在高营养级生物体内浓度上升，这些MNPs通过动物源性产品（肉、蛋、奶等）最终被人类摄入。

由于MNPs在人体内有潜在毒性，评估其摄入风险尤为重要。本研究基于表3数据，提取MNPs的丰度，与《中国居民膳食指南（2022）》[54]中推荐的饮食摄入量标准结合，计算MNPs的估计日摄入量（EDI）和致癌风险指数（MPCR）。

本研究运用以下公式计算食物中MNPs的EDI（个/kg·d或个/L·d）和MPCR：

$$EDI=（C\times IR）/BW;$$

$$MPCR=EDI\times CSF\times 10^{-3}$$

式中，C为食物中MNPs的丰度（个/kg·d或个/L·d）；IR为推荐摄入量（个/kg·d或个/L·d）；BW为假定成人70 kg体重；CSF是癌症斜率因子，即对被评估为致癌物的化学物的计算参数。计算结果如表3所示。

本研究按食物的日推荐最大摄入量计算EDI，饮用水中的EDI，本文的计算结果与Ravanbakhsh等[55]结果相似（2.1 个/L·d）。本研究主要探讨的灭菌乳EDI计算结果高于白业冉等[58, 59]结果（0.03 个/L·d），这可能是由于样本数量差异所致，此外由于分离、检测方法以及滤膜孔径不同，也会影响结果。

通过上述公式评估MPCR。美国环境保护署规定，可接受的癌症风险范围为1×10^{-6}～1×10^{-4}[5]。本研究在评估灭菌乳MPCR的基础上，增加对水和啤酒的评估。饮用灭菌乳和啤酒的风险较低，因为计算数值与可接受范围相当。在现有数据基础上，饮用瓶装水的风险是牛奶的20 倍。未来需要更多数据来准确评估摄入不同食物的风险。

5 结论与展望

MNPs作为新型污染物在环境中普遍存在，对人体潜在健康风险备受关注。人体通过饮水/食物–消化系统、空气–呼吸系统、洗护品/衣物–皮肤途径暴

中国乳业线上阅读

表 3 食物中 MNPs 的 EDI 和 MPCR 的计算

类别	国家	MNPs 平均丰度（个 /L・d）	相同物种丰度均值（个 /L・d）	推荐日摄入量（L）	EDI（个 /L・d）	MPCR
牛奶 [38，39，40]	厄瓜多尔 墨西哥 土耳其	16 ~ 53 6.5 ± 2.3 6 ± 5	15.70	0.50	0.11	2.64×10^{-5}
瓶装水 [49，55]	德国 伊朗	118 63.9 ± 38.9	81.93	1.70	1.99	5.37×10^{-4}
啤酒 [56，57]	美国 德国 墨西哥	0 ~ 14.3 12 ~ 109 28 ± 5.29	31.88	0.75	0.34	9.18×10^{-5}

露MNPs，其中饮水/食物是主要暴露途径。MNPs在人体内的生物利用度较低，较大尺寸的MNPs能通过粪便排出，小尺寸MNPs通过血液循环沉积到组织、器官，引起炎症、遗传毒性甚至诱导癌症，应高度重视。目前MNPs的研究主要集中在海鲜、果蔬、饮用水上，忽略了乳制品。乳制品供应链比海鲜更复杂。本文以灭菌乳为例，综述从牧场到工厂可能的暴露途径，涉及饲用植物、动物转化以及产品加工、包装。地区、灭菌乳种类、MNPs提取、检测方法的差异制约了灭菌乳中MNPs赋存的研究进展。在风险评估方面，本研究计算了灭菌乳中MNPs的EDI和MPCR，饮用牛奶、瓶装水和啤酒MNPs的EDI分别为0.11 个/L・d、1.99 个/L・d、0.34 个/L・d，饮用牛奶、瓶装水和啤酒的MPCR分别为2.64×10^{-5}、5.37×10^{-4}、9.18×10^{-5}。

目前灭菌乳中MNPs赋存的风险评估存在局限性，未来应重点考虑以下几个方面：

（1）食品基质差异使不同动物源性产品的分析标准极具挑战性，应建立MNPs提取和测定的国家参考标准，为监测灭菌乳生产、运输过程中MNPs污染提供支持。

（2）现有研究主要围绕环境介质MNPs的赋存，食物中MNPs的溯源仍存在空白，应研究动植物对MNPs的转移效率，加强原奶中MNPs污染的监测水平。

（3）目前研究多集中在MNPs对污染物（如多环芳烃、全氟、抗生素、农药）的吸附能力，但几种联合物质对哺乳动物的毒理学机制研究较少，MNPs联合污染物的毒性效应有待重新评估。

参考文献

[1] Emenike E C，Okorie C J，Ojeyemi T，et al.From oceans to dinner plates：The impact of microplastics on human health[J].Heliyon，2023，9（10）：20440.

[2] Schwaferts C，Niessner R，Elsner M，et al.Methods for the analysis of submicrometer– and nanoplastic particles in the environment[J].TrAC，Trends in Analytical Chemistry（Regular ed.），2019，112：52–65：.

[3] Barboza L G A，Dick V A，Lavorante B R B O，et al.Marine microplastic debris：An emerging issue for food security，food safety and human health[J].Marine Pollution Bulletin，2018，133：336–348.

[4] Sharma S，Chatterjee S.Microplastic pollution，a threat to marine ecosystem and human health：A short review[J].Environmental Science and Pollution Research International，2017，24（27）：21530–21547.

[5] Ebere E，Wirnkor V，Rakib M R J.Application of Index Models for assessing freshwater microplastics pollution[J].Natural Science，2021，38：37–48.

[6] Azeem I，Adeel M，Ahmad M ，et al.Uptake and accumulation of nano/microplastics in plants：A critical review[J].Nanomaterials（Basel，Switzerland），2021，11（11）：2935.

[7] Lee J H，Kim M J，Kim C S，et al.Detection of microplastic traces in four different types of municipal wastewater treatment plants through FT–IR and TED–GC–MS[J].Environmental Pollution（1987），2023，333：122017.

[8] Alam O，Yang L，Yanchun X.Determination of the selected

中国乳业线上阅读

heavy metal and metalloid contents in various types of plastic bags[J].Journal of Environmental Health Science and Engineering，2019，17（1）：161–170.

[9] Archana P，Atul N V，Ramesh K A.Microplastic properties and their interaction with hydrophobic organic contaminants：A review[J].Environmental Science and Pollution Research，2022，29（33）：49490–49512.

[10] Liu X，Shi H，Xie B，et al.Microplastics as both a sink and a source of Bisphenol A in the marine environment[J].Environmental Science and Technology，2019，53（17）：10188–10196.

[11] Li S，Ma R，Zhu X，et al.Sorption of tetrabromobisphenol A onto microplastics：Behavior，mechanisms，and the effects of sorbent and environmental factors[J].Ecotoxicology and Environmental Safety，2021，210：111842.

[12] Jenner L C，Rotchell J M，Bennett R T，et al.Detection of microplastics in human lung tissue using μFTIR spectroscopy[J].Science of the Total Environment，2022，831：154907.

[13] Leslie H A，Van Velzen M J M，Brandsma S H，et al.Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood[J].Environment International，2022，163：107199.

[14] Ragusa A，Notarstefano V，Svelato A，et al.Raman microspectroscopy detection and characterisation of microplastics in human breastmilk[J].Polymers，2022，14（13）：2700.

[15] Zhu L，Zhu J，Zuo R，et al.Identification of microplastics in human placenta using laser direct infrared spectroscopy[J].The Science of the Total Environment，2023，856：159060.

[16] Ho Y W，Lim J Y，Yeoh Y K，et al.Preliminary findings of the high quantity of microplastics in faeces of Hong Kong residents[J].Toxics（Basel），2022，10（8）：414.

[17] Wu P，Lin S，Cao G，et al.Absorption，distribution，metabolism，excretion and toxicity of microplastics in the human body and health implications[J].Journal of Hazardous Materials，2022，437：129361.

[18] Yadav H，Sethulekshmi S，Shriwastav A.Estimation of microplastic exposure via the composite sampling of drinking water，respirable air，and cooked food from Mumbai，India[J].Environmental Research，2022，214（Pt 1）：113735.

[19] Jabeen K，Su L，Li J，et al.Microplastics and mesoplastics in fish from coastal and fresh waters of China[J].Environmental Pollution（1987），2016，221：141–149.

[20] Pivokonsky M，Cermakova L，Novotna K，et al.Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water[J].The Science of the Total Environment，2018，643：1644–1651.

[21] Liebezeit G，Liebezeit E.Non–pollen particulates in honey and sugar[J].Food additives & contaminants. Part A，Chemistry，analysis，control，exposure & risk assessment，2013，30（12）：2136–2140.

[22] Conti G O，Ferrante M，Banni M，et al.Micro– and nano–plastics in edible fruit and vegetables.The first diet risks assessment for the general population[J].Environmental Research，2020，187：109677.

[23] Da Costa Filho P A，Andrey D，Eriksen B，et al.Detection and characterization of small–sized microplastics（≥5 μm）in milk products[J].Science Reports，2021，11（1）：24046.

[24] Yan Z，Liu Y，Zhang T，et al.Analysis of microplastics in human feces reveals a correlation between fecal microplastics and inflammatory bowel disease status[J].Ecotoxicology and Public Health，2021，56（1）：414–421.

[25] Sharma M D，Elanjickal A I，Mankar J S，et al.Assessment of cancer risk of microplastics enriched with polycyclic aromatic hydrocarbons[J].Journal of Hazardous Materials，2020，398：122994.

[26] 刘沙沙，付建平，郭楚玲，等.微塑料的环境行为及其生态毒性研究进展[J].农业环境科学学报，2019，38（5）：957–969.

[27] Hurley R R，Nizzetto L.Fate and occurrence of micro（nano）plastics in soils：Knowledge gaps and possible risks[J].Current Opinion in Environmental Science & Health，2018，1：6–11.

[28] Beriot N，Peek J，Zornoza R，et al.Low density–microplastics detected in sheep faeces and soil：A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain[J].The Science of the Total Environment，2021，755（Pt 1）：142653

[29] 于旻晥，郭鑫，刘睿杰，等.植物油中微塑料污染潜在风险及控制[J].中国油脂，2023，48（9）：89–92.

[30] Li H，Chang X，Zhang J，et al.Uptake and distribution of microplastics of different particle sizes in maize（Zea mays）seedling roots[J].Chemosphere（Oxford），2023，313：137491.

[31] Wang L，Wu W M，Bolan N S，et al.Environmental fate，toxicity and risk management strategies of nanoplastics in the environment：Current status and future perspectives[J].Journal of Hazardous Materials，2021，401：123415.

[32] Meyer G，Puig–Lozano R，Fern á ndez A.Anthropogenic litter in terrestrial flora and fauna：Is the situation as bad as in the ocean? A field study in Southern Germany on five meadows and 150 ruminants in comparison with marine debris[J].Environmental Pollution（1987），2023，323：121304.

[33] Wu R T，Cai Y F，Chen Y X，et al.Occurrence of microplastic in livestock and poultry manure in South China[J].Environmental Pollution，2021，277（22）：116790.

[34] Zhang J，Li Z，Zhou X，et al.Long–term application of organic compost is the primary contributor to microplastic

中国乳业线上阅读

pollution of soils in a wheat–maize rotation[J].The Science of the Total Environment，2023，866：161123.

[35] Lei K，Qiao F，Liu Q，et al.Microplastics releasing from personal care and cosmetic products in China[J].Marine Pollution Bulletin，2017，123（1–2）：122–126.

[36] Tong H，Jiang Q，Hu X，et al.Occurrence and identification of microplastics in tap water from China[J].Chemosphere，2020，252：126493.

[37] 任向东，王春燕，牛世祯，等.膜分离技术在乳品工业中的应用前景[J].现代食品，2020（16）：55–60.

[38] Kutralam–Muniasamy G，P é rez–Guevara F，Elizalde–Mart í nez I，et al.Branded milks – Are they immune from microplastics contamination? [J].The Science of the Total Environment，2020，714：136823.

[39] Diaz–Basantes M F，Conesa J A，Fullana A.Microplastics in honey，beer，milk and refreshments in Ecuador as emerging contaminants[J].Sustainability，2020，12（14）：5514.

[40] Başaran B，Özçifçi Z，Akcay H T，et al.Microplastics in branded milk：Dietary exposure and risk assessment[J].Journal of Food Composition and Analysis，2023，123：105611.

[41] Buyukunal S ，Rbaibi Zipak S，Muratoglu K.Microplastics in a traditional Turkish dairy product：Ayran[J].Polish Journal of Food and Nutrition Sciences，2023，73（2）：139–150.

[42] Chakraborty T K，Hasan M J，Netema B N，et al.Microplastics in the commercially available branded milk in Bangladesh：An emerging threat for human health[J].Journal of Hazardous Materials，2024，477：135374.

[43] Zhang Q，Liu L，Jiang Y，et al.Microplastics in infant milk powder[J].Environmental pollution（1987），2023，323：121225.

[44] Li D，Shi Y，Yang L，et al.Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation[J].Nature Food，2020，1（11）：746–754.

[45] Löeder M G J，Imhof H K，Ladehoff M ，et al.Enzymatic purification of microplastics in environmental samples[J].Environmental Science & Technology，2017，51（24）：14283–14292.

[46] Sridhar A，Kannan D，Kapoor A，et al.Extraction and detection methods of microplastics in food and marine systems：A critical review[J].Chemosphere，2021，286：131653.

[47] Dekiff J H，Remy D，Klasmeier J，et al.Occurrence and spatial distribution of microplastics in sediments from Norderney[J].Environmental Pollution（1987），2014，186：248–256.

[48] 薛晓熠，沈之霞.微塑料的主要来源及其检测方法研究进展[J].塑料包装，2023，33（6）：39–45.

[49] Schymanski D，Goldbeck C，Humpf H U，et al.Analysis of microplastics in water by micro–Raman spectroscopy：Release of plastic particles from different packaging into mineral water[J].Water Research（Oxford），2018，129：154–162.

[50] 王燕，朱谷焕，保琦蓓，等.热裂解–气相色谱–质谱法快速筛查和定量分析乳与乳制品中的4 种微塑料[J].食品安全质量检测学报，2022，13（24）：8017–8025.

[51] Visentin E，Manuelian C L，Niero G，et al.Characterization of microplastics in skim–milk powders[J].Journal of Dairy Science，2024，107（8）：5393–5401.

[52] Ziajahromi S，Neal P A，Rintoul L，et al.Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics：Development of a new approach to sample wastewater–based microplastics[J].Water Research（Oxford），2017，112：93–99.

[53] Pizzichetti A R P，Pablos C，Álvarez–Fern á ndez C，et al.Evaluation of membranes performance for microplastic removal in a simple and low–cost filtration system[J].Case Studies in Chemical and Environmental Engineering，2021，3：100075.

[54] 《中国居民膳食指南（2022）》在京发布[J]. 营养学报，2022，44（6）：521–522.

[55] Ravanbakhsh M， Ravanbakhsh M，Jamali H A，et al.The effects of storage time and sunlight on microplastic pollution in bottled mineral water[J].Water and Environment Journal，2023，2：206–217.

[56] Liebezeit G，Liebezeit E.Synthetic particles as contaminants in German beers[J].Food Additives & Contaminants Part A，Chemistry，Analysis，Control，Exposure & Risk Assessment，2014，31（9）：1574–1578.

[57] Shruti V C，P é rez–Guevara F，Elizalde–Mart í nez I，et al.First study of its kind on the microplastic contamination of soft drinks，cold tea and energy drinks – Future research and environmental considerations[J].Science of the Total Environment，2020，726：138580.

[58] 白业冉，张佳佳，白润昊，等.食物源微塑料研究方法和风险评估综述[J].环境科学，2025，46（2）：1155–1167.

[59] 余森艳，梁海龙，黄璋，等.花香型葡萄植物基酸奶工艺优化[J].中国乳业，2024（8）：130–136.

A Review of the Risk Assessment of Micro Nano Plastics Contamination in Sterilized Milk

MA Hongwei，XU Xiaofeng，WANG Jing，REN Kui，GAO Wenjie，HAO Ruixia，

下转103页

中国乳业线上阅读

Study on the Determination of Methyl Chlorpyrifos Residues in Milk and Milk Powder by Gas Chromatography–tandem Mass Spectrometry

ZHAO Fengru[1, 2, 3], XIE Kaili[1], SHUI Ming[1, 2, 3], CONG Huimin[1, 2, 3], XUE Wenqiang[1], LI Qiqi[1], DAI Jingjing[1], LONG Yang[1], WANG Ruoyi[1, 2, 3]

[1]Beijing Dairy Cattle Center, Beijing 100192

[2]Key Laboratory of Dairy Cattle Genetic, Breeding and Reproduction, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100192

[3]Beijing Key Laboratory of Dairy Cattle Genetic, Breeding and Reproduction, Beijing 100192

Abstract: [Objective]By selecting the appropriate analytical chromatographic column, the pretreatment process of the sample was simplified, and the suitable ion pairs were selected for monitoring, the sensitivity and accuracy of the method were improved. [Method] The parallelism (precision) of the samples, the recovery rate of spiked samples (accuracy), and the detection limit of the method were determined to verify the detection method. [Result] The recovery rates of methyl chlorpyrifos added to milk were 105.3%, 106.9% and 108.2%, and the coefficients of variation at the three addition levels were 1.61%, 3.06% and 2.52%. The recovery rate of methyl parathion added to milk powder were 100.3%, 89.8% and 88.5%, and the coefficients of variation at the three addition levels were 2.14%, 1.97% and 1.82%.[Conclusion]The precision and accuracy of this method met the requirements and it could be used for the determination and quality control of daily methyl chlorpyrifos residues in milk and milk powder.

Keywords: methyl chlorpyrifos; gas chromatography-mass spectrometry/mass spectrometry combined instrument; milk; milk powder

▲上接96页

GE Xusheng

Inner Mongolia Mengniu Dairy (Group) Co., Ltd., Hohhot Inner Mongolia 010000

Abstract: Micro nano plastics (MNPs) exist widely in the environment, and their potential ecotoxicity and health risks have become a global research focus. MNPs have good lipophilicity, but the contamination risk of MNPs in sterilized milk has not been concerned. This study analyzed the source of MNPs contamination in raw milk end and factory end sterilized milk, and discussed the extraction, detection and removal methods of MNPs, especially the application of membrane separation technology in dairy industry. The estimated daily intake (EDI) of MNPs and Modified Cancer Risk (MPCR) of human exposure to MNPs in drinking sterilized milk were calculated to discuss the risks of MNPs in drinking sterilized milk. On this basis, it is suggested that future research should re-evaluate the toxic effects of MNPs combined pollutants and their transfer efficiency in animals and plants, and establish standardized determination methods to better assess the risk of MNPs enrichment to humans through the food chain and harm human health.

Keywords: micro and nano plastic; exposure pathway; sterilized milk; removal; risk assessment

中国乳业线上阅读