DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251205003
引用格式: 申艳毅, 彭喜洋, 王昕, 等. 乳粉包装材料中 19 种有机磷酸酯检测分析及风险评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 27–33.
SHEN YY, PENG XY, WANG X, *et al*. Detection analysis and risk assessment of 19 kinds of organophosphate esters in milk powder packaging materials [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 27–33. (in Chinese with English abstract).

乳粉包装材料中 19 种有机磷酸酯检测分析及风险评价

申艳毅[1,2], 彭喜洋[1], 王　昕[3], 徐　尚[2*]

[1. 澳优乳业(中国)有限公司, 长沙　410200; 2. 暨南大学包装工程学院, 珠海　519070;
3. 常州工业及消费品检验有限公司, 常州　213000)

摘　要: 目的　研究乳粉包装材料中 19 种有机磷酸酯(organophosphate esters, OPEs)的迁移特征与合规风险, 并开展针对性食品安全风险评价。**方法**　选取 12 款典型乳粉包装材料[罐装、袋装及生产用聚乙烯(polyethylene, PE)袋], 采用液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)测定 19 种目标 OPEs 迁移量, 结合危害分析与暴露水平开展针对性风险评估。**结果**　12 款材料中 7 款检出 OPEs, 共识别出三正丁基磷酸酯(tri-n-butyl phosphate, TnBP)、磷酸三苯酯(triphenyl phosphate, TPhP)及三(2,4-二叔丁基苯基)磷酸酯[tris(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphate, AO168O] 3 种目标化合物。其中 AO168O 检出率最高(41.67%), 最大迁移量为 0.02970 mg/kg。合规性评价表明, TnBP 符合 GB 9685—2016《食品安全国家标准 食品接触材料及制品用添加剂使用标准》限量要求, TPhP 与 AO168O 暂无相关法规明确授权使用。风险评估结果显示, 常规人群暴露风险系数为 0.088%~1.650%, 婴幼儿为 0.789%~14.850%, 整体风险处于可接受水平。**结论**　本研究明确了乳粉包装材料中 OPEs 的迁移现状与风险水平, 为乳粉生产及包装企业建立 OPEs 全链条风险排查与溯源机制、重点管控 AO168O 迁移风险提供了数据参考。

关键词: 乳粉包装材料; 有机磷酸酯; 危害评估; 婴幼儿; 食品安全风险

Detection analysis and risk assessment of 19 kinds of organophosphate esters in milk powder packaging materials

SHEN Yan-Yi[1,2], PENG Xi-Yang[1], WANG Xin[3], XU Shang[2*]

[1. *Ausnutria Dairy* (*China*) *Co*., *Ltd*., *Changsha* 410200, *China*; 2. *College of Packaging Engineering*, *Jinan University*, *Zhuhai* 519070, *China*; 3. *Changzhou Industrial and Consumer Products Inspection Co*., *Ltd*., *Changzhou* 213000, *China*]

ABSTRACT: Objective　To investigate the migration characteristics and compliance risks of 19 kinds of organophosphorus esters (OPEs) in milk powder packaging materials, and conduct targeted food safety risk assessment. **Methods**　This study selected 12 typical milk powder packaging materials [including canned, bagged,

收稿日期: 2025-12-05
第一作者: 申艳毅(1992—), 女, 硕士, 主要研究方向为食品接触材料法规标准及合规管理。E-mail: yanyi.shen@ausnutria.com
***通信作者:** 徐尚(1982—), 男, 硕士, 主要研究方向为金属食品包装质量与安全。E-mail: xs@szdaman.com

and production-use polyethylene (PE) bags], determined the migration amounts of 19 kinds of target OPEs by liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS), and conducted a targeted risk assessment by integrating hazard analysis and exposure levels. **Results** OPEs were detected in 7 out of 12 materials, with 3 kinds of target compounds identified, namely tri-n-butyl phosphate (TnBP), triphenyl phosphate (TPhP), and tris(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphate (AO168O). Among them, AO168O had the highest detection rate (41.67%) with a maximum migration amount of 0.02970 mg/kg. Compliance evaluation showed that TnBP met the limit requirements of GB 9685—2016 *National food safety standard-Uses of additives in food contact materials and articles*, while there were no explicit relevant regulations that clearly authorize the use of TPhP and AO168O. Risk assessment indicated that the exposure risk quotients of OPEs ranged from 0.088% to 1.650% for the general population and from 0.789% to 14.850% for infants and young children, with the overall risk being at an acceptable level. **Conclusion** This study clarifies the migration status and risk levels of OPEs in milk powder packaging materials, providing data reference for milk powder production and packaging enterprises to establish a full-chain OPEs risk investigation and traceability mechanism and focus on controlling the migration risk of AO168O.

KEY WORDS: milk powder packaging materials; organophosphorus esters; hazard assessment; infants and young children; food safety risk

0 引 言

有机磷酸酯(organophosphate esters, OPEs)作为一类人工合成的磷酯衍生物, 按取代基可分为烷基类、芳基类和卤代烷基类[1]。因其兼具优异阻燃性与增塑性能, OPEs 多通过物理混合方式广泛应用于商业及工业产品中[2], 但由于未与基材形成化学键结合, 其在生产、运输和使用环节中易通过浸出、挥发、磨损等途径释放至环境中, 最终引发广泛的暴露风险。目前, OPEs 已在水、空气、室内灰尘、沉积物等多种环境介质中被普遍检出[3–4], 更在食品[5–6]、母乳[7]、尿液[8]等生物样品中被发现, 提示其具有生物蓄积性且可通过食物链进入人体。尤为值得关注的是, 2025 年发表的一篇文献显示, 在上海市场上采集到的 68 份婴幼儿配方奶粉中, 95%的样品中至少检出了 8 种 OPEs[9]。婴幼儿作为生理机能尚未发育成熟的高敏感群体, 其暴露于 OPEs 的风险直接引发了食品等相关行业对该类污染物的高度警惕。

虽然 OPEs 的加工与阻燃性能突出, 但其健康危害已被证实, 典型 OPEs{如磷酸三(2-氯丙基)酯[tris(2-chloroisopropyl)phosphate, TCiPP]、磷酸三苯酯[triphenyl phosphate, TPhP]、磷酸三丁酯[tributyl phosphate, TnBP]}可干扰人体内分泌系统、损伤神经系统和生殖功能, 长期暴露可能引发神经毒性、生殖毒性、发育毒性、内分泌毒性及潜在致癌性等[10–11]。此外, 由有机亚磷酸酯抗氧化剂(organophosphite antioxidants, OPAs)转化形成的新型 OPEs, 如三(2,4-二-叔丁基苯基)磷酸酯[tris(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphate, AO168O]也不容忽视, 尽管有关新型 OPEs 的生态与健康风险还很少被关注, 但由于 AO168O 与 TPhP 含有相同的骨架结构, 因此可能具有相似的毒理作用[12–13]。更关键的是, OPEs 常作为食品接触材料(food contact materials, FCMs)的工业添加剂使用[14–15], 存在通过材料迁移至食品的核心风险。为此, 我国、欧盟、美国等均出台了针对性管控法规, GB 9685—2016《食品安全国家标准 食品接触材料及制品用添加剂使用标准》仅授权 2-乙基己基二苯基磷酸酯(2-ethylhexyl diphenyl phosphate, EHDPP)、TnBP、磷酸三乙酯(triethyl phosphate, TEP)、磷酸三异丁酯(triisobutyl phosphate, TiBP) 4 种 OPEs 在塑料、油墨、涂层及黏合剂等 FCMs 中使用, 并设定迁移限量(specific migration limit, SML)分别为 2.4、0.05、60、60 mg/kg, 为 FCMs 中 OPEs 的合规使用提供了基础依据。

乳粉作为高密度营养食品, 其包装形式具有独特性, 主要分为罐装(包含马口铁罐身、罐底盖、塑料盖、奶粉勺)和袋装(铝塑复合材料)两大类, 其中婴幼儿乳粉多采用罐装形式, 包装与乳粉接触时间长、频次高, OPEs 迁移风险显著高于普通食品包装[16–17]。此前, 常州工业及消费品检验有限公司对市场上铝塑复合膜袋、涂层罐等 49 批产品的 OPEs 迁移风险进行筛查, 有 10 批产品检出 OPEs 迁移, 涉及 TPhP、TEP、TnBP, 其中 TEP 最高检出浓度达 0.77 mg/kg, 证实 FCMs 中 OPEs 迁移问题客观存在。因此, 针对乳粉特定包装材料中 OPEs 开展研究分析至关重要。

当前, 关于 FCMs 中 OPEs 的研究主要集中于检测技术的开发与优化, 如曹慧等[18–19]建立分散固相萃取-液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS), 实现可降解 FCMs 中 28 种 OPEs 的准确定量; 黄志远等[20]采用微波萃取-气相色谱-质谱法

(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS), 完成软包装材料中 5 种 OPEs 的定量分析; 杜成等[21]和余敏[22]则建立 GC-MS, 实现聚乳酸(polylactic acid, PLA)制品中 7 种 OPEs 的测定。然而, 现有研究多聚焦于通用型材料, 针对乳粉包装这一特殊品类的专项研究较为匮乏。本研究以乳粉包装材料为研究对象, 选取奶粉罐、罐底盖、塑料盖、配套奶粉勺、条包复合袋及乳粉生产过程中使用的聚乙烯(polyethylene, PE)包装袋等共 12 款典型样品, 对包装材料中 19 种 OPEs 迁移量进行检测及风险评估, 旨在为乳粉生产及包装企业识别高关注 OPEs 风险、制定科学管控措施提供技术参考, 进而保障乳粉(尤其婴幼儿乳粉)的质量安全。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

测试样品: 奶粉罐样品 1, 批号 267304, 标记为 A1; 奶粉罐样品 2, 批号 20250517, 标记为 A2; 罐底盖样品 1, 批号 270820, 标记为 B1; 罐底盖样品 1, 批号 20250812, 标记为 B2; 塑料盖样品 1, 批号 272991, 标记为 C1; 塑料盖样品 2, 批号 20250709, 标记为 C2; 奶粉勺样品 1, 批号 274026, 标记为 D1; 奶粉勺样品 2, 批号 20250505-003, 标记为 D2; 条包复合袋样品 1, 批号 590007830, 标记为 E1; 条包复合袋样品 2, 批号 20240814, 标记为 E2; PE 袋样品 1, 批号 274421, 标记为 F1; PE 袋样品 2, 批号 B2508325, 标记为 F2。

甲醇(色谱纯, 德国默克公司); 甲酸(色谱纯, 上海泰坦科技股份有限公司); 乙酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 乙醇(分析纯, 上海泰坦科技股份有限公司); 异辛烷(色谱纯, 常州大恒化工有限公司)。

1.2　仪器与设备

AB4500 液相色谱-三重四极杆质谱仪[离子源: 电喷雾离子源(electron spray ionization, ESI), 色谱柱: Agilent Poroshell 120 Aq-C_{18} (2.1 mm×100 mm, 2.7 μm), 美国 AB Sciex 公司]; Elix Essential 5+Milli-Q EQ 7000 型超纯水纯化系统(德国默克 Milli-Q 公司); D-1000 Transferpette 型移液器(德国普兰德公司); XS205DU 型万分之一分析天平(瑞士梅特勒托利多公司); FD-260 型烘箱(德国宾得公司)。

18 种 OPEs 混标溶液{磷酸三甲酯(trimethyl phosphate, TMP)、TEP、磷酸三丙酯(tripropyl phosphate, TPrP)、磷酸三异丙酯(triisopropyl phosphate, TiPP)、TnBP、TiBP、磷酸三正戊酯(triamyl phosphate, TnPtP)、TPhP、磷酸三甲苯酯(tricresyl phosphate, TMPP)、磷酸三(2-异丙基苯基)酯[tris(2-isopropylphenyl) phosphate, TiPPP]、磷酸三(2-丁氧乙基)酯[tris(2-butoxyethyl) phosphate, TBOEP]、磷酸三(2-氯乙基)酯[tris(2-chloroethyl) phosphate, TCEP]、磷酸三(2-乙基己基)酯[tris(2-ethylhexyl) phosphate, TEHP]、EHDPP、磷酸三(1,3-二氯-2-丙基)酯[tris(1,3-dichloro-2-propyl)phosphate, TDCiPP]、TCiPP、2,2-二(氯甲基)-1,3-丙二醇双[双(2-氯乙基)磷酸酯]{2,2-bis(chloromethyl)-1,3-propanediol bis[bis(2-chloroethyl) phosphate], V6}、磷酸三(2,3-二溴丙基)酯[tris(2,3-dibromopropyl) phosphate, TDBPP]}(质量浓度为 10 mg/L)、AO168O 标准溶液(质量浓度为 100 mg/L)(上海安谱璀世标准技术服务有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　迁移测试

依据 GB 31604.1—2023《食品安全国家标准 食品接触材料及制品迁移试验通则》要求, 采用 50%(体积分数)乙醇作为乳粉模拟物, 设定 60 ℃、10 d 迁移实验参数, 模拟乳粉常温存储 2 年条件。样品经提取后, 采用 LC-MS/MS 进行定量分析。

1.3.2　安全风险评估

针对检出物质, 首先依据国内外相关法规进行合规性评价, 如无法规可依, 则对该物质从危害性、暴露水平及风险表征方面进行针对性安全风险评估。

(1)危害评估

结合权威数据库或待评估物质毒理学资料, 依据 GB 15193.18—2015《食品安全国家标准 健康指导值》, 计算其健康指导值(health based guidance values, HBGV)。若待评估物质缺乏上述相关资料, 则参考欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)2012 年发布的《基于毒理学关注阈值(threshold of toxicological concern, TTC)概念为潜在人体健康风险提供建议的方案探讨》, 采用 TTC 方法进行风险评估。

(2)暴露评估

根据待评估物质的特定迁移量测试结果, 分不同人群开展膳食暴露量(estimated daily intake, EDI)计算。常规人群参考 EFSA 膳食暴露量计算方法, 假设 60 kg 体重的成年人, 每日摄入 1 kg 含目标物质的 FCMs 所包装的食品, 常规人群 EDI= 最大特定迁移量(M_{max})×1 kg food/(person • d)×(60 kg BW)$^{-1}$[23]。根据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)《饮用水质量指南》统计数据, 体重 5 kg 的瓶喂婴幼儿, 每日食品消耗量为 0.75 L(因婴儿无额外饮水, 该摄入量均为母乳或配方奶), 因此, 瓶喂婴幼儿 EDI=物质的迁移量(μg/kg)×0.15 kg/(kg • d)。

(3)风险表征

采用风险系数法进行风险表征, 风险系数=(EDI/HBGV 或 TTC)×100%, 当风险系数<20%时, 判定为在预期使用情况下, 该物质的食品安全风险较低[24–25]。

1.4　数据处理

采用包含 19 种 OPEs 的混合标准溶液进行分析。首

先通过 LC 对目标化合物进行分离，获得其保留时间，继而使用 AB Triple Quad 5500+质谱检测器在多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM)模式下采集其特征离子对信号，依据目标化合物的保留时间及其特征离子对的丰度比与标准品一致进行定性确认。借助配套的 MutiQuant 3.0.2 绘制色谱图，对校准曲线进行拟合(通常采用线性或加权线性回归模型)，并对色谱峰进行积分获取峰面积。随后，利用 WPS Office 2021 对定量结果进行整理与基础统计分析，并运用 OriginPro 2021 进行专业图表绘制。

2 结果与分析

2.1 迁移测试结果

通过对 12 款乳粉包装材料中 19 种 OPEs 迁移量进行测试，7 款包装材料中共检出 3 种 OPEs 物质，分别为 TnBP、TPhP、AO168O。其中，AO168O 检出率最高，涉及奶粉罐 A1，奶粉勺 D2，条包复合袋 E1，PE 袋 F1、F2 共 5 款样品，最大迁移量为 0.02970 mg/kg；TnBP 仅在罐底盖 B1 中检出，迁移量为 0.00292 mg/kg；TPhP 仅在条包复合袋 E2 中检出，迁移量为 0.02760 mg/kg。具体测试结果如表 1 所示。

对于 TnBP，GB 9685—2016 中对其限量要求为 0.05 mg/kg，允许在油墨中添加使用。经合规性评价，其检测结果符合 GB 9685—2016 要求。由于被检样品罐底盖外侧印有蓝色油墨图案，考虑可能是在印刷收卷或堆叠过程中，油墨中的物质通过卷材发生反粘，从印刷表面迁移到了食品直接接触层[26]。

对于 TPhP，GB 9685—2016 中未授权使用，且未查询到国外相关法规限量要求，因此需对条包复合袋 E2 样品中的 TPhP 开展安全风险评估。结合该包装材料生产工艺特性，需重点排查其是否通过胶黏剂所用助剂(如阻燃或增塑类助剂)引入。

对于 AO168O，GB 9685—2016 和国外均无相关法规限量要求，因此需对检出该物质的奶粉罐 A1，奶粉勺 D2，条包复合袋 E1，PE 袋 F1、F2 5 款样品中的 AO168O 开展安全风险评估。值得注意的是，AO168O 是三(2,4-二叔丁基苯基)亚磷酸酯(antioxidant 168，AO168)(CAS 号 31570-04-4)的氧化衍生物，两者具有相似的化学结构，从污染溯源角度看，AO168O 的检出多与 AO168 的广泛使用有关[27]。AO168 是一种常用的 OPAs，由于其具有很强的

表 1 乳粉包装材料中 OPEs 迁移测试结果(mg/kg)

Table 1 Test results of OPEs migration in milk powder packaging materials (mg/kg)

序号	名称	CAS 号	LODs/LOQs	奶粉罐		罐底盖		塑料盖		奶粉勺		条包复合袋		PE 袋	
				A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2
1	TMP	512-56-1	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2	TEP	78-40-0	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
3	TPrP	513-08-6	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
4	TiPP	513-02-0	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
5	TnBP	126-73-8	0.001/0.003	ND	ND	0.00292	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
6	TiBP	126-71-6	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
7	TnPtP	2528-38-3	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
8	TPhP	115-86-6	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.02760	ND	ND
9	TMPP	1330-78-5	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10	TiPPP	64532-95-2	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
11	TBOEP	78-51-3	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
12	TCEP	115-96-8	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
13	TEHP	78-42-2	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
14	EHDPP	1241-94-7	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
15	TDCiPP	13674-87-8	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
16	TCiPP	13674-84-5	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
17	V6	38051-10-4	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
18	TDBPP	126-72-7	0.001/0.003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
19	AO168O	95906-11-9	0.005/0.010	0.02810	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.01240	0.02970	ND	0.00543	0.01870

注：检出限(limit of detection, LOD)；定量限(limit of quantitation, LOQ)；ND 表示未检出(小于 LOD)。

抗氧化性且毒性较低, 广泛应用于塑料等领域[28], 欧盟法规(EU) No 10/2011、美国 FDA 21 CFR 177.1520 以及 GB 9685—2016, 都对 AO168 的使用设定了要求[29]。虽然 GB 9685—2016 中规定 AO168 可以作为抗氧剂添加到塑料、涂料、黏合剂、纸、橡胶等 FCMs 中, 最大 SML 不得超过 60 mg/kg, 但并未授权使用 AO168O。在美国, AO168O 已作为商业中的“活性”化合物被美国环境保护局列入有毒物质控制法清单中[13]。鉴于 AO168O 骨架结构与芳基的相似性, 即便现有关生态环境及健康危害报道较少, 相关毒理学研究数据也较为有限, 但仍不可忽视其带来的潜在安全风险[30]。

2.2　安全风险评估结果

针对上述待评估物质, 通过权威数据库查询, TPhP 的 HBGV 为 0.525 mg • kg^{-1} • d^{-1}。AO168O 因缺乏官方发布的 HBGV, 采用 TTC 方法获取其 TTC 值, 该化合物属于有机磷和氨基甲酸酯类, 对应的 TTC 值为 0.018 mg/d, 即 0.0003 mg/kg BW[31]。参考 EFSA 和 WHO 风险评估方法, 分别计算出检出物质在不同应用场景下(即使用人群为常规人群和婴幼儿时)的 EDI, 然后得出 6 款检出样品中迁移出 OPEs 的风险系数。具体风险系数见表 2。

根据安全风险评估结果, 在使用人群为常规人群(非婴幼儿)时, 所有检出物质的风险系数分布在 0.088%~1.650%之间, 在使用人群为婴幼儿时, 所有检出物质的风险系数分布在 0.789%~14.850%之间, 整体食品安全风险处于可接受水平。虽然在婴幼儿暴露场景中, 奶粉罐 A1 与条包复合袋 E1 的 AO168O 风险系数与 20%的阈值仍存在一定差距, 但考虑到我国与 EFSA 的暴露评估模型、人群暴露特征存在潜在差异, 且这两款样品检出物质的风险系数已达到了 14%, 因此建议予以关注, 后续可开展溯源排查并实施必要的管控措施, 进一步减低其引起的食品安全风险。

表 2　待评估物质的风险系数总结

Table 2　Summary of risk coefficients of the substance to be evaluated

物质名称	迁移量/(mg/kg)	常规人群		婴幼儿	
		EDI/(mg • kg^{-1} • d^{-1})	风险系数/%	EDI/(mg • kg^{-1} • d^{-1})	风险系数/%
TPhP (E2)	0.02760	0.00046	0.088	0.00414	0.789
AO168O (A1)	0.02810	0.00047	1.561	0.00422	14.050
AO168O (D2)	0.01240	0.00021	0.689	0.00186	6.200
AO168O (E1)	0.02970	0.00050	1.650	0.00446	14.850
AO168O (F1)	0.00543	0.00009	0.302	0.00081	2.715
AO168O (F2)	0.01870	0.00031	1.039	0.00281	9.350

3　讨论与结论

本研究采用 LC-MS/MS 技术, 对 12 款典型乳粉包装材料(含罐装、袋装及生产过程用 PE 袋)中 19 种 OPEs 的迁移量进行了系统检测与分析。结果显示, 12 款样品中 7 款检出 OPEs, 共涉及 3 种目标污染物, 包括 TnBP、TPhP、AO168O。其中, AO168O 检出率最高(41.67%), 覆盖 5 款不同类型包装材料, 最大迁移量为 0.02970 mg/kg。合规性评价表明, TnBP 符合 GB 9685—2016 限量要求, 而 TPhP 与 AO168O 目前暂无 FCMs 相关法规明确授权使用。风险评估结果显示, 常规人群暴露风险系数分布在 0.088%~1.650%之间, 婴幼儿暴露风险系数分布在 0.789%~14.850%之间, 整体食品安全风险处于可接受水平。但考虑在婴幼儿暴露场景中, 奶粉罐 A1 与条包复合袋 E1 的 AO168O 风险系数均达到了 14%, 建议引起必要关注, 通过溯源排查和管控进一步减低风险。

综上, 为进一步提升乳粉包装材料的安全水平, 乳粉生产及包装企业应构建 OPEs 全链条风险排查与溯源管控体系。鉴于 AO168O 在本次检测中检出率最高、涉及包装类型最广, 应将其作为重点关注对象, 优先选用法规授权的 OPEs 类添加剂, 并通过提供符合性声明等方式, 向产业链下游清晰传递 OPEs 使用信息, 确保其在生产全流程中得到有效管控。行业层面需协同发力, 加快完善 OPEs 危害分类与风险评估体系, 强化 AO168O 等衍生物的专项毒理学研究与数据积累, 建立标准化检测方法, 为行业合规生产、质量监督及风险管控提供技术支撑。本研究为乳粉包装材料中 OPEs 风险识别与管控措施优化提供了数据参考, 后续可进一步扩大研究样本量与覆盖范围, 探究不同使用场景下 OPEs 的迁移规律, 为完善相关安全标准、保障乳粉质量安全提供更全面的技术支持。

参考文献

[1] 吴雨婕, 金衍健, 曹柳燕, 等. 有机磷酸酯的污染现状及检测方法研究进展[J]. 环境科学与管理, 2025, 50(7): 108–113.
WU YJ, JIN YJ, CAO LY, *et al*. Research progress on pollution status and detection methods of organophosphate esters [J]. Environmental Science and Management, 2025, 50(7): 108–113.

[2] 陈世存. 有机磷酸酯分析检测及其危害评估[D]. 杭州: 中国计量大学, 2022.

CHEN SC. Analysis and hazard assessment of organophosphate esters [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2022.

[3] 薛珍珠, 查萍萍, 闪宝伊, 等. 环境中阻燃剂检测技术研究进展[J]. 环境科学与管理, 2025, 50(5): 123–128.
XUE ZZ, ZHA PP, SHAN BY, *et al*. Recent advances in analytical technique for detection of environmental flame retardants [J]. Environmental Science and Management, 2025, 50(5): 123–128.

[4] 张弛, 郭丽, 李爱民. 环境中新型阻燃剂检测技术研究进展[J]. 中国环境监测, 2022, 38(4): 13–22.
ZHANG C, GUO L, LI AIM. Research progress of detection technology of novel flame retardants in the environment [J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(4): 13–22.

[5] 王轩, 郭战辉, 张弛, 等. 超高效液相色谱-高分辨质谱法测定牛奶中 7 种有机磷酸酯类阻燃剂[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(5): 692–698.
WANG X, GUO ZH, ZHANG C, *et al*. Determination of seven organophosphate esters in milk by ultra performance liquid chromatography-high-resolution mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2023, 35(5): 692–698.

[6] 张晓华, 赵繁荣, 胡建英. 我国人群有机磷阻燃剂暴露评估及其健康风险[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(3): 155–165.
ZHANG XH, ZHAO FR, HU JY. Exposure assessment and health risk of organophosphate flame retardants in general population in China [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(3): 155–165.

[7] KIM J, ISOBE T, MUTO M, *et al*. Organophosphorus flame retardants (PFRs) in human breast milk from several Asian countries [J]. Chemosphere, 2014, 116(11): 91–97.

[8] CHEN Y, FANG J, REN L, *et al*. Urinary metabolites of organophosphate esters in children in South China: Concentrations, profiles and estimated daily intake [J]. Environmental Pollution, 2018, 235: 358–364.

[9] DU RQ, ZHOU J, ZHANG SP, *et al*. Detection and screening of organophosphate esters in infant formula from Shanghai, China: Distribution characteristics and risk evaluation [J]. Food Additives & Contaminants, 2025, 42(4): 465–478.

[10] 赵曼淇, 刘璟. 有机磷酸酯类阻燃剂内分泌干扰效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 2025, 20(3): 122–134.
ZHAO MQ, LIU J. Endocrine-disrupting effects of organophosphate ester flame retardants [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2025, 20(3): 122–134.

[11] EGLOFF C, CRUMP D, PORTER E, *et al*. Tris (2-butoxyethyl) phosphate and triethyl phosphate alter embryonic development, hepatic mRNA expression, thyroid hormone levels, and circulating bile acid concentrations in chicken embryos [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2014, 279(3): 303–310.

[12] LI Z, CHEN R, XING C, *et al*. Understanding the environmental fate and risks of organophosphate esters: Challenges in linking precursors, parent compounds, and derivatives [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025, 497(10): 139596.

[13] 史菁. 新型有机磷酸酯 AO168=O 对斑马鱼胚胎的心脏毒性效应及分子机制研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2024.
SHI J. Study on the cardiotoxicity effects and molecular mechanisms of the novel organophosphate ester AO168=O in *Zebrafish embryos* [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2024.

[14] 曾铭, 喻零春, 李小燕. GC-MS 法测定食品包装材料中三磷酸酯[J]. 包装与食品机械, 2015, 33(3): 70–72.
ZENG M, YU LC, LI XY. Determination of tris phosphate in food packing materials by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Packaging and Food Machinery, 2015, 33(3): 70–72.

[15] 曾铭, 喻零春, 尹君玲. 超声波提取-气相色谱法测定食品包装材料中的有机磷酸酯[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(4): 70–72.
ZENG M, YU LC, YIN JL. Determination of organophosphorus triesters in food packing materials by gas chromatography with supersonic extraction [J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(4): 70–72.

[16] 申艳毅, 徐尚, 彭喜洋. 奶粉罐合规性管理分析[J]. 包装工程, 2024, 45(7): 137–147.
SHEN YY, XU S, PENG XY. Analysis on compliance management of milk powder cans [J]. Packaging Engineering, 2024, 45(7): 137–147.

[17] 何渊井, 卢明, 朱丽萍, 等. 奶粉金属包装质量控制研究[J]. 轻工标准与质量, 2015(3): 30–31.
HE YJ, LU M, ZHU LP, *et al*. Research on quality control of metal packaging for milk powder [J]. Standard & Quality of Light Industry, 2015(3): 30–31.

[18] 曹慧, 杨春, 来肖京, 等. 分散固相萃取-液相色谱-串联质谱法测定可降解食品接触材料中 28 种有机磷酸酯类阻燃剂[J]. 分析科学学报, 2025, 41(3): 292–298.
CAO H, YANG C, LAI XJ, *et al*. Simultaneous analysis of organophosphorus flame retardants in degradable food contact materials by in-syringe dispersive solid-phase filter clean-up followed by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2025, 41(3): 292–298.

[19] 曹慧, 杨春, 马钰清, 等. 固相萃取-液相色谱-串联质谱法测定 28 种有机磷酸酯类阻燃剂的迁移量[J/OL]. 分析试验室, 1-10. [2025-07-18]. https://link.cnki.net/urlid/11.2017.TF.20250718.0851.002
CAO H, YANG C, MA YQ, *et al*. Determination of migration of organophosphorus flame retardants by solid phase extraction-liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J/OL]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 1-10. [2025-07-18]. https://link.cnki.net/urlid/11.2017. TF.20250718.0851.002

[20] 黄志远, 刘长玲. 微波萃取-GC-MS 法测定软包装材料中有机磷酸酯[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 58–62.
HUANG ZY, LIU CL. Determination of organic phosphate in soft packaging materials by microwave extraction-GC-MS [J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 58–62.

[21] 杜成, 刘佳, 丁雅伦, 等. 气相色谱-质谱联用法测定聚乳酸制品中 7 种有机磷酸酯的迁移量[J]. 分析测试学报, 2025, 44(9): 1971–1977.
DU C, LIU J, DING YL, *et al*. Determination of migration amounts of seven organic phosphate esters in polylactic acid products by gas chromatography-mass [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2025, 44(9): 1971–1977.

[22] 余敏. GC-MS/MS 法检测聚氨酯泡沫塑料中 14 种有机磷酸酯阻燃剂[J]. 中国塑料, 2023, 37(10): 8–14.
YU M. Determination of 14 organophosphate ester flame retardants in polyurethane foam through GC-MS/MS [J]. China Plastics, 2023, 37(10): 8–14.

[23] European Food Safety Authority. Scientific opinion on dietary exposure assessment of food contact materials [J]. EFSA Journal, 2022, 20(7): 7564.

[24] 徐尚, 申艳毅, 彭喜洋, 等. 赋码奶粉易撕盖质量安全分析[J]. 包装工程, 2024, 45(13): 194–201.
XU S. SHEN YY, PENG XY, *et al*. Quality and safety analysis of coding on milk powder peel-off ends [J]. Packaging Engineering, 2024, 45(13): 194–201.

[25] 邓玉明, 潘祥华, 唐蕾. 高通量筛查和安全评估结合评价乳制品包装安全风险[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 168–176.
DENG YM, PAN XH, TANG L. High-throughput screening and risk assessment to evaluate safety risk of dairy product package [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 168–176.

[26] 任梦梦, 徐丹, 张弛, 等. 食品包装材料中有害物质迁移的研究进展[J]. 食品科技, 2025, 50(9): 327–334.
REN MM, XU D, ZHANG C, *et al*. Research progress on the migration of harmful substances in food packaging materials [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(9): 327–334.

[27] 袁蕊, 佟晶, 李文萱, 等. 液相色谱-串联质谱法同时测定食品接触材料中有机磷酸酯、亚磷酸酯及对羟基苯甲酸酯迁移量[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 30–39.
YUAN R, TONG J, LI WX, *et al*. Simultaneous determination of organophosphate esters, organophosphate antioxidants and parabens migration in food contact materials by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(14): 30–39.

[28] ZHOU RZ, GENG JQ, JIANG J, *et al*. Contamination of dairy products with tris(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphite and implications for human exposure [J]. Food Chemistry, 2024, 448(8): 139144.

[29] DING YZ, LIU Y, CHENG YX, *et al*. Non-target screening, quantitative migration analysis, and toxicity estimation of photodegradation products of tris (2,4-di-tert-butylphenyl) phosphite in disposable biodegradable plastic food container [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 148(12): 108616.

[30] JI X, LIU J, LIANG JF, *et al*. The hidden diet: Synthetic antioxidants in packaged food and their impact on human exposure and health [J]. Environment International, 2024, 186(4): 108613.

[31] 隋海霞, 张磊, 毛伟峰, 等. 毒理学关注阈值方法的建立及其在食品接触材料评估中的应用[J]. 中国食品卫生杂志, 2012, 24(2): 109–113.
SUI HX, ZHANG L, MAO WF, *et al*. Establishment of the threshold of toxicological concern with decision tree approach and its application in food contact materials [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2012, 24(2): 109–113.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)