·营养与食品卫生·

天津市售虾类水产品中全氟和多氟烷基化合物的污染特征研究

王辰，党亚敏，张维，吕光

天津市疾病预防控制中心食品理化科，国家卫生健康委员会食品安全风险评估与标准研制特色实验室，天津 300011

摘要：目的　测定天津市售海水虾及淡水虾中 24 种全氟和多氟烷基化合物（per- and palyfluoroalkyl substances,PFASs）的含量水平，进行污染特征研究。**方法**　利用超高效液相色谱串联质谱法测定样品中 PFASs 的含量，进行统计学描述并运用非参数检验进行含量比较。**结果**　共完成 67 份海水虾、105 份淡水虾的检测。海水虾样品中共有 14 种 PFASs 检出，∑PFASs 检出浓度范围为 0.160～43.4 μg/kg，整体 PFASs 类污染物检出率为 100%；淡水虾样品中共检出 17 种 PFASs，∑PFASs 检出浓度范围为 0.135～27.9 μg/kg，整体 PFASs 类污染物检出率为 99%。两种虾类水产品的主要检出组分均为长链 PFASs，单份海水虾中检出 PFASs 的种类为 1～11 种，单份淡水虾中检出 PFASs 的种类为 0～13 种，其中全氟辛烷磺酸、全氟辛酸和全氟壬酸为主要污染成分，6:2Cl-PFESA、8:2Cl-PFESA 均有一定检出。经过比较发现淡水虾中的河虾污染较为严重。**结论**　天津市售虾类水产品中存在一定程度 PFASs 污染，应深入研究、引起重视并加强管理。

关键词：虾类水产品；PFASs；污染特征研究

中图分类号：R155　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1003-8507（2026）05-821-07

DOI：10.20043/j.cnki.MPM.202509505

Pollution characteristics of PFASs in shrimp aquatic products sold in Tianjin

WANG Chen, DANG Ya-ming, ZHANG Wei, LV Guang

Department of Food Physical and Chemical Testing, Tianjin Center for Disease Control and Prevention; NHC Specialty Laboratory for Food Safety Risk Assessment and Standard Development, Tianjin 300011, China

Abstract: Objective To determine the concentrations of 24 per- and polyfluoroalkyl substances (PAFs) in marine and freshwater shrimp sold in Tianjin and to characterize their pollution profiles. **Methods** The concentrations of PFASs in the samples was determined by UPLC-MS/MS. Descriptive statistics were applied, and non-parametric tests were used to compare concentrations. **Results** A total of 67 samples of marine shrimp and 105 samples of freshwater shrimp were tested. A total of 14 kinds of PFASs were detected in marine shrimp, and the ∑PFASs concentration ranged from 0.160 to 43.4 μg/kg. The overall detection rate of PFASs pollutants was 100%. 17 kinds of PFASs were detected in freshwater shrimp, and the ∑PFASs concentration ranged from 0.135 to 27.9 μg/kg. The overall detection rate of PFASs pollutants was 99%. The main detected components in the two types of shrimp aquatic products were all long-chain PFASs. The number of PFASs detected in a single sample of marine shrimp ranged from 1 to 11, while that in a single sample of freshwater shrimp ranged from 0 to 13. Among them, PFOS, PFOA and PFNA were the main pollutant components, while 6:2Cl-PFESA and 8:2Cl-PFESA were both detected to a certain extent. Through comparison, it was found that the pollution of river shrimp among freshwater shrimp was relatively serious. **Conclusion** There is a certain degree of PFASs pollution in the shrimp aquatic products sold in Tianjin. In-depth research, attention and strengthened management should be carried out.

Keywords: Shrimp aquatic products; PFASs; Pollution characteristics study

全氟和多氟烷基化合物（per- and polyfluoroalkyl substances,PFASs）是一系列人工合成的化学结构为碳链上的氢部分或者全部被氟取代的有机化合物。PFASs 具有优良的疏油疏水性能，卓越的热稳定性以及良好的表面活性，可在各类工业加工中起到降低表面摩擦以及使产品具有耐高温、防水、防污、防油等性能的作用，在生活中应用广泛，涵盖消费品和工业产品等领域[1-2]。

PFASs 化学结构中的 C-F 键使得其具有非常稳定的化学性质，在环境中难降解，同时也很难被动物

基金项目：天津市卫生健康科技项目（TJWJ2023QN093）；天津市医学重点学科建设资助（TJYXZDXK-3-034C）

作者简介：王辰（1989—），女，本科，主管技师，研究方向：食品安全检测、评估工作

体代谢，可持久存在并造成蓄积，目前在全球各环境介质及各类食品中均有检出[3-8]。大量研究表明，PFASs 对人体健康有多种负面作用，包括对肝脏的毒性、对血清胆固醇水平的影响、对女性生殖健康的损害、致癌性以及对儿童健康的伤害等[9-12]。全氟辛酸（PFOA）和全氟辛烷磺酸（PFOS）是两种在环境和人体中检出率最高的 PFASs 化合物，联合国环境规划署已将 PFOS 和 PFOA 及其相关化合物列入《斯德哥尔摩公约》禁止的持久性有机污染物名单[13]。

目前，我国多地已对市售动物源食品中 PFASs 的污染现状进行了研究和膳食摄入风险评估。其中，对北京市的研究指出在各类样品中水产品的 PFASs 检出率最高且总含量最高，水产品更易受 PFASs 的污染影响[8]；在湖北省某地区的研究中，研究者发现水产类食品中 PFASs 的浓度范围最大，均值最高[4]；而广州市的研究表明不同水产品中检出的 PFASs 种类、单组分含量及特征污染组分等存在明显的样品差异性[14]。天津位于渤海湾，水产品丰富且居民喜爱食用，膳食摄入量大，但此前对天津市售虾类水产品中 PFASs 的污染特征研究相对较少。因此本研究旨在检测天津市售海水虾和淡水虾中 24 种 PFASs 的浓度，进行污染特征研究，为制定与实施有关管控政策提供依据并为更深入的科学研究提供支持。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂 超高效液相色谱串联高分辨质谱仪（AB SCIEX，QTRAP Ⓡ 5500）；甲醇中 23 种全氟化合物混标溶液（天津阿尔塔科技有限公司，S194695，5 μg/ml）；甲醇中全氟 -2- 丙氧基全氟丙酸标准溶液（上海安谱璀世标准技术服务有限公司，100 mg/L）；13 种全氟酸类内标混标（天津阿尔塔科技有限公司，S181109，2 μg/ml）；色谱纯乙腈，色谱纯甲酸铵，色谱纯甲醇，优级纯氯化钠，Captiva EMR-Lipid 净化柱规格为 6 ml 600 mg。

1.2 仪器条件

色谱条件：C18 色谱柱 100 mm × 2.1 mm；柱箱温度 40℃；流动相：乙腈 +2 mmol/L 甲酸铵；流速：0.3 ml/min；进样量：5 μl。

质谱条件：Curtain gas：35，ion source gas1:55；ion source gas2:55，ESI-：4500V，550℃，MRM 模式。

1.3 实验方法

1.3.1 样品采集 参考《2024 年国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册（上卷）》，样品采集数量需要根据食品消费情况确定，而食品的消费量与人口数量呈正比，因此根据人口数量计算梯度，对于人口数 1 000 万 ~ 3 000 万的省（直辖市）按最小样本量 45 份计。天津市人口数量约为 1 300 万，在水产品大量上市的季节于天津市全部辖区的流通环节采样并扩大采样量，可客观反应出消费者在市面上能够买到的虾类水产品情况，样品采集具有代表性。

本研究于 2023 年 8—10 月、2024 年 8—10 月在天津市 16 个辖区的农贸市场、商店随机采集海水虾样品共 67 份、淡水虾样品共 105 份。选取上述样品可食用部位切成小块，捣碎混合均匀作为试样，将上述试样装入无污染密封袋中，做好标记，于 -18℃避光保存。

1.3.2 样品前处理 参照《2024 年国家食品污染物和有害因素风险监测工作手册（中卷）》中食品中 PFASs 测定的标准操作程序，结合本实验室具体实验条件对方法进行优化。

准确称取上述试样 2 g 置于具塞离心管（50 ml）中，加入 13 种全氟酸类内标使用液（100 ng/ml）50 μl，加入纯水 2 ml，涡旋，加入乙腈 8 ml，振荡提取 30 min。加入氯化钠 1.5 g，涡旋，离心半径 11.5 cm，10 000 r/min 离心 5 min。移取全部上层乙腈于固相萃取柱中，收集全部流出液，氮气吹干，加入甲醇 1.0 ml，涡旋，转入液相小瓶。将液相小瓶放入超高效液相色谱质谱联用仪中按照上述 1.2 中条件进样，内标法定量，计算样品中待测物浓度。

1.4 污染特征分析 数据录入采用 WPS 双人进行，数据分析使用 SPSS 24.0 统计软件包进行。以最小指、最大值、中位数、均值进行统计学描述并进行不同虾类水产品间污染物的含量比较，其中未检出组分浓度值以检出限的 1/2 参与计算。以实际检出值大于检出限为检出、小于检出限为未检出，计算不同虾类水产品中 24 种 PFASs 的检出率，完成差异性分析。

2 结 果

2.1 质量控制 本研究测定样品中 PFASs 的浓度，标准曲线 r 均大于 0.99（0.990 3 ~ 0.999 9）；方法验证测定样品相对标准偏差（relative standard deviation，RSD）为 3.7% ~ 15%；加标回收率为 68.0% ~ 123%；平行样品检测值相对相差小于 15%；空白样品未检出；24 种 PFASs 中全氟丁酸（PFBA）、全氟戊酸（PFPeA）、六氟环氧丙烷二聚酸（HFPO-DA）的检出限为 0.02 μg/kg，其他 21 种组分的检出限均为 0.01 μg/kg。

2.2 污染特征研究 本研究对天津市售海水虾 67 份、淡水虾 105 份样品中 24 种 PFASs 的含量测定，结果见表 1、2。

海水虾样品中共有 14 种 PFASs 被检出，∑PFASs 检出浓度范围为 0.160 ~ 43.4 μg/kg，其中全氟十一酸（PFUdA）检出率最高，67 份样品中共有 66 份检出 PFUdA，检出率为 98.5%，其他超过 40% 检出率的 PFASs 依次为全氟十三酸（PFTrDA）、PFOS、全氟十

四酸（PFTeDA)、全氟癸酸 (PFDA)、全氟十二酸 (PFDoA)、PFOA、全氟壬酸 (PFNA)；在全部 24 种 PFASs 中检出含量最高的种类是 PFBA，检出浓度为 39.2 μg/kg，其他有较高检出浓度的种类包括 PFOA、PFNA、PFUdA、PFTrDA、PFOS 和 6:2 氯代全氟醚磺酸（6:2Cl-PFESA)；全部海水虾样品中均有一种或多种不同 PFASs 检出，整体 PFASs 类污染物检出率为 100%。

淡水虾样品中共检出 17 种 PFASs，∑PFASs 检出浓度范围为 0.135 ~ 27.9 μg/kg，其中 PFUdA 和 PFTrDA 的检出率最高，均为 105 份样品中有 102 份检出，检出率为 97.1%；其他检出率较高的 PFASs 依次为 PFDoA、PFOS、PFDA、PFTeDA、PFNA、PFOA，检出浓度均超过 50%；检出含量最高的种类是 PFOS，检出浓度为 19.8 μg/kg；其他有较高检出浓度的种类包括 PFBA、PFOA、PFNA、PFDA、PFUdA、PFDoA、PFTr DA、6:2Cl-PFESA；全部 105 份样品中有 104 份检出一种或多种不同种类 PFASs，整体 PFASs 类污染物检出率为 99.0%。

表 1　天津市 67 份海水虾中 PFASs 的含量

Table 1　Concentrations of PFASs in 67 samples of marine shrimp from Tianjin

编号	污染物种类	最小值(μg/kg)	最大值(μg/kg)	中位数(μg/kg)	均值(μg/kg)	检出数(份)	检出率(%)
1	PFBA	0.010	39.2	0.010	1.21	8	11.9
2	PFPeA	0.010	0.010	0.010	0.010	0	0.0
3	PFHxA	0.005	0.005	0.005	0.005	0	0.0
4	PFHpA	0.005	0.005	0.005	0.005	0	0.0
5	PFOA	0.005	2.44	0.028 8	0.233	42	62.7
6	PFNA	0.005	1.86	0.005	0.156	27	40.3
7	PFDA	0.005	0.846	0.071 5	0.296	55	82.1
8	PFUdA	0.005	1.94	0.695	0.638	66	98.5
9	PFDoA	0.005	0.785	0.132	0.290	54	80.6
10	PFTrDA	0.005	4.38	0.655	0.852	64	95.5
11	PFTeDA	0.005	0.523	0.107	0.119	55	82.1
12	PFHxDA	0.005	0.030 5	0.005	0.005 59	2	3.0
13	PFOdA	0.005	0.005	0.005	0.005	0	0.0
14	PFBS	0.005	0.005	0.005	0.005	0	0.0
15	PFHxS	0.005	0.458	0.005	0.018 2	4	6.0
16	PFOS	0.005	3.24	0.255	0.387	60	89.6
17	PFDS	0.005	0.005	0.005	0.005	0	0.0
18	PFPeS	0.005	0.005	0.005	0.005	0	0.0
19	PFHpS	0.005	0.451	0.005	0.011 7	1	1.5
20	PFNS	0.005	0.005	0.005	0.005	0	0.0
21	HFPO-DA	0.010	0.010	0.010	0.010	0	0.0
22	NaDONA	0.005	0.005	0.005	0.005	0	0.0
23	6:2Cl-PFESA	0.005	1.52	0.005	0.049 1	2	3.0
24	8:2Cl-PFESA	0.005	0.357	0.005	0.025 0	4	6.0
25	∑PFASs	0.160	43.4	2.50	4.35	67	100

注：∑PFASs 表示 24 种 PFASs 的和，表中样品中未检出的 PFASs 组分浓度以检出限的 1/2 计；PFHxA 为全氟已酸、PFHpA 为全氟庚酸、PFHxDA 为全氟己二酸、PFOdA 为全氟十八酸、PFBS 为全氟丁烷碳酸、PFHxS 为全氟己烷磺酸、PFDS 为全氟癸烷碳酸、PFPeS 为全氟戊烷磺酸、PFHpS 为全氟庚烷磺酸、PFNS 为全氟壬烷磺酸、NaDONA 为全氟代二十二酸纳盐、8:2C-PFESA 为 8:2 氯代全氟醚磺酸；表 2 ~ 5 及图 2 污染物种类英文简称同表 1。

表 2　天津市 105 份淡水虾中 PFASs 的含量

Table 2　Concentrations of PFASs in 105 samples of freshwater shrimp from Tianjin

编号	污染物种类	最小值(μg/kg)	最大值(μg/kg)	中位数(μg/kg)	均值(μg/kg)	检出数(份)	检出率(%)
1	PFBA	0.010	3.03	0.010	0.098 9	20	19.0
2	PFPeA	0.010	0.010	0.010	0.010	0	0.0
3	PFHxA	0.005	0.307	0.005	0.007 88	1	1.0
4	PFHpA	0.005	0.005	0.005	0.005	0	0.0
5	PFOA	0.005	3.80	0.023 6	0.270	55	52.4
6	PFNA	0.005	1.78	0.129	0.237	73	69.5
7	PFDA	0.005	2.18	0.113	0.305	93	88.6
8	PFUdA	0.005	1.77	0.403	0.456	102	97.1
9	PFDoA	0.005	1.52	0.104	0.161	96	91.4

（续表）

编号	污染物种类	最小值(μg/kg)	最大值(μg/kg)	中位数(μg/kg)	均值(μg/kg)	检出数(份)	检出率(%)
10	PFTrDA	0.005	2.29	0.646	0.742	102	97.1
11	PFTeDA	0.005	0.526	0.044 9	0.059 9	82	78.1
12	PFHxDA	0.005	0.005	0.005	0.005	0	0.0
13	PFOdA	0.005	0.005	0.005	0.005	0	0.0
14	PFBS	0.005	0.246	0.005	0.008 25	2	1.9
15	PFHxS	0.005	0.454	0.005	0.030 8	13	12.4
16	PFOS	0.005	19.8	0.140	1.09	95	90.5
17	PFDS	0.005	0.028 0	0.005	0.005 65	4	3.8
18	PFPeS	0.005	0.039 8	0.005	0.005 33	1	1.0
19	PFHpS	0.005	0.088 1	0.005	0.009 15	7	6.7
20	PFNS	0.005	0.005	0.005	0.005	0	0.0
21	HFPO-DA	0.010	0.010	0.010	0.010	0	0.0
22	NaDONA	0.005	0.005	0.005	0.005	0	0.0
23	6:2Cl-PFESA	0.005	2.85	0.005	0.097 6	12	11.4
24	8:2Cl-PFESA	0.005	0.756	0.005	0.038 5	13	12.4
25	∑PFASs	0.135	27.9	2.10	3.67	104	99.0

注：∑PFASs 表示 24 种 PFASs 的和，表中样品中未检出的 PFASs 组分浓度以检出限的 1/2 计。

在本研究中，单份海水虾样品最多检出 11 种不同 PFASs，最少检出 1 种 PFASs 组分，其中有 17 份样品检出 7 种不同 PFASs，占样品总数的 25.4%；其次依次为检出 6、8 和 9 种 PFASs 的样品，分别占样品总数的 17.9%、17.9%和 16.4%。单份淡水虾样品检出 PFASs 的种类范围为 0～13 种，检出份数最多的为含有 6 种 PFASs 的样品，共检出 30 份，占总淡水虾样品数的 28.6%；其次为检出 7、8 和 9 种 PFASs 成分的样品，对应占总样品数的 18.1%、17.1%和 10.5%。见图 1。

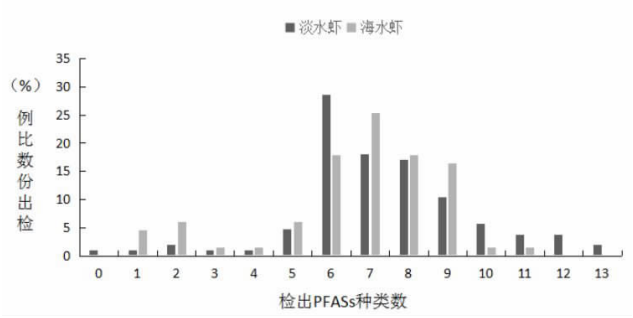


图 1　海水虾及淡水虾中检出 PFASs 种类

Figure 1　Types of PFASs detected in marine shrimp and freshwater shrimp

在研究中所采集的 105 份淡水虾中包括 42 份河虾、19 份罗氏虾、28 份小龙虾以及 16 份其他淡水虾，对其中种类确定的河虾、罗氏虾、小龙虾的检出结果进行数据统计，见图 2。从图中可以看到三类淡水虾中检出 PFASs 种类趋势相似，尤其河虾和小龙虾中检出浓度中位数趋势相同，检出浓度中位数较高种类均为 PFOA、PFNA、PFDA、PFUdA、PFDoA、PFTrDA、PFTeDA 和 PFOS，罗氏虾则少了 PFOA 和 PFTeDA 两种组分；三类淡水虾中最高检出浓度中位数组分均为 PFTrDA；三类淡水虾中 24 种 PFASs 总浓度的中位数分别为 3.42 μg/kg（河虾）、1.54 μg/kg（罗氏虾）、2.03 μg/kg（小龙虾）。

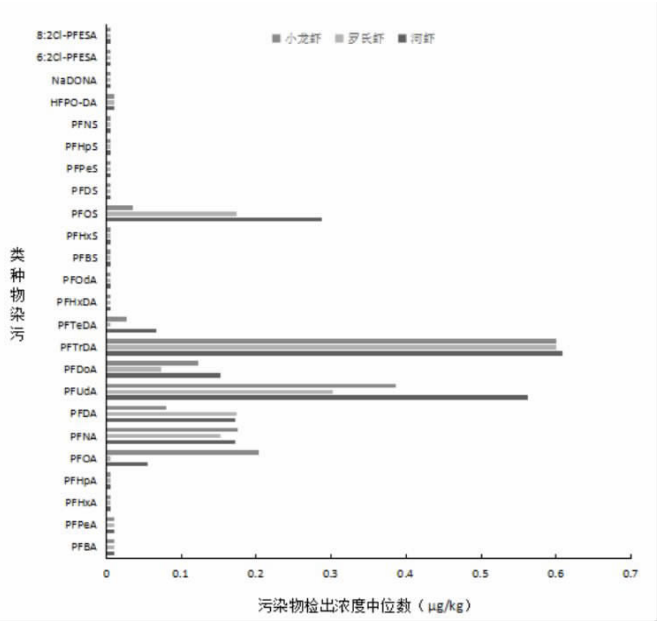


图 2　三类淡水虾中 PFASs 检测结果

Figure 2　PFASs detection results in three categories of freshwater shrimp

对海水虾和淡水虾中检测的 24 种 PFASs 以及总 PFASs 含量进行统计学分析，两类样品中 24 种 PFASs 及∑PFASs 含量数据使用夏皮洛－威尔克检验进行正态性检验，结果均不符合正态分布，故采用非参数检验（曼－惠特尼 *U* 检验）进行分析比较。

由表 3 可知，比较海水虾和淡水虾中含有的 PFNA、PFUdA 以及 PFTeDA 浓度，*P* 值小于 0.05，表明其浓度值具有统计学差异，海水虾中含有的 PFUdA 和 PFTeDA 的浓度显著高于淡水虾，而淡水虾中的 PFNA 浓度则高于海虾，两类水产品的污染种类存在差异。

表 3　海水虾及淡水虾中 PFASs 含量比较情况[$M(P_{25},P_{75})$,μg/kg]

Table 3　Comparison of PFASs concentrations between marine shrimp and freshwater shrimp [$M\ (P_{25},\ P_{75})$, μg/kg]

污染物种类	淡水虾	海虾	Z 值	P 值
PFBA	0.010(0.010 ~ 0.010)	0.010(0.010 ~ 0.010)	−1.124	0.261
PFPeA	0.010(0.010 ~ 0.010)	0.010(0.010 ~ 0.010)	0	1.000
PFHxA	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.005(0.005 ~ 0.005)	−0.799	0.424
PFHpA	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.005(0.005 ~ 0.005)	0	1.000
PFOA	0.023 6(0.005 ~ 0.237)	0.028 8(0.005 ~ 0.427)	−0.795	0.427
PFNA	0.129(0.005 ~ 0.284)	0.005(0.005 ~ 0.259)	−2.915	0.004
PFDA	0.113(0.053 5 ~ 0.277)	0.071 5(0.028 9 ~ 0.690)	−0.816	0.415
PFUdA	0.403(0.235 ~ 0.623)	0.695(0.256 ~ 0.898)	−3.264	0.001
PFDoA	0.104(0.062 1 ~ 0.180)	0.132(0.018 7 ~ 0.660)	−0.827	0.408
PFTrDA	0.646(0.333 ~ 1.00)	0.655(0.262 ~ 1.24)	−0.144	0.885
PFTeDA	0.044 9(0.011 7 ~ 0.076 7)	0.107(0.017 1 ~ 0.200)	−3.710	<0.001
PFHxDA	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.005(0.005 ~ 0.005)	−1.776	0.076
PFOdA	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.005(0.005 ~ 0.005)	0	1.000
PFBS	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.005(0.005 ~ 0.005)	−1.133	0.257
PFHxS	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.005(0.005 ~ 0.005)	−1.398	0.162
PFOS	0.140(0.050 5 ~ 0.338)	0.255(0.087 7 ~ 0.498)	−1.466	0.143
PFDS	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.005(0.005 ~ 0.005)	−1.612	0.107
PFPeS	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.005(0.005 ~ 0.005)	−0.799	0.424
PFHpS	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.005(0.005 ~ 0.005)	−1.536	0.125
PFNS	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.005(0.005 ~ 0.005)	0	1.000
HFPO-DA	0.010(0.010 ~ 0.010)	0.010(0.010 ~ 0.010)	0	1.000
NaDONA	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.005(0.005 ~ 0.005)	0	1.000
6:2Cl-PFESA	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.005(0.005 ~ 0.005)	−1.900	0.057
8:2Cl-PFESA	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.005(0.005 ~ 0.005)	−1.307	0.191
∑PFASs	2.10(1.36 ~ 3.54)	2.50(0.990 ~ 5.01)	−0.0800	0.936

对三种不同类型淡水虾(河虾、罗氏虾、小龙虾)中主要检出的 8 种 PFASs 以及总 PFASs 含量进行统计学分析，使用夏皮洛 - 威尔克检验进行正态性检验，其中罗氏虾中 PFNA、PFUdA、PFDoA、PFTrDA、∑PFASs 浓度数据符合正态分布，其他含量数据均不符合正态分布，故采用非参数检验(Kruskal-Wallis H 检验)进行分析并进行两两比较。

由表 4、5 可知，河虾、罗氏虾、小龙虾中主要 PFASs 种类相比较，PFOA、PFDA、PFUdA、PFDoA、PFTeDA、PFOS 和总 PFASs 浓度进行比较，P 值小于 0.05，含量差异具有统计学意义。进而进行成对比较可知，不同组分浓度差异 PFOA 为：小龙虾＞河虾、小龙虾＞罗氏虾、河虾＞罗氏虾，PFDA：河虾＞小龙虾、罗氏虾＞小龙虾，PFUdA：河虾＞罗氏虾，PFDoA：河虾＞罗氏虾、小龙虾＞罗氏虾，PFTeDA：河虾＞小龙虾、河虾＞罗氏虾、小龙虾＞罗氏虾，PFOS：河虾＞小龙虾、罗氏虾＞小龙虾，总 PFASs：河虾＞小龙虾、河虾＞罗氏虾。

表 4　三类淡水虾中 PFASs 含量总体比较情况[$M(P_{25},P_{75})$,μg/kg]

Table 4　Overall comparison of PFASs concentrations in three categories of freshwater shrimp [$M\ (P_{25},\ P_{75})$, μg/kg]

污染物种类	河虾	罗氏虾	小龙虾	H 值	P 值
PFNA	0.172(0.005 ~ 0.535)	0.153(0.094 1 ~ 0.246)	0.176(0.097 8 ~ 0.256)	0.726	0.695
PFTrDA	0.608(0.316 ~ 1.14)	0.600(0.448 ~ 0.746)	0.600(0.267 ~ 0.885)	0.551	0.759
PFOA	0.054 5(0.005 ~ 0.354)	0.005(0.005 ~ 0.005)	0.204(0.078 9 ~ 0.403)	32.526	<0.001
PFDA	0.172(0.062 1 ~ 0.914)	0.173(0.124 ~ 0.276)	0.079 3(0.050 7 ~ 0.132)	10.205	0.006
PFUdA	0.563(0.335 ~ 0.790)	0.302(0.201 ~ 0.409)	0.385(0.226 ~ 0.607)	8.587	0.014
PFDoA	0.153(0.077 6 ~ 0.256)	0.072 8(0.048 7 ~ 0.096 7)	0.123(0.069 6 ~ 0.199)	10.385	0.006
PFTeDA	0.067 1(0.035 2 ~ 0.123)	0.005(0.005 ~ 0.023 7)	0.027 7(0.012 1 ~ 0.062 6)	26.466	<0.001
PFOS	0.288(0.127 ~ 4.23)	0.173(0.151 ~ 0.259)	0.035 5(0.005 ~ 0.065 7)	35.207	<0.001
∑PFASs	3.42(1.87 ~ 9.87)	1.54(1.25 ~ 2.44)	2.03(1.22 ~ 2.67)	13.640	0.001

表 5　三类淡水虾中 PFASs 含量两两比较情况

Table 5　Pairwise comparison of PFASs concentrations in three categories of freshwater shrimp

污染物种类	罗氏虾 – 河虾		罗氏虾 – 小龙虾		河虾 – 小龙虾	
	Q 值	*P* 值	*Q* 值	*P* 值	*Q* 值	*P* 值
PFNA	—	—	—	—	—	—
PFTrDA	—	—	—	—	—	—
PFOA	3.927	<0.001	−5.691	<0.001	−2.484	0.039
PFDA	0.501	1.000	−2.744	0.018	−2.775	0.017
PFUdA	2.887	0.012	−1.462	0.431	−1.490	0.409
PFDoA	3.176	0.004	−2.455	0.042	−0.608	1.000
PFTeDA	5.083	<0.001	−2.649	0.024	−2.534	0.034
PFOS	1.127	0.779	−3.752	0.001	−5.848	<0.001
∑PFASs	3.193	0.004	−0.620	1.000	−2.863	0.013

注：—表示由于总体检验未检测出样本间存在显著差异，因此未执行多重比较。

3　讨　论

本研究完成了对天津市售海水虾及淡水虾中 24 种 PFASs 的含量测定及污染特征研究。其中包括 14 种长链 PFASs：PFOA、PFNA、PFDA、PFUdA、PFDoA、PFTrDA、PFTeDA、PFHxDA、PFODA、PFHxS、PFOS、PFDS、PFHpS、PFNS；6 种短链 PFASs：PFBA、PFPeA、PFHxA、PFHpA、PFBS、PFPeS；4 种新兴 PFASs：HFPO-DA、NaDONA、6:2Cl-PFESA、8:2Cl-PFESA。海水虾和淡水虾中检出率较高的 8 种单体 PFASs 相同，均为长链 PFASs，说明长链 PFASs 仍然是虾类水产品中最需要关注的一类组分；同时样品中的两种新兴 PFASs（6:2Cl-PFESA、8:2Cl-PFESA）均有一定比例检出，说明针对虾类水产品中的新兴 PFASs 应提高重视程度。

本研究所检测样品中一般含有 6～9 种不同的 PFASs，单份海水虾中最多含有 11 种组分，而单份淡水虾中最多含有 13 种组分，说明天津市售虾类水产品中 PFASs 污染较广泛，可能存在多种污染来源。目前国际上较为关心的 3 种单体（PFOA、PFOS、PFNA）成分在研究样品中均有较高的检出率及检出浓度；海水虾中 PFOA 检出浓度平均值为 0.233 μg/kg，淡水虾中为 0.270 μg/kg；海水虾中 PFOS 检出浓度平均值为 0.387 μg/kg，淡水虾中为 1.09 μg/kg。与国内外已有的水产品中 PFASs 相关污染研究结果[15-21]相比可以发现，本研究的淡水虾中 PFOS 的污染处于较高水平，说明淡水虾中 PFOS 的污染相对严重。同时本研究中两类样品的 PFOS 含量均高于 PFOA，这与北京[7]、荷兰[19]和挪威[20]的研究结果一致，说明可能虾类水产品中 PFOS 的积累能力强于 PFOA。

通过比较可知，海水虾和淡水虾中 PFASs 存在差异，这可能与其生长环境、饲料来源、海洋食物网与淡水食物网的生物稀释作用不同有关。本研究中还细分了淡水虾中的三种不同类型，通过比较研究可以看出河虾污染最严重，是淡水虾中总 PFASs 的主要贡献类型。

受采样等限制，本研究没有追踪确认市售虾类水产品样品的具体来源产地，同时在分析中仅区分了海水虾和淡水虾两个大类以及淡水虾中三个小类，没有对海水虾的品种进一步细分，也没有检测虾头中污染物含量。后续还需进一步细分食物类别及食物的不同部位进行研究，同时追踪样品来源，进一步深入研究确认造成污染的原因，以期为管理决策和标准制定提供更科学有力的保证。

利益冲突声明　本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] Van der donk LL, Llavero-Pasquina M. PFAS and the pollution trap: contested knowledge in environmental justice struggles [J]. Environmental Science & Policy, 2025, 174: 104281.

[2] Pasecnaja E, Bartkevics V, Zacs D. Occurrence of selected per- and polyfluorinated alkyl substances (PFASs) in food available on the European market - A review on levels and human exposure assessment[J]. Chemosphere, 2022, 287(Pt 4): 132378.

[3] Vieira HG, Canela MC, Urban RC, et al. Current knowledge about per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the atmosphere: Fate, analytical methods and research priorities [J]. Chemosphere, 2025, 389: 144703.

[4] 张恣意，曹文成，周妍，等. 湖北某典型地区动物源食品中全氟及多氟烷基化合物的污染现状和膳食暴露评估[J]. 食品工业科技，2021，42(20)：214-222.
Zhang ZY, Cao WC, Zhou Y, et al. Pollution status and dietary exposure assessments of Per- and polyfluoroalkyl substances in animal food from a typical area in Hubei province [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(20): 214-222.(In Chinese)

[5] Scaggiante G, Zingaretti D, Verginelli I. Comparison of four PFAS mixtures assessment approaches based on extensive tap water and groundwater data[J]. Environmental Pollution, 2025, 386: 127177.

[6] Fujii Y, Harada HK. A review of human exposure to PFAS: substantial contribution from seafood [J]. Environmental Health and Preventive Medicine, 2025, 14: 3073.

[7] 刘逸飞，李阳，赵楠楠，等. 北京市售动物源性食品中全氟化合

物赋存及居民摄入风险评估 [J]. 环境化学,2021,40(11):3360-3367.
Liu YF, Li Y, Zhao NN, et al. Occurrence of perfluoroalkyl substances in animal-derived food in Beijing and risk assessment of residents' intake [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40 (11): 3360-3367.(In Chinese)

[8] 方淑红,彭光垣,印红玲,等. 成都饮食中全氟化合物的污染特征及健康风险评估 [J]. 环境科学学报,2019,39(5):1708-1716.
Fang SH, Peng GY, Yin HL, et al. Pollution characteristics and human health risk of perfluoroalkyl substance exposure through the diet in Chengdu City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(5): 1708-1716.(In Chinese)

[9] Vujic E, Ferguson SS, Brouwer KLR. Effects of PFAS on human liver transporters: implications for health outcomes [J]. Toxicological Sciences, 2024, 200(2): 213-227.

[10] Zheng J, Liu S, Yang JJ, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and cancer: Detection methodologies, epidemiological insights, potential carcinogenic mechanisms, and future perspectives [J]. Science of the Total Environment, 2024, 953: 176158.

[11] Qu R, Wang JX, Li XJ, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) affect female reproductive health: epidemiological evidence and underlying mechanisms[J]. Toxics, 2024, 12(9): 678.

[12] Bjørke-Monsen AL, Holstad K, Huber S, et al. PFAS exposure is associated with an unfavourable metabolic profile in infants six months of age[J]. Environment International, 2024, 193: 109121.

[13] 丁林玉,雷素珍,曾红亮. 全氟和多氟烷基化合物的危害及在食品中的污染研究进展 [J]. 食品工业科技,2020,41(20):336-341, 350.
Ding LY, Lei SZ, Zeng HL. Research progress on the harm of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances and their contamination in food [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(20): 336-341, 350.(In Chinese)

[14] 王旭峰,王强,黎智广,等. 广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 [J]. 环境科学,2019,40(4):1931-1938.
Wang XF, Wang Q, Li ZG, et al. Contamination characteristics and safety risk assessment of perflurorinated alkvlated substances in aouatic products from Guangzhou [J]. Environmental Science, 2019, 40(4): 1931-1938.(In Chinese)

[15] 张佳程. 山东沿海城市海产品中全氟化合物的赋存情况、来源及健康风险[D]. 济南:山东大学,2024.
Zhang JC. Distribution, sources and health risks of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in seafood from coastal cities in Shandong Province [D]. Jinan: Shandong University, 2024. (In Chinese)

[16] 谷臣琳,杨京津,罗宝章,等. 上海市动物源性食品中全氟化合物污染健康风险评估[J]. 上海预防医学,2025,37(7):556-561.
Gu CL, Yang JJ, Luo BZ, et al. Health risk assessment of per-and polyfluoroalkyl substances contamination in animal-derived foods in Shanghai [J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2025, 37(7): 556-561.(In Chinese)

[17] 魏子皓,周冬仁,郝贵杰,等. 南太湖 6 种典型鱼类中全氟化合物的分布特征及其健康风险[J]. 环境科学学报,2024,44(4):390-400.
Wei ZH, Zhou DR, Hao GJ, et al. Distribution characteristics of perfluorinated compounds in six typical fish species from South Taihu Lake and their health risks [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(4): 390-400.(In Chinese)

[18] 孟娣,王赛赛,刘欢,等. 水产品中全氟辛酸和全氟辛烷磺酸检测技术及污染现状[J]. 食品安全质量检测学报,2016,7(10):3935-3941.
Meng D, Wang SS, Liu H, et al. Research progress on detection and occurence of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in aquatic products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016, 7(10): 3935-3941.(In Chinese)

[19] Noorlander CW, van Leeuwen SPJ, Te Biesebeek JD, et al. Levels of perfluorinated compounds in food and dietary intake of PFOS and PFOA in the Netherlands [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(13): 7496-7505.

[20] Haug LS, Salihovic S, Jogsten IE, et al. Levels in food and beverages and daily intake of perfluorinated compounds in Norway [J]. Chemosphere, 2010, 80(10): 1137-1143.

[21] Fujii Y, Kato Y, Miyatake M, et al. Levels and spatial profile of per- and polyfluoroalkyl substances in edible shrimp products from Japan and neighboring countries; a potential source of dietary exposure to humans[J]. Environment International, 2024, 189: 108685.

收稿日期:2025-09-29

(上接第 820 页)

[J]. Journal of Clinical Pulmonary Medicine, 2020, 25 (11): 1722-1724, 1728.(In Chinese)

[15] Jocelyn, Bellier, Yannis J, et al. A plea for thoracoscopic resection of solitary pulmonary nodule in cancer patients [J]. Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques, 2017, 31: 4705-4710.

[16] 许海杰,庄伟涛,王琪,等. 肺结节患者呼吸系统症状分布及其影响因素的横断面研究 [J]. 中国胸心血管外科临床杂志,2023,30(8):1175-1180.
Xu HJ, Zhuang WT, Wang Q, et al. Distribution pattern of respiratory symptoms and the relevant risk factors in patients with pulmonary nodules: A cross-sectional study [J]. Chinese Journal of Clinical Thoracic and Cardiovascular Surgery, 2023, 30 (8): 1175-1180.(In Chinese)

[17] Bennett WD. Gender difference in particle deposition and immune response in airways [J]. American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology, 2019, 61(5): 614-623.

[18] Gholamreza, Bidkhori, Zahra, et al. Reconstruction of an integrated genome-scale co-expression network reveals key modules involved in lung adenocarcinoma[J]. PLOS One, 2013, 8: e67552.

[19] Henschke CI, Yip R, Ma T, et al. CT screening for lung cancer: comparison of radiologic and pathologic findings[J]. Radiology, 2022, 305(1): 212-220.

收稿日期:2025-09-12