

# 食品中全氟辛酸、全氟辛基磺酸的 检测技术研究进展

黄春元<sup>1,2</sup>, 周 剑<sup>1\*</sup>, 刘亚轩<sup>2</sup>, 王 敏<sup>1</sup>, 杨梦瑞<sup>1</sup>, 李付凯<sup>1</sup>, 张丽媛<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 农业农村部农产品质量安全重点实验室, 北京 100081;  
2. 天津农学院食品科学与生物工程学院, 天津 300384)

**摘 要:** 全氟化合物(perfluorinated compounds, PFCs)是一类含碳-氟键的高度稳定的极性有机物, 广泛应用于化工领域, 全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)和全氟辛基磺酸(perfluorooctane sulfonic acid, PFOS)是环境中广泛存在的两种典型全氟类污染物, 这两种全氟污染物在土壤、水、食品和生物样品中均有检出, 严重危害到了人类健康和生存环境, 此外全氟类化合物的检测处于痕量水平, 探索更高效提取复杂食品基质中的 PFCs 和更准确的检测方法仍是当下的研究热点。本文对全氟化合物的结构、极性等理化性质和全氟污染物的危害毒性进行概述, 根据其化学性质, 梳理国内外各种前处理方法, 总结气相色谱、液相色谱等方法在分离检测方面的优缺点, 并总结了当下全氟化合物检测所遇的瓶颈, 期望能为当下国内外全氟化合物污染防治和标准制定提供参考依据。

**关键词:** 全氟辛酸; 全氟辛基磺酸; 食品基质; 样品提取; 色谱-质谱检测

## Research progress in detection technology of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid in food

HUANG Chun-Yuan<sup>1,2</sup>, ZHOU Jian<sup>1\*</sup>, LIU Ya-Xuan<sup>2</sup>, WANG Min<sup>1</sup>,  
YANG Meng-Rui<sup>1</sup>, LI Fu-Kai<sup>1</sup>, ZHANG Li-Yuan<sup>1</sup>

(1. Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-products of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory for Quality and Safety of Agricultural Products, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Beijing 100081, China; 2. College of Food Science and Bioengineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

**ABSTRACT:** Perfluorinated compounds (PFCs) are a class of highly stable polar organic compounds containing carbon fluorine bonds, which are widely used in the chemical industry. Perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) are two typical perfluorinated pollutants widely existing in the environment. These two perfluorinated pollutants have been detected in soil, water, food and biological samples, it has seriously endangered human health and living environment. In addition, the detection of perfluorinated compounds is at the trace level. Exploring more efficient extraction of PFCs from complex food matrices and more accurate detection methods are still the current research hotspots. This paper summarized the structure, polarity and other physical and chemical properties of perfluorinated compounds and the harmful toxicity of perfluorinated pollutants. According to their chemical properties, combed various pretreatment methods at home and abroad, summarized the advantages and disadvantages of

基金项目: 青年科学基金项目(21507160)

Fund: Supported by the Youth Science Foundation Project (21507160)

\*通信作者: 周剑, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农业标准物质研究。E-mail: zhoujian\_8382@163.com

\*Corresponding author: ZHOU Jian, Ph.D, Associate Professor, Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-products of Chinese Academy of Agricultural Sciences, No.12, Zhongguancun South ST, Haidian District, Beijing 100081, China. E-mail: zhoujian\_8382@163.com

gas chromatography, liquid chromatography and other methods in separation and detection, and summarized the bottlenecks encountered in the detection of perfluorinated compounds. It is expected to provide a reference basis for the prevention and control of perfluorinated compounds pollution and the formulation of standards at home and abroad.

**KEY WORDS:** perfluorooctanoic acid; perfluorooctane sulfonic acid; food matrix; sample extraction; chromatography mass spectrometry detection

## 0 引言

全氟化合物(perfluorinated compounds, PFCs)及其相关化合物是一类具有强稳定性的化合物,其指有机碳链中的 H 原子全部用 F 原子取代而成的有机化合物<sup>[1-3]</sup>。由于化合物分子上直链烷基具有疏水性,而取代了 H 原子的 F 原子又可以和亲水的基团结合,形成如磺酸盐和羧酸盐的物质,因此全氟化合物可以同时拥有亲水性和亲脂性,由于 C-F 键特殊的结构和稳定的化学性能,全氟化合物及其衍生物广泛应用于纺织<sup>[4]</sup>、皮革<sup>[5]</sup>、农药<sup>[6]</sup>等工业生产中。C-F 键的特殊性,使得 PFCs 能够经受住外界如高温、氧化、强紫外照射等强烈条件而不易被降解<sup>[7-8]</sup>,人体代谢也无法轻易将此类物质排出体外<sup>[9]</sup>。因此,全氟化合物是一类在环境中和生物体中广泛存在且持久性极强的有机污染物。当下许多研究报道已证实 PFCs 广泛存在于大气<sup>[10-11]</sup>、水体<sup>[12]</sup>、食品<sup>[13-14]</sup>、饲料<sup>[15]</sup>和生物体的血液(血浆、血清等)<sup>[16]</sup>,研究表示 PFCs 有内分泌干扰效应,尤其是干扰性激素的合成分泌,对女性生育能力有极其不利的影响;此外还会促进女童的性早熟,提高罹患糖尿病、癌症的风险发生率<sup>[17-18]</sup>。也正是认识到此类有机污染物对环境和生物体的巨大危害,2000 年伊始,世界各国就纷纷对其应用进行评估以及不同程度地限制<sup>[19]</sup>。我国也是一个受 PFCs 污染严重的国家,根据中国农业农村部农产品安全与质量重点实验室的研究指出<sup>[20]</sup>我国长江中下游地区,由于水系发达,PFCs 对禽类、鱼类的污染较为严重,这严重影响到了流域生活居民的安全健康。本文梳理了国内外研究人员对食品中全氟类化合物的检测方法,分析各方法的检测手段,比较各前处理手段、优化选择及仪器选择的适用性,总结检测方法的优缺点,旨在为食品中全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)、全氟辛基磺酸(perfluorooctane sulfonic acid, PFOS)的检测提供理论依据。

## 1 提取方法

PFOA 和 PFOS 分布广泛,在河流<sup>[21]</sup>、土壤<sup>[22-23]</sup>、空气颗粒物、食品(动物源、植物源)等基质中均有检出,且含量处于痕量水平<sup>[24-25]</sup>。因此,PFCs 的提取方法应当快速简便、经济高效、能够满足大量检测需求。现有的 PFOA、PFOS 提取方法主要有以下几类:超声辅助萃取、液液萃取、固相萃取和液固萃取等<sup>[26]</sup>。

### 1.1 超声辅助萃取

刘逸飞等<sup>[14]</sup>发现,利用 NaOH-甲醇溶液进行超声提

取,离心后取上清液,用盐酸溶液将萃取液溶液环境调整为弱酸性(pH=5),再使用 Oasis WAX 柱进行萃取。发现 7 种全氟烷基和多氟烷基(perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances, PFASs)在各种食品中均有不同程度检出,其中 PFOA 在水产品中的检出率最高,奶类检出率最低;PFOS 在禽肉类检出率最高,水产品次之。虽然超声辅助提取法是处理复杂基质较为理想的方法,但超声提取还应与固相萃取法(solid-phase extraction, SPE)等其他萃取方法进行联用,才能够最大程度地得到高纯度的目标成分。

### 1.2 液液萃取

研究证明<sup>[27-28]</sup>,可以通过离子对原理的液液萃取方法提取粮食中的 15 种 PFCs,研究人员利用四甲基硫酸氢氨和甲基叔丁基醚作为萃取剂进行离子对液液萃取,原理是利用全氟类化合物在碱性条件下形成离子型化合物,与四甲基硫酸氢氨形成酯类物质,再通过醚类物质进行富集萃取,能最大程度上达到萃取、净化的目的。虽然离子对萃取方法对全氟类化合物有较好的选择性,但是该方法对液相色谱-质谱仪器的损害比较大。因此,当下研究更偏向利用酸化乙腈、酸化甲醇等对仪器更为温和的复合溶剂进行萃取。虽然液液萃取的前处理方法使用较为广泛,但是在实验操作过程中有一系列的掣肘。首先,该处理手段实验操作步骤烦琐、实验过程中各步骤要求高、实验操作人员的熟练度很大程度上对萃取结果起着决定性的作用。例如上述研究中利用离子对液液萃取提取粮食中 PFCs 时,为提高萃取效率,研究人员在前处理时还选择加入碳酸钠缓冲液,目的是制造出碱性环境使离子反应加快。此外液液萃取时溶剂消耗量很大,且容易出现乳化层干扰实验结果。因此,当下越来越多的研究,都尽量避免了液液萃取法。

### 1.3 固相萃取

固相萃取被广泛应用于医药、食品、环境和化工领域<sup>[29]</sup>。固相萃取是利用选择性吸附与选择性洗脱的液相色谱法分离原理,其主要目的是降低样品基质干扰、提高检测的准确度。固相萃取常用到的填料有 N-丙基-乙二胺、石墨材料、C<sub>18</sub> 材料和树脂材料等<sup>[30-31]</sup>。固相萃取在处理简单、基质较为干净的液体样品时,可以将液体样品直接上样<sup>[32]</sup>。而对于处理复杂的动物源性食品基质时,因基质内含高脂肪、高蛋白质、部分还含有色素,常利用 Oasis WAX 和 Oasis HLB 两种型号的固相小柱进行萃取,尤其是在处理水产品等含复杂基质样品时,通常还会先使用强腐

蚀性或强极性的混合溶液进行消解, PAN 等<sup>[33]</sup>利用硝酸-盐酸的混合溶液对贝类样品进行消解, 再通过 Oasis WAX 固相萃取柱富集净化, 结果表明样品中的加标回收率达到 94.88%~96.24%, 此类固相小柱满足贝类水产品的前处理要求。固相萃取不仅原理简单、操作也比较简便, 尤其当食品基质中含有色素成分时, 色素物质会干扰仪器的质谱离子化, 而利用固相萃取能最大程度降低色素对实验结果的干扰。但是固相萃取依然有较明显的短板, 样品在萃取之前都要进行预处理, 例如粉碎样品为细粒、薄片, 这无疑加大了实验操作量。其次, 粉碎后的基质样品在淋洗液还有洗脱液的作用下, 极易成团、成块, 因此回收率往往较低, 目标成分损失较为严重。

#### 1.4 液固萃取

液固萃取过程中通常用到索氏提取器, 有机溶剂的选择一般是甲醇、乙腈等极性溶剂。此方法结合了前面液液萃取、固相萃取的优点, 大大提高了萃取效率, 是当下检测食品基质中 PFCs 应用更为广泛的前处理手段。但是对于复杂基质的海产品检测中, 由于海产品中蛋白质含量高、脂肪和磷脂等杂质干扰多, 因此使用的极性溶剂更复杂。如王智等<sup>[34]</sup>利用甲酸酸化后的 1%甲酸-乙腈溶液, 经涡旋振荡后, 提取水产制品中 22 种 PFCs, 结果显示该方法下线性良好、回收率在 71.8%~82%, 满足提取要求。液固萃取广泛应用于固体或者半固体样品、以及生物组织样品等领域, 且操作原理简单, 因此常用于提取食品中的微量及痕量成分。但是, 在操作过程中要注意传质作用的影响, 样品粉碎后, 物料样品与溶剂间的相互接触面积增大, 萃取速率明显提高, 但过分粉碎样品会产生样品粉尘, 从而造成固液分离困难, 萃取效率降低等问题。

#### 1.5 QuEChERS

QuEChERS 法的基本步骤如下: (1)粉碎样品; (2)使用单一溶剂(如乙腈)提取、分离; (3)加入盐类物质脱水, 然后盐析分层, 盐类物质如  $MgSO_4$ ; (4)利用吸附剂如 N-丙基乙二胺(primary secondary amine, PSA), 除去基质中的杂质(有机酸、糖类、脂质、蛋白质等); (5)取上清液进行上级检测<sup>[35-37]</sup>。QuEChERS 法是吸收了液固萃取、液液萃取等传统样品处理技术优点, 能有效从复杂基质中提取、分离、净化出痕量水

平的目标成分, 同时配合液相质谱等高灵敏性、高选择性仪器, 能够达到快速检测的目的。相比传统 QuEChERS 法单一溶剂提取, 张文等<sup>[38]</sup>就改进酸化后乙腈对样品基质进行, 并利用石墨化炭黑吸附剂(graphitized carbon black, GCB)、PSA 等混合吸附剂进行净化, 结果显示改进后的方法, 能够有效分离样品中的 15 种 PFCs。而对于基质复杂的动物源性样品, 王莹等<sup>[39]</sup>在前人对 QuEChERS 法改进的基础上, 将样品经 0.2%盐酸-乙腈振荡提取, 改进利用 GCB、 $C_{18}$ 、PSA 3 种混合吸附剂对样品进行净化, 结果发现该方法下 13 种 PFCs 在 0.05~10 ng/mL 范围内线性关系良好, 检出限为 0.02~0.05  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 定量限为 0.06~0.15  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 方法回收率为 62.3%~119.3%, 相对标准偏差为 3.5%~19.9%。此方法灵敏度高、准确度好, 能够满足检测动物源食品中的 13 种全氟化合物的需求。相对于传统的样品处理技术, QuEChERS 法耗时更短、效率更高。尤其在检测食品中 PFCs 的研究中, 针对不同的复杂食品基质 QuEChERS 法趋向成熟。

#### 1.6 衍生化技术

衍生化技术是通过化学反应的方式, 将样品中难以分析的待测物质转化为另一种与其化学结构相似且易于分析的物质, 接着对目标化合物进行定性和定量的分析<sup>[40-43]</sup>。衍生化是一种便于进行分离和检测的提取方法, 由于全氟羧酸结构中含有羧基, 可以针对羧基进行衍生化<sup>[44-47]</sup>, 例如 GUZMÁN 等<sup>[48]</sup>针对西班牙母乳中 10 种全氟羧酸进行气相色谱法-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)检测时, 利用 4  $\mu\text{L}$  吡啶、8  $\mu\text{L}$  异丁醇、10  $\mu\text{L}$  氯甲酸异丁酯与 178  $\mu\text{L}$  乙腈混合后的溶液与样品发生衍生化反应, 再通过气相色谱法-质谱法检测, 结果显示回收率在 70%~120%, 定量限 0.2~0.6 ng/ $\mu\text{L}$ 。虽然经过衍生化后, 利用气相色谱-质谱法分析, 其检出限低, 但是衍生化过程中引入了衍生试剂, 而衍生反应时可能会产生严重干扰全氟羧酸的不可知物质。因此衍生化技术并不是 PFCs 检测时的主流前处理方法。

不同提取方法的比较见表 1。

## 2 检测技术

据近年国内外有关食品中 PFOA、PFOS 检测研究指出, 目前 PFCs 的检测方法以气相色谱-质谱法、高效液相色谱-

表 1 不同提取方法的比较

Table 1 Comparison of different extraction methods

提取方法	样品	样品状态	优缺点	文献来源
超声萃取	生物组织(禽肉)、牛奶	固体、液体	方法简单、萃取部分提取效率略高	[14]
液液萃取	粮食	固体	方法足够简单, 但消耗溶液量大, 操作复杂, 容易出现乳化层	[28]
固相萃取	液体基质、水体、生物组织(贝壳、鱼类)、蛋	液体、固液混合、固体	方法简单, 但净化容易提取不充分	[32-33]
液固萃取	生物组织(肉类、水产)	固体	方法原理简单, 便捷, 但容易有其他基质的影响	[34]
QuEChERS	生物组织(肉类)、茶叶、蜂蜜	固体、液体	快速、便捷、稳定	[38]
衍生化萃取	乳品、蛋类	液体	检测准确, 但容易引入衍生化杂质	[41-43,48]

串联质谱法、超高效液相色谱-质谱法为主<sup>[49-50]</sup>。依据不同基质选取提取方法的不同, 对应的检测方法也不尽相同<sup>[51-54]</sup>。在检测 PFCs 所处理到的基质情况越来越复杂, 检测结果更加注重视效性和准确性的环境下研发一款能大量、快速、准确检测复杂基质中的 PFCs 也是当下的研究热点<sup>[55-57]</sup>。而定量检测食品中 PFCs 常用到的传统检测方法是气相色谱-质谱法、高效液相色谱-串联质谱法、超高效液相色谱-串联质谱法、基质辅助激光解析电离飞行时间质谱法等方法<sup>[58-60]</sup>; 辅以光谱法以及酶联免疫法等非常规方法。

## 2.1 气相色谱-质谱法

气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)是把气相色谱仪与质谱仪串联使用, 拥有简单、便捷等优点。但是由于 PFOA、PFOS 等环境污染物的挥发性较弱, 需要通过衍生化, 才能通过进样检测<sup>[61]</sup>。早在 2010 年, GEBBINK 等<sup>[62]</sup>对北美劳伦山脉大湖地区 15 个群居地收集的银鸥蛋内的 PFOS 异构体进行测定, 利用甲醇为萃取剂, 再进行衍生化处理, 对所得的衍生化产物进行 GC-MS 检测。苏传友等<sup>[63]</sup>在乳中全氟化合物的检测方法研究进展中提到, 采用 GC-MS 分析母乳和婴儿食品中的 PFCs, 样品经过提取后, 进行氮吹, 利用溴甲苯溶液复溶, 60°C 下衍生反应 1 h, 结果显示全氟羧酸类物质(全氟羧酸、全氟壬酸、全氟癸酸等)的回收率分别为 104%、84%、109%, 检出限分别为 40、10、15 ng/L。GC-MS 在检测部分具有挥发性的 PFASs 时有较为良好的反馈, 尤其是当样品中需要区别 PFCs 的同分异构体时, 有较为良好的分辨率。但由于 GC-MS 上机检测时, 对非挥发性的目标物要进行衍生化处理, 因此在检测挥发性较低的全氟化合物时, 衍生化反应不可避免地会引入杂质, 干扰检测, 影响准确性, 其次全氟化合物衍生化实质是甲酯化, 反应过程中也伴随着有毒物质。GC-MS 的应用范围较窄, 操作流程复杂, 引入了多余的物质干扰了实验结果, 且实验过程中伴随有毒物质等原因, GC-MS 在检测食品基质中的 PFCs 时受到了越来越多的限制。

## 2.2 超高效液相色谱-串联质谱法

超高效液相色谱-串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS), 其原理是以液相色谱单级质谱或者多级质谱作为分离系统和检测系统的方法, 检测方法简单且简便、检测结果准确, 因此被广泛运用到检测痕量成分中<sup>[64-67]</sup>, 如王智等<sup>[34]</sup>在检测水产品中 22 种全氟烷基物质时, 建立了一套超高效液相色谱-串联质谱法, 同时检测水产制品中的 22 种全氟化合物, 结果显示, 在此方法下, 22 种 PFASs 在其相应的质量浓度范围内线性关系良好,  $r > 0.994$ , 平均回收率为 71.8%~98.2%, 相对标准偏差为 3.9%~10.9%, 虽然该方法抗干扰能力强、前处理操作简便, 但是却没能排除仪器内全氟材质对结果的干扰。而郭萌萌等<sup>[68]</sup>的研究报告指出, 进行液相色谱-串联质谱法检测分析时, 其流动相溶剂、在线脱气机及色谱流路均可能含有氟聚物而引入干扰, 尤其

是全氟辛酸的仪器背景干扰尤其严重; 因此, 该研究结合杂质延迟技术, 在液相系统混合器和进样器之间串联了一根延迟色谱柱, 从而去除液相系统背景值的干扰, 结果显示, 该方法不仅有较好的回收率, 有效降低了复杂基质的干扰, 还显著提升了方法的准确性和可靠性。UPLC-MS/MS 检出限较低, 适用的环境介质更加多样, 满足对食品基质中的 PFOA、PFOS 的检测要求, 而且 UPLC-MS/MS 对如地表水、地下水以及饮用水等基质较纯净的环境水样也有比较理想的检测效果<sup>[32]</sup>。

## 2.3 高效液相色谱-串联质谱法

UPLC-MS/MS 虽然具有检出限低、抗基质效应干扰能力强、检测便捷、快速等优点<sup>[69-70]</sup>, 但该方法所需仪器昂贵、成本过高且操作专业性强、对操作人员要求极高。因此有研究人员利用高效液相色谱-串联质谱法(high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS)进行检测 PFCs, 虽然该方法下检出限不及 UPLC-MS/MS, 抗基质效应干扰能力相对较弱, 但其拥有无需衍生化, 较其他方式灵敏、操作简便、成本较低等优点, 对于较复杂的基质样品 HPLC-MS/MS 也能达到检测要求, 冷桃花等<sup>[71]</sup>建立了一套 HPLC-MS/MS 测定婴幼儿辅食米粉中的 12 种 PFCs, 前处理中利用 PSA、GCB、C<sub>18</sub> 等混合吸附剂净化样品, 能够有效去除基质效应, 结果显示, 12 种 PFCs 物质的检出限为 0.007~0.15  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,  $r > 0.995$ , 相对标准偏差在 1.25%~15.6%, 该方法前处理检查简单、精密度高、重现性好, 满足婴幼儿辅食米粉中 PFCs 的测定。

## 2.4 共振光散射法

共振光散射法(resonance light scattering, RLS)是一种操作更为简便、成本更低的检测方法, 其原理是基于光散射与分子光吸收发生共振, 从而利用吸收光谱进行分析的方法<sup>[72]</sup>。现有研究人员利用维多利亚蓝 B 共振散射法选择性检测全氟辛酸, 如陈现平等<sup>[73]</sup>利用维多利亚蓝 B 与 PFOS 通过静电作用, 生成离子缔合物, 然后利用光学仪器检测 277 nm 处的散射信号, 从而建立了用维多利亚蓝 B 选择性检测 PFOS 的共振光散射分析方法。该方法下, 其检出限为 5 nmol/L, 样品中的 PFOS 加标回收率为 91.8%~100.6%, 相对标准偏差小于 1.74%, 满足检测要求。虽然共振光散射法灵敏度高、操作简便, 而且光谱特征有更好的选择性等其他分析手段难以提供的优势, 但是其缺点也是明显的, 首先, 其抗干扰能力欠佳, 例如溶剂中的浓度、pH、极性以及折光指数等都会影响检测结果。其次由于散射原理, 该方法下的选择性相对前面几种方法较差, 因为该方法下反映的是检测对象的整体情况, 很难将分析的目标成分与背景干扰成分分开。因此该方法现在很少应用到检测食品基质中的全氟类化合物。

综上, 在检测不同复杂食品基质中的 PFCs 时, 选择合适的检测手段, 是保证检测结果准确的前提。检测特定基质中 PFOA、PFOS 的方法应该是不断优化后的结果, 不同检测方法的比较, 见表 2。

表2 食品中PFOA、PFOS的检测手段比较  
Table 2 Comparison of detection methods of PFOA and PFOS in food

样品基质	目标分析物 (PFCs 检测种类数量)		前处理方式		分析方法	定量方法	检出限		回收率 /%	相对标准偏差 /%	文献来源
	提取	净化	分析	定量			PFOA	PFOS			
饮用水		PFOA、PFOS	/	C <sub>18</sub> 固相萃取	HPLC-MS/MS	内标	1.69 ng/L	2.08 ng/L	84.1~107	2.0~9.2	[32]
水产品 (贝类)	NaOH-CH <sub>3</sub> OH 混合 溶液消解	PFOA、PFOS (9)		Oasis WAX 固相萃取	HPLC-MS/MS	内标	1 μg/L	0.2 μg/L	82~119.8	/	[33]
水产品 (鱼)	1%甲酸乙腈	PFOA、PFOS (22)		C <sub>18</sub>	UPLC-MS/MS	内标	0.10~0.25 μg/kg		71.8~98.2	3.9~10.9	[34]
茶叶	QuEChERS, 乙腈 提取	PFOA、PFOS (15)		PSA、GCB 混合吸附剂 的分散固相萃取	UPLC-MS/MS	外标	20~40 ng/kg		60.5~114.4	2.9~15	[38]
动物源性食品 (肌肉)	QuEChERS, 0.2%盐 酸-乙腈	PFOA、PFOS (13)		PSA、C <sub>18</sub> 和 GCB 3 种吸 附剂分散固相萃取	UPLC-MS/MS	内标	0.03 μg/kg	0.04 μg/kg	92.4~109.1	13.6	[39]
动物源性食品 (肾脏)	QuEChERS, 0.2%盐 酸-乙腈	PFOA、PFOS (13)		PSA、C <sub>18</sub> 和 GCB 3 种吸 附剂分散固相萃取	UPLC-MS/MS	内标	0.02 μg/kg	0.03 μg/kg	98.3~107.1	10.0	[39]
动物源性食品 (肝脏)	QuEChERS, 0.2%盐 酸-乙腈	PFOA、PFOS (13)		PSA、C <sub>18</sub> 和 GCB 3 种吸 附剂	UPLC-MS/MS	内标	0.02 μg/kg	0.03 μg/kg	68.4~110.8	11.4	[39]
水产品 (鱼肉)	1%甲酸-乙腈, 超声 提取	PFOA、PFOS (16)		GCB、C <sub>18</sub>	UPLC-MS/MS	内标	0.015 μg/kg	0.015 μg/kg	70.7~110.1	0.5~12.8	[68]
婴幼儿米粉	酸化乙腈	PFOA、PFOS (12)		PSA、C <sub>18</sub> 、GCB 3 种吸 附剂后, 涡旋振荡	HPLC-MS/MS	内标	0.07 μg/kg	0.15 μg/kg	68.8~115.4	1.25~15.6	[71]
蜂蜜	QuEChERS, 1.5%甲 酸-乙腈振荡提取	PFOA、PFOS (20)		C <sub>18</sub> 和 PSA 吸附剂净化	HPLC-MS/MS	内标	0.04, 1 μg/kg		72.6~113.0	0.4~5.9	[74]
水	/	PFOS		Poly-sery HLB	HPLC-MS/MS	内标	0.25 μg/L		82.1~104.5	2.34~5.64	[75]
饮用水	/	PFOA、PFOS (11)		WAX 固相萃取	UPLC-MS/MS	内标	0.03~0.7 ng/L	0.5~3.0 ng/L	87.1~130	1.27~9.08	[76]
食用植物油	1%甲酸乙腈重复 提取	PFOA、PFOS (15)		离心除杂, 取上清液	UPLC-MS/MS	内标	0.202 μg/kg	0.036 μg/kg	63.5~101.3	0.8~9.4	[77]
蔬菜	离子对液液萃取(甲 基叔丁基醚溶液振 荡提取)	PFOA、PFOS (15)		GCB 粉末净化	UPLC-MS/MS	内标	0.029 μg/kg		71.65~122.57	<19.7	[78]
蛋	乙腈	PFOA、PFOS		WAX SPE 净化	UPLC-MS/MS	内标	0.09 ng/g	0.30 ng/g	85~110	/	[79]
母乳	QuEChERS	PFOA、PFOS (9)		QuEChERS, EMR-Lipid 试剂包净化	UPLC-MS/MS	内标	0.02 μg/kg	0.05 μg/kg	79.5~105.2	7.8~13.2	[80]
牛乳	QuEChERS 试剂	PFOA、PFOS (16)		改进型 QuEChERS 试剂	UPLC-MS/MS	内标	0.04 μg/kg	0.04 μg/kg	78.6~103.4	9.4~11.6	[81]
水产品 (洞庭湖鱼肉)	乙腈, 超声提取	PFOA、PFOS (13)		甲基叔丁基醚, 0.22 μm 聚丙烯膜过滤	UPLC-MS/MS	内标	0.02 ng/g	0.1 ng/g	65~109	3.2~4.8	[82]
水产品 (无脊椎动物)	10 mmol/L KOH 甲 醇溶液, 振荡提取	PFOA、PFOS (13)		WAX SPE 净化	HPLC-MS/MS	内标	0.056 ng/g	0.093 ng/g	61.2~81.5	/	[83]

注: /表示文献中未提及。

### 3 结束语

全氟化合物在环境中广泛存在, 对人类健康具有潜在危害, 我国又是化学品生产和消费大国, 如果不对全氟化合物加以控制, 污染只会越来越严重。目前 PFCs 的检测仍处于痕量水平, 而能有效检测 PFCs 的仪器中又含有大量的全氟类材质的零部件, 因此, 极易造成背景污染, 干扰实验结果。此外, 有不少文献因为缺少相对应的食品基质中的 PFCs 标准物质, 因此普遍通过人为喷洒药物的方式进行样品阳性化处理, 如海产品中的虾、贻贝等食品中较为复杂的基质。人为给药制造出阳性样品是无法完全模拟实际样品的原始情况, 在实际的检测中会造成误差。目前, 检测食品基质中 PFCs 物质, QuEChERS 前处理结合 UPLC-MS/MS 分离检测仍为主要的检测手段。其中对于食品中高蛋白、高脂肪类的食品基质, 通过 SPE 柱净化去除脂质对 PFCs 的干扰也非常有必要。QuEChERS 法结合多步净化步骤, 不仅可减少萃取溶液和内标液的浪费, 还获得了较为满意的回收率, 对食品中 PFCs 的检测分析具有很好的应用前景。但我国对该类物质的检测技术力量与国际发展动态相比仍较为落后, 主要表现在 PFCs 相关标准物质的研制领域, 国内食品基质中 PFCs 标准物质的研发仍处于较为空白的状态, 食品中 PFCs 的分析检测对此类标准物质有着迫切的需求, 亟待国内科研人员解决, 因此, 开发合格食品基质中 PFCs 的基质标准物质有望应用于 PFCs 的分析测定。

### 参考文献

- [1] 李佩佩, 龙举, 方益, 等. 水产品中全氟化合物的分析方法和分布特征的研究进展[J]. 理化检验-化学分册, 2020, 56(6): 735-744.  
LI PP, LONG J, FANG Y, *et al.* Research progress on analytical methods and distribution characteristics of perfluorinated compounds in aquatic products [J]. *Phys Test Chem Anal Part B*, 2020, 56(6): 735-744.
- [2] 叶洪丽, 余玮玥, 史永富, 等. 东海沿岸省市鱼类水产品中全氟烷基化合物含量调查研究[J]. 中国渔业质量与标准, 2019, 9(4): 13-21.  
YE HL, YU WY, SHI YF, *et al.* Investigation on the content of perfluoroalkyl compounds in fish aquatic products in provinces and cities along the East China Sea [J]. *Chin Fish Qual Stand*, 2019, 9(4): 13-21.
- [3] 祖蕾. 全氟化合物的生物降解研究进展[J]. 化学与生物工程, 2021, 38(10): 6-10, 15.  
ZU L. Research progress on biodegradation of perfluorinated compounds [J]. *Chem Bioeng*, 2021, 38(10): 6-10, 15.
- [4] 刘凯祥. 浅析纺织品全氟化合物(PFAS)标准[J]. 纺织报告, 2021, 40(11): 26-28.  
LIU KX. Analysis of textile perfluorinated compounds (PFAS) standard [J]. *Textil Rep*, 2021, 40(11): 26-28.
- [5] 钟哲辉. 重金属及全氟化合物在纺织印染末端废水中的污染特征及生态风险[D]. 上海: 东华大学, 2021.  
ZHONG ZH. Pollution characteristics and ecological risks of heavy metals and perfluorinated compounds in textile printing and dyeing end wastewater [D]. Shanghai: Donghua University, 2021.
- [6] 王颖. 环境基体中全氟化合物和有机氯农药检测方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2021.  
WANG Y. Study on detection methods of perfluorinated compounds and organochlorine pesticides in environmental matrix [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2021.
- [7] PETERSEN KU, HÆRVIG KK, FLACHS EM, *et al.* Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and male reproductive function in young adulthood; a cross-sectional study [J]. *Environ Res*, 2022, 212(PA): 113157.
- [8] ZHANG F. A highly sensitive dual-readout assay for perfluorinated compounds based CdTe quantum dots [J]. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2022, 269: 120753.
- [9] 魏静娜, 王亚旭, 周茜, 等. 一次性纸杯中全氟辛酸及全氟辛烷磺酸的膳食暴露研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 202-209.  
WEI JN, WANG YX, ZHOU Q, *et al.* Dietary exposure of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid in disposable paper cups [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(8): 202-209.
- [10] 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 等. 浙江省大气颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 639-648.  
LI BJ, CHEN JY, LIU ZZ, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of perfluorinated compounds in PM<sub>2.5</sub> in Zhejiang Province [J]. *J Environ Sci*, 2022, 43(2): 639-648.
- [11] 郑宇. 典型城市大气中全氟化合物的污染特征[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.  
ZHENG Y. Pollution characteristics of perfluorinated compounds in the atmosphere of typical cities [D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.
- [12] AHMAN MF, PELDSZUS S, ANDERSON WB. Behaviour and fate of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water treatment: A review [J]. *Water Res*, 2014, 50: 318-340.
- [13] 丁达, 宋昕, 刘朝阳, 等. 某化工园区周边土壤中传统和新兴全氟化合物的赋存特征及潜在来源[J]. 土壤, 2021, 53(4): 779-787.  
DING D, SONG X, LIU CY, *et al.* Occurrence characteristics and potential sources of traditional and emerging perfluorinated compounds in the soil around a chemical park [J]. *Soils*, 2021, 53(4): 779-787.
- [14] 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 perfluorinated compounds in animal derived foods sold in Beijing and risk assessment of residents' intake [J]. *J Environ Sci*, 2021, 40(11): 3360-3367.
- [15] 董姝君, 李晓敏, 李桐, 等. 饲料中新型持久性有机污染物分析方法与污染特征研究进展[J]. 环境化学, 2021, 40(1): 132-140.  
DONG SJ, LI XM, LI T, *et al.* Research progress on analysis methods and pollution characteristics of new persistent organic pollutants in feed [J]. *J Environ Sci*, 2021, 40(1): 132-140.
- [16] 谢琳娜, 张海婧, 侯沙沙, 等. 人血清中 18 种全氟烷烃化合物 UPLC-MS/MS 的测定[J]. 环境卫生学杂志, 2019, 9(5): 494-501.  
XIE LN, ZHANG HJ, HOU SS, *et al.* Determination of 18 perfluoroalkane compounds in human serum by UPLC-MS/MS [J]. *J Environ Hyg*, 2019, 9(5): 494-501.
- [17] 汪子夏, 姚谦, 田英. 全氟化合物对性激素干扰作用的研究进展[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2021, 41(4): 540-545.  
WANG ZX, YAO Q, TIAN Y. Research progress on the interference of perfluorinated compounds on sex hormones [J]. *J Shanghai Jiaotong Univ (Med Ed)*, 2021, 41(4): 540-545.
- [18] 倪娜. 双酚 A、邻苯二甲酸二丁酯及全氟化合物与女童性早熟的相关

- 性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- NI N. Study on the correlation between bisphenol A, dibutyl phthalate and perfluorinated compounds and girls' precocious puberty [D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2021.
- [19] RIETJENS IMCM, SCHRIKS M, HOUTMAN CJ, *et al.* Letter to the editor on Bil *et al.* 2021 "Risk assessment of per- and polyfluoroalkyl substance mixtures: A relative potency factor approach" [J]. *Environ Toxicol Chem*, 2022, 41(1): 7–12.
- [20] QI X, ZHOU J, WANG M, *et al.* Perfluorinated compounds in poultry products from the Yangtze River Delta and Pearl River Delta regions in China [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 689: 1079–1086.
- [21] SAVOCA D, PACE A. Bioaccumulation, biodistribution, toxicology and biomonitoring of organofluorine compounds in aquatic organisms [J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(12): 6276.
- [22] DENG H, WANG H, LIANG M, *et al.* A novel approach based on supramolecular solvent microextraction and UPLC-Q-Orbitrap HRMS for simultaneous analysis of perfluorinated compounds and fluorine-containing pesticides in drinking and environmental water [J]. *Microchem J* 2019, 151(C): 104250.
- [23] CAI Y, CHEN H, YUAN R, *et al.* Toxicity of perfluorinated compounds to soil microbial activity: Effect of carbon chain length, functional group and soil properties [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 690: 1162–1169.
- [24] 齐鹏, 苏日古嘎, 杜艳青, 等. 全氟化合物的污染现状和检测技术的研究进展[J]. *化学世界*, 2021, 62(3): 137–143.
- QI P, SURGG, DU YQ, *et al.* Pollution status of perfluorinated compounds and research progress of detection technology [J]. *Chem World*, 2021, 62(3): 137–143.
- [25] 吴晓妍, 廖佳. 全氟化合物的环境污染及检测方法[J]. *化学世界*, 2021, 62(1): 8–13.
- WU XY, LIAO J. Environmental pollution and detection methods of perfluorinated compounds [J]. *Chem World*, 2021, 62(1): 8–13.
- [26] 范维刚. 全氟辛酸污染及其检测技术研究进展[J]. *日用化学工业*, 2022, 52(1): 62–68.
- FAN WG. Research progress of perfluorooctanoic acid pollution and its detection technology [J]. *China Surfact Deterg Cosmet*, 2022, 52(1): 62–68.
- [27] 贺锦灿, 张诗韵, 苏榆媛, 等. 典型全氟有机酸类化合物的样品前处理与分析方法研究进展[J]. *色谱*, 2020, 38(1): 86–94.
- HE JC, ZHANG SY, SU YY, *et al.* Research progress on sample pretreatment and analysis methods of typical perfluorinated organic acids [J]. *Chin J Chromatogr*, 2020, 38(1): 86–94.
- [28] 胡婷婷, 李玲, 芦春梅, 等. 应用 HPLC-MS/MS 测定粮谷中 15 种全氟烷基化合物残留量[J]. *化学试剂*, 2015, 37(10): 908–912.
- HU TT, LI L, LU CM, *et al.* Determination of 15 perfluoroalkyl compounds residues in grain by HPLC-MS/MS [J] *Chem Reag*, 2015, 37(10): 908–912.
- [29] 朱佩玉, 陈海秀, 高晨. 超声辅助提取-固相萃取净化-高效液相色谱法测定灰渣和污泥中 11 种双酚类及烷基酚类化合物[J]. *化学分析计量*, 2022, 31(3): 41–47.
- ZHU PY, CHEN HX, GAO C. Determination of 11 bisphenol and alkylphenol compounds in ash and sludge by ultrasonic assisted extraction solid phase extraction purification high performance liquid chromatography [J]. *Chem Anal Meter*, 2022, 31(3): 41–47.
- [30] 王敬, 张海超, 贾海涛, 等. QuEChERS/高效液相色谱-串联质谱法测定动物源性食品中 14 种蛋白同化激素残留[J]. *食品工业科技*: 1–13. [2022-07-17]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120163
- WANG J, ZHANG HC, JIA HT, *et al.* Determination of 14 protein assimilation hormone residues in animal derived foods by QuEChERS/high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. *Sci Technol Food Ind*: 1–13. [2022-07-17]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120163
- [31] 谢琳娜, 胡小键, 张海婧, 等. SPE-UPLC-MS/MS 法检测人尿液中全氟化合物的空白值研究[J]. *环境卫生学杂志*, 2020, 10(6): 584–589.
- XIE LN, HU XJ, ZHANG HJ, *et al.* Study on blank value of perfluorinated compounds in human urine by SPE-UPLC-MS/MS [J]. *J Environ Hyg*, 2020, 10(6): 584–589.
- [32] 王开明, 吴晓毓, 张瑞珍, 等. 饮用水中全氟辛酸和全氟辛烷磺酸的固相萃取-高效液相色谱-串联质谱测定法[J]. *广东化工*, 2022, 49(2): 102–103, 107.
- WANG KM, WU XY, ZHANG RZ, *et al.* Determination of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid in drinking water by solid phase extraction high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2022, 49(2): 102–103, 107.
- [33] PAN YY, SHI YL, CAI YQ. Determination of 9 perfluorinated compounds in aquatic products: Fish and shellfish [J]. *Chin J Anal Chem*, 2008, 36(12): 1619–1623.
- [34] 王智, 乔海清, 杨军, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时测定水产品中 22 种全氟烷基物质[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(4): 1132–1140.
- WANG Z, QIAO HQ, YANG J, *et al.* Simultaneous determination of fluoroalkanes in aquatic products by ultra tandem high performance liquid chromatography mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(4): 1132–1140.
- [35] 刘权辉, 王彤彤, 王敏, 等. QuEChERS 在动物源性食品药物残留前处理方法的进展[J]. *化学试剂*, 2020, 42(12): 1424–1429.
- LIU QH, WANG TT, WANG M, *et al.* Progress of QuEChERS in pretreatment of drug residues in food of animal origin [J]. *Chem Reag*, 2020, 42(12): 1424–1429.
- [36] 李红丽. QuEChERS 结合超高效液相色谱串联质谱在动物源性食品兽药残留分析中的应用研究[J]. *现代食品*, 2021, (9): 144–146.
- LI HL. Application of QuEChERS combined with ultra high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry in the analysis of veterinary drug residues in animal derived food [J]. *Mod Food*, 2021, (9): 144–146.
- [37] 杨菊芬, 张新军. QuEChERS 技术在食用农产品农药残留检测中的应用与研究[J]. *食品安全导刊*, 2021, (32): 173–175.
- YANG JF, ZHANG XJ. Application and research of QuEChERS technology in the detection of pesticide residues in edible agricultural products [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2021, (32): 173–175.
- [38] 张文, 陈婷, 闫君, 等. 改进的 QuEChERS-UPLC-MS/MS 法测定茶叶中 15 种全氟化合物[J]. *分析试验室*, 2021, 40(11): 1314–1319.
- ZHANG W, CHEN T, YAN J, *et al.* Determination of 15 perfluorinated compounds in tea by improved QuEChERS UPLC-MS/MS [J]. *Chin J Anal Lab*, 2021, 40(11): 1314–1319.
- [39] 王莹, 杜思宇, 张红, 等. 改进的 QuEChERS-UPLC-MS/MS 法测定动物源性食品中 13 种全氟化合物[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(1): 239–249.
- WANG Y, DU SY, ZHANG H, *et al.* Determination of 13 perfluorinated compounds in animal derived foods by improved QuEChERS UPLC-MS/MS [J]. *Food Ind*, 2021, 42(1): 239–249.

- [40] KHANYILE AT, ANDREW JE, PAUL V, *et al.* A comparative study of supercritical fluid extraction and accelerated solvent extraction of lipophilic compounds from lignocellulosic biomass [J]. *Sustain Chem Pharm*, 2022, 26: 100608.
- [41] WEN L, JIN F, IMASAKA T, *et al.* Esterification of perfluorinated carboxylic acids with bromomethyl aromatic compounds for gas chromatography combined with laser ionization mass spectrometry [J]. *J Chromatogr A*, 2021, 1656: 462546.
- [42] JI Y, CAO Y, HUANG X, *et al.* Simultaneous determination of nine perfluoroalkyl carboxylic acids in chinese wolfberry and soybean by gas chromatography-mass spectrometry with a novel derivatization method [J]. *Food Anal Methods*, 2021, 14(11): 1–8.
- [43] CLIKEMAN TT, WHITAKER JB, KUVYCHKO IV, *et al.* Selective derivatization of perfluoroalkylated fullerenes [C]/. Abstracts of papers of the american chemical society, 1155 16TH ST, NW, Washington, DC 20036 USA: Amer Chemical Soc, 2011.
- [44] LI Z, SUN HW. Cost-effective detection of perfluoroalkyl carboxylic acids with gas chromatography: Optimization of derivatization approaches and method validation [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 17(1): 100.
- [45] HENK L, WILLY JM. Detection-oriented derivatization techniques in liquid chromatography [M]. Boca Raton: CRC Press, 2021.
- [46] DOGRA R, MANDAL UK. Recent applications of derivatization techniques for pharmaceutical and bioanalytical analysis through high-performance liquid chromatography [J]. *Curr Anal Chem*, 2022, 18(2): 217–243.
- [47] ZHENG JY, JIN YY, SHI ZQ, *et al.* Fluorous-paired derivatization approach towards highly sensitive and accurate determination of long chain unsaturated fatty acids by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Anal Chim Acta*, 2020, 1136: 187–195.
- [48] GUZMÁN MM, CLEMENTINI C, PÉREZ-CÁRCELES MD, *et al.* Perfluorinated carboxylic acids in human breast milk from Spain and estimation of infant's daily intake [J]. *Sci Total Environ*, 2016, 544: 595–600.
- [49] ZAKARIA AF, YAHAYA N, RAZNISYAFIQ M, *et al.* Recent advances in applications of hybrid natural polymers as adsorbent for perfluorinated compounds removal-review paper [J]. *J Polym Res*, 2021, 29(1): 1–19.
- [50] LIANG L, PAN Y, BIN L, *et al.* Immunotoxicity mechanisms of perfluorinated compounds PFOA and PFOS [J]. *Chemosphere*, 2021, 291(P2): 132892.
- [51] WANG M, WANG Q, CAI Y, *et al.* Efficient degradation and defluorination of perfluorobutyric acid under UV irradiation in the presence of persulfate [J]. *J Clean Prod*, 2021, 327: 129472.
- [52] WANG C, ZHANG H, ZHU L, *et al.* Simultaneous determination of 11 volatile perfluorinated compound precursors in textiles using gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. *Chin J Chromatogr*, 2021, 39(11): 1239–1246.
- [53] WANG X, CHEN Z, WANG Y, *et al.* A review on degradation of perfluorinated compounds based on ultraviolet advanced oxidation [J]. *Environ Pollut*, 2021, 291: 118014.
- [54] HOU J, LI G, LIU M, *et al.* Electrochemical destruction and mobilization of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) in saturated soil [J]. *Chemosphere*, 2021, 287(Pt3): 132205.
- [55] WANG X, ZHANG Q, ZHAO Z, *et al.* A multi-plug filtration (m-PFC) cleanup method based on carboxylic multi-walled carbon nanotubes for the detection of 14 perfluorinated compounds and dietary risk assessment of chicken, beef, and mutton collected from Shanghai markets [J]. *Food Control*, 2021, 130: 108330.
- [56] DENG H, WANG H, LIANG M, *et al.* A novel approach based on supramolecular solvent microextraction and UPLC-Q-Orbitrap HRMS for simultaneous analysis of perfluorinated compounds and fluorine-containing pesticides in drinking and environmental water [J]. *Microchem J*, 2019, 151(C): 104250.
- [57] LIU JJ, CUI XX, TAN YW, *et al.* Per-and perfluoroalkyl substances alternatives, mixtures and liver function in adults: A community-based population study in China [J]. *Environ Int*, 2022, 163: 107179.
- [58] LIANG M, XIAN Y, WANG B, *et al.* High throughput analysis of 21 perfluorinated compounds in drinking water, tap water, river water and plant effluent from southern China by supramolecular solvents-based microextraction coupled with HPLC-Orbitrap HRMS [J]. *Environ Pollut*, 2020, 263: 114389.
- [59] WEN X, JIA J, CHEN Y, *et al.* Determination of 11 perfluorinated compounds in drinking water by solid phase extraction-ultra high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. *J Hyg Rese*, 2020, 49(2): 272–279.
- [60] SUNGUR Ş, KANAN E, KÖROĞLU M. A comparison of levels of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) in raw and cooked fish [J]. *Toxin Rev*, 2021, 40(1): 59–64.
- [61] 王跃宽, 陈维余, 温守国, 等. 全氟烃类示踪剂的顶空气相色谱检测方法[J]. *精细与专用化学品*, 2020, 28(3): 10–13.
- WANG YK, CHEN WY, WEN SG, *et al.* Detection of perfluorocarbon tracers by headspace gas chromatography [J]. *Fine Spec Chem*, 2020, 28(3): 10–13.
- [62] GEBBINK WA, LETCHER RI. Linear and branched perfluorooctane sulfonate isomer patterns in herring gull eggs from colonial sites across the Laurentian Great Lakes [J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(10): 3739–3745.
- [63] 苏传友, 郑楠, 李松励, 等. 乳中全氟化合物的检测方法研究进展[J]. *中国乳品工业*, 2018, 46(12): 29–33.
- SU CY, ZHENG N, LI SL, *et al.* Research progress on detection methods of perfluorinated compounds in milk [J]. *China Dairy Ind*, 2018, 46(12): 29–33.
- [64] LI S, MA J, WU G, *et al.* Determination of anionic perfluorinated compounds in water samples using cationic fluorinated metal organic framework membrane coupled with UHPLC-MS/MS [J]. *J Hazard Mater*, 2022, 429: 128333.
- [65] LEE M, KIM J, PARK YK. Survey of perfluorinated compounds in consumer products by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Energ Environ*, 2019, 31(4): 0958305X1988237.
- [66] YANG H. Monitoring of perfluorinated compounds from the imported fishery products in Korea by liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) [J]. *Environ Epidemiol*, 2019, 3: 452–453.
- [67] PIVA E, FAIS P, CECCHETTO G, *et al.* Determination of perfluoroalkyl substances (PFAS) in human hair by liquid chromatography-high accurate mass spectrometry (LC-QTOF) [J]. *J Chromatogr B*, 2021, 1172: 122651.
- [68] 郭萌萌, 吴海燕, 卢立娜, 等. 杂质延迟-液相色谱-四极杆/离子阱复合质谱测定水产加工食品中 23 种全氟烷基化合物[J]. *分析化学*, 2015, 43(8): 1105–1112.
- GUO MM, WU HY, LU LN, *et al.* Determination of 23 perfluoroalkyl compounds in aquatic processed foods by impurity delay liquid chromatography quadrupole/ion trap composite mass spectrometry [J].



- Chin J Anal Chem, 2015, 43(8): 1105–1112.
- [69] LERTASSAVAKORN T, PHOLPHANA N, RANGKADILOK N, *et al.* Determination of perfluorooctane sulphonate and perfluorooctanoic acid in seafood and water from Map Ta Phut Industrial Estate area, Thailand [J]. Food Addit Contam Part A, 2021, 38(8): 11–16.
- [70] GAN C, GAN Z, CUI S, *et al.* Agricultural activities impact on soil and sediment fluorine and perfluorinated compounds in an endemic fluorosis area [J]. Sci Total Environ, 2021, 771: 144809.
- [71] 冷桃花, 王亮, 郑翌. 高效液相色谱-串联质谱法测定婴幼儿米粉中 12 种全氟烷基化合物 [J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(23): 8087–8092.
- LENG TH, WANG L, ZHENG Y. Determination of 12 perfluoroalkyl compounds in infant rice flour by high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(23): 8087–8092.
- [72] 向杰, 江虹, 秦丽容. 赖诺普利与维多利亚蓝 B 的显色反应及应用 [J]. 化学世界, 2020, 61(1): 38–42.
- XIANG J, JIANG H, QIN LR. Color reaction of lisinopril with Victoria blue B and its application [J]. Chem World, 2020, 61(1): 38–42.
- [73] 陈现平, 陶艺, 吴飞, 等. 维多利亚蓝 B 共振光散射法高灵敏选择性检测全氟辛酸磺酸 [J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(3): 811–815.
- CHEN XP, TAO Y, WU F, *et al.* Highly sensitive and selective detection of perfluorooctane sulfonic acid by Victoria blue B resonance light scattering [J]. Spectrosc Spectral Anal, 2017, 37(3): 811–815.
- [74] 李帅, 陈辉, 金铃, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定蜂蜜中 20 种全氟烷基化合物 [J]. 色谱, 2017, 35(5): 495–501.
- LI S, CHEN H, JIN L, *et al.* Determination of 20 perfluoroalkyl compounds in honey by high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Chin J Chromatogr, 2017, 35(5): 495–501.
- [75] 郑丽利, 江敏, 吴昊, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定水中全氟辛酸磺酸含量 [J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1): 181–190.
- ZHENG LL, JIANG M, WU H, *et al.* Determination of perfluorooctane sulfonic acid in water by high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. J Shanghai Ocean Univ, 2022, 31(1): 181–190.
- [76] 温馨, 吕佳, 陈永艳, 等. 固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱法测定生活饮用水中 11 种全氟化合物 [J]. 卫生研究, 2020, 49(2): 272–279.
- WEN X, LV J, CHEN YY, *et al.* Determination of 11 perfluorinated compounds in drinking water by solid phase extraction ultra high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. J Hyg Res, 2020, 49(2): 272–279.
- [77] 张文, 闫君, 陈婷, 等. UPLC-MS/MS 法测定食用植物油中 15 种全氟化合物 [J]. 化学试剂, 2022, 44(3): 455–461.
- ZHANG W, YAN J, CHEN T, *et al.* Determination of 15 perfluorinated compounds in edible vegetable oil by UPLC-MS/MS [J]. Chem Reag, 2022, 44(3): 455–461.
- [78] 赵玉乐, 朱冬雪, 黄宝勇, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定蔬菜中 15 种全氟化合物 [J]. 农产品质量与安全, 2017, (3): 42–48.
- ZHAO YL, ZHU DX, HUANG BY, *et al.* Determination of 15 perfluorinated compounds in vegetables by ultra high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Qual Saf Agro-prod, 2017, (3): 42–48.
- [79] 叶童, 陈雨, 符杰, 等. 蛋中全氟/多氟化合物的分析方法及其作为污染指示物的应用 [J]. 色谱, 2021, 39(2): 184–196.
- YE T, CHEN Y, FU J, *et al.* Analytical methods of perfluorinated/polyfluorocompounds in eggs and their application as pollution indicators [J]. Chin J Chromatogr, 2021, 39(2): 184–196.
- [80] 李磊, 周贻兵, 刘利亚, 等. QuEChERS 净化-超高效液相色谱-串联质谱法快速测定母乳中 9 种全氟化合物 [J]. 现代预防医学, 2018, 45(11): 2028–2033, 2038.
- LI L, ZHOU YB, LIU LY, *et al.* Rapid determination of 9 perfluorinated compounds in human milk by QuEChERS purification ultra high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Mod Prev Med, 2018, 45(11): 2028–2033, 2038.
- [81] 李磊, 周贻兵, 李海畅, 等. 牛乳中 16 种全氟化合物及前体物质的改进型分散固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱快速测定法 [J]. 环境与健康杂志, 2020, 37(1): 76–79.
- LI L, ZHOU YB, LI HC, *et al.* Rapid determination of 16 perfluorinated compounds and their precursors in milk by modified dispersive solid phase extraction ultra high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. J Environ Health, 2020, 37(1): 76–79.
- [82] 马梦宇, 赵兴茹, 申金山, 等. 洞庭湖鱼中全氟烷基化合物的污染特征及健康风险 [J]. 环境化学, 2021, 40(4): 1011–1019.
- MA MY, ZHAO XR, SHEN JS, *et al.* Pollution characteristics and health risks of perfluoroalkyl compounds in Dongting Lake fish [J]. Environ Chem, 2021, 40(4): 1011–1019.
- [83] 郭萌萌, 崔文杰, 刘晓玉, 等. 黄渤海区域水产品中全氟烷基物质的分布特征 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(8): 3424.
- GUO MM, CUI WJ, LIU XY, *et al.* Distribution characteristics of perfluoroalkyl substances in aquatic products in the Yellow Sea and Bohai Sea [J]. China Environ Sci, 2020, 40(8): 3424.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

## 作者简介



黄春元, 硕士研究生, 主要研究方向为食品中全氟化合物检测及基体标准物质研制。  
E-mail: 3507603424@qq.com



周 剑, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农业标准物质研究。  
E-mail: zhoujian\_8382@163.com