

# 全氟化化合物的风险评估研究进展

郑佩

舟山市生态环境局岱山分局, 中国·浙江 舟山 316200

**摘要:** 全氟化合物 (PFCs) 是一类备受关注的持久性有机污染物, 因其具有良好的化学稳定性、耐热性和高表面活性等特点, 广泛应用于生产生活中。这些化合物难以降解, 易于在环境中富集并通过食物链传播, 对生态系统和人类构成潜在威胁。PFCs 已在大气、土壤、水体和生物体中被检测发现, 具有免疫毒性、神经毒性、生殖毒性、内分泌毒性和脏器毒性等, 近年来的研究强调其对人类健康和生态系统的潜在影响。因此, 对 PFCs 的风险评估至关重要。论文主要概括了 PFCs 的关键生物毒性效应、暴露途径及其风险评估方法, 为未来 PFCs 的风险管理和研究提供参考依据。

**关键词:** 全氟化合物; 毒性效应; 暴露途径; 风险评估

## Research Progress in Risk Assessment of Perfluorinated Compounds

Pei Zheng

Daishan Branch of Zhoushan Ecological Environment Bureau, Zhoushan, Zhejiang, 316200, China

**Abstract:** Perfluorinated compounds (PFCs) are a class of highly regarded persistent organic pollutants, widely used in production and daily life due to their excellent chemical stability, heat resistance, and high surface activity. These compounds are difficult to degrade, easy to accumulate in the environment and spread through the food chain, posing a potential threat to ecosystems and humans. PFCs have been detected in the atmosphere, soil, water, and organisms, exhibiting immunotoxicity, neurotoxicity, reproductive toxicity, endocrine toxicity, and organ toxicity. Recent studies have highlighted their potential impacts on human health and ecosystems. Therefore, risk assessment of PFCs is crucial. The paper mainly summarizes the key biological toxicity effects, exposure pathways, and risk assessment methods of PFCs, providing reference for future risk management and research of PFCs.

**Keywords:** perfluorinated compounds; toxic effects; exposure pathways; risk assessment

## 1 引言

全氟化合物 (PFCs) 是一类含强碳氟键的人造有机物, 因其具有优良的疏水疏油性、热稳定性和高表面活性, 已在电镀、涂料、纺织等工业领域广泛应用。PFCs 难降解, 具有远距离迁移和生物蓄积等特性, 已在空气、水体、沉积物、土壤甚至极地冰原地区等多种环境介质中检出<sup>[1]</sup>, 在世界多个国家及地区人群中也有检出, 表现出多种毒性效应<sup>[2,3]</sup>, 包括免疫毒性、神经毒性、内分泌毒性、生殖毒性等。全氟辛酸 (PFOS) 和全氟辛酸 (PFOA) 是生产最为广泛、使用最多的两种 PFCs, 先后于 2009 年和 2019 年被列入《联合国关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》附件 B 和附件 A 中, 引发高度关注后逐渐在欧美等发达国家停用。目前, PFCs 的生产在亚洲国家仍旧没有停止, 包括中国在内的亚洲地区国家人群血清中 PFCs 浓度远远高于发达国家水平<sup>[2]</sup>。然而, PFCs 生产和使用需求仍较大, 这类物质的风险评估引发了广泛关注与研究。

## 2 全氟化化合物的毒性研究

### 2.1 免疫毒性

大量实验研究表明, 免疫毒性可能是 PFCs 暴露引发的

最敏感的毒性效应之一。欧洲食品安全局在 2020 年一项儿童接种疫苗后抗体反应的研究中发现, PFCs 是引起机体毒性的关键敏感指标<sup>[3]</sup>。流行病学研究表明, 产前或者儿童期暴露于 PFCs 与儿童免疫接种的抗体浓度降低有关。孕妇产前暴露 PFOS、PFOA、全氟壬酸和全氟己烷磺酸与儿童 3 岁时风疹抗体滴度下降相关, 血清中 PFCs 浓度与 12~19 岁青少年的腮腺炎和风疹抗体浓度降低有关<sup>[4]</sup>。实验研究发现, 雄性 C57BL/6 小鼠饮食暴露 PFOA 和 PFOS 后, 免疫系统被破坏, 脾和胸腺质量减轻, 且胸腺和脾细胞数量也减少。腹腔注射 0.1mmol·kg<sup>-1</sup> PFNA 后, 小鼠脾脏和胸腺发生萎缩<sup>[5]</sup>。

### 2.2 内分泌毒性与生殖毒性

PFCs 具有类雌激素效应、抗甲状腺激素活性和过氧化物酶体增殖物激活受体 (PPAR) 受体激活效应, 这些特性使其能够干扰体内激素的正常功能, 对内分泌系统产生不利影响。小鼠暴露 PFNA 后, PFNA 激活 PPAR 通路<sup>[5]</sup>, 引发体内促肾上腺皮质激素和皮质醇激素的浓度升高。甲状腺激素在生长发育和代谢中扮演重要角色, 研究发现, 患有先天性甲状腺功能减退症的婴儿血液中 PFCs 暴露浓度明显高于健康婴儿, 暗示 PFCs 可能与甲状腺功能异常存在关联<sup>[4]</sup>。

PFCs 暴露可引发男性性腺功能减退、精子质量差等问题,使产生睾酮的莱氏细胞增生,也可导致睾酮浓度降低<sup>[5]</sup>。PFCs 干扰内分泌系统,影响性激素合成与分泌,可能危害生殖系统,这种影响可能对动物和人体的生殖健康造成潜在威胁。

### 2.3 神经毒性

PFCs 可能对人类神经系统产生毒性影响,进而影响行为和认知功能。PFCs 对神经系统的潜在影响包括对神经细胞生长和分化的干扰、对大脑发育的影响、对神经突触形成及其可塑性的干扰、对神经递质传递的扰乱、对离子通道稳定性的影响,以及可能引发神经细胞的氧化应激和神经炎症等。这些影响可能会对人的认知、行为和其他神经功能产生长期影响<sup>[6]</sup>。研究指出,母体和儿童血液中的 PFOA 含量与他们的智商、认知能力、注意力以及神经心理功能测定结果相关联<sup>[7]</sup>,PFOA 和 PFOS 内暴露均与多动症相关。动物实验研究发现,PFOS 可通过胎盘屏障与血脑屏障,进而破坏生长发育关键敏感期时的神经系统,导致不可逆转的损伤。

## 3 全氟化合物的暴露途径

因 PFCs 具有持久性,可长时间存在于环境中,人们可通过多种途径暴露于 PFCs,包括饮食、饮用水、室内空气、母婴传递等途径。其中,饮食摄入和食品包装或炊具中的浸出是主要的暴露途径,也可通过室内粉尘和空气接触到 PFCs。

### 3.1 膳食来源

膳食暴露被认为是人类接触 PFCs 的最重要方式之一。各种常见食品,如蔬菜类、肉类和禽类、蛋类、鱼类和海鲜类等,被检测出含有不同浓度水平的 PFCs<sup>[8]</sup>。据报道,海鲜和肉类分别是造成人体 PFOS 和 PFOA 暴露的主要膳食来源,分别约占 PFOS 和 PFOA 总摄入量的 79% 和 93%。此外,婴儿作为敏感人群,母乳的 PFCs 摄入是婴儿膳食评估的重点,健康风险评估普遍指出,相比成人,婴儿群体面临更高的健康风险。

### 3.2 饮水来源

水体是 PFCs 进入环境的直接受体。根据中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险研究发现,中位浓度为  $14 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ,松辽、太湖流域高于整体水平,黄河、长江部分河段污染水平高,考虑到 PFCs 的蓄积性,其饮水暴露表现出较大的健康风险。11 个省份 13 个城市的饮用水 PFCs 水平检测结果显示,含量最大的 PFCs 是 PFOA, PFOA 和 PFOS 的每日摄入量 (EDI) 分别在  $0.010\text{-}0.159 \text{ ng}/(\text{kg} \cdot \text{d})$  和  $0.006\text{-}0.014 \text{ ng}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

### 3.3 室内空气和灰尘来源

空气是人类和陆生动物接触 PFCs 的重要途径,几乎全天暴露在空气中,通过呼吸系统摄入 PFCs 到体内。对 PFCs 的药代动力学研究发现,人体从灰尘中摄入的 PFCs

量与其血液中浓度之间存在明显的正相关关系。调查研究中发现,幼儿、儿童和青少年通过灰尘摄入 PFOA 和的 EDI 值分别为  $0.870$  和  $0.270 \text{ ng}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ,高于成年人,表明儿童 PFCs 暴露的健康风险高于成人<sup>[9]</sup>。

## 4 全氟化合物的风险评估方法

环境风险评估是一种系统性的过程,旨在评估特定环境下污染物可能对人类、动植物和生态系统造成的潜在危害。在实践中,生态风险评估需要综合毒理学、生态学和环境化学等学科的相关知识,以定量方式确定危害对生物体的负面效应的概率和强度<sup>[10]</sup>。这个过程不仅有助于识别潜在风险,还可以为制定有效的风险管理和监测策略提供依据。

PFCs 的风险评估涉及对 PFCs 暴露、毒性和风险的综合评估,主要内容如下:

①暴露评估。确定人群暴露于 PFCs 的途径和水平,包括识别暴露源、暴露途径和受暴人口。

②毒性/危害评估。评估不同 PFCs 对人体健康的毒性,包括了解慢性暴露的潜在危害,以及确定毒性终点(如免疫系统、生育能力、生长发育、癌症等)。

③风险特征评估。结合暴露和毒性信息,评估 PFCs 对人体健康可能产生的风险,包括确定慢性风险、癌症风险等。

④风险管理。基于风险评估结果,制定和实施风险管理策略,以减少或消除暴露,并保护公众健康。

⑤监测和追踪。持续监测 PFCs 的暴露水平和影响,以及相关研究的进展,以便根据最新信息更新风险评估和管理策略。

在进行生态风险评估时,研究人员通常采用多种方法来预测和识别潜在的危险因素。其中,概率法是一种常见的方法,通过统计数据和概率分析来评估不同危害事件发生的可能性。商值法则是另一种常用的方法,通过将风险转化为货币价值来评估和比较不同类型的风险。此外,基于分布的商法也是一种常见的评估方法,它通过对不同风险事件的概率分布进行建模,以更全面地评估潜在风险。另外,多层次的风险评价法在实践中也得到广泛应用,这种方法考虑了风险的多个维度和层次,从而更全面地评估潜在危险<sup>[11]</sup>。欧盟化学物质风险评价技术指导文件根据风险商 (RQ) 值的大小来评价污染物的生态风险,该方法由于计算简单而被广泛应用。在评估 PFCs 风险时,综合考虑不同 PFCs 的特性、暴露途径、暴露水平、潜在影响等因素,除急性毒性和慢性毒性的实验数据以外,还需综合长期暴露对人类及生态系统的影响和种间关系,以全面评估潜在风险。通过综合考虑这些因素,可以更准确地评估环境中存在的风险,并为制定有效的风险管理策略提供科学依据。

## 5 结语

PFCs 的生态风险评估是一项复杂而关键的工作,它不仅有助于维护人类健康和生态系统的稳定,还为可持续发展

提供重要支持。通过综合利用不同方法和跨学科知识,我们能更好地理解 PFCs 的潜在风险,创造更安全、更健康的生活环境。

#### 参考文献:

- [1] Ge H, Yamazaki E, Yamashita N, et al. Particle size specific distribution of perfluoro alkyl substances in atmospheric particulate matter in Asian cities[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*,2017,19(4):549-560.
- [2] 张美,楼巧婷,邵倩文,等.全氟化合物污染现状及风险评估的研究进展[J].*生态毒理学报*,2019,14(3):30-53.
- [3] 姚谦,田英.中国人群全氟化合物健康风险评估研究进展[J].*上海交通大学学报(医学版)*,2021,41(6):803-808.
- [4] 陈敏燕,汪子夏,田英,等.全氟化合物免疫毒性研究进展[J].*环境与职业医学*,2022,39(2):223-228+235.
- [5] 杜桂珍.全氟化合物PFOA、PFOS内分泌干扰效应的研究[D].南京:南京医科大学,2013.
- [6] 陈晓旭,姜声扬.全氟辛烷磺酸神经毒性研究进展[J].*环境与职业医学*,2017,34(9):847-851.
- [7] 刘晓晖,胡宏,李双月,等.全氟辛烷磺酸神经发育毒性机制研究进展[J].*生态毒理学报*,2013,8(5):643-649.
- [8] Jian J M, Guo Y, Zeng L, et al. Global distribution of perfluorochemicals (PFCs) in potential human exposure source—A review[J]. *Environment International*,2017(108):51-62.
- [9] Zhang T, Sun H W, Wu Q, et al. Perfluorochemicals in Meat, Eggs and Indoor Dust in China: Assessment of Sources and Pathways of Human Exposure to Perfluorochemicals[J]. *Environmental Science & Technology*,2010,44(9):3572-3579.
- [10] 刘勋涛,李春阳,陈汐昂,等.全氟化合物控制政策、识别控制技术以及生态风险评估进展[J].*农业环境科学学报*,2023,42(9):1911-1927.
- [11] Zhao Y G, Wan H T, Law A Y S, et al. Risk assessment for human consumption of perfluorinated compound-contaminated freshwater and marine fish from Hong Kong and Xiamen[J]. *Chemosphere*,2011,85(2):277-283.

作者简介: 郑佩(1982-),女,中国浙江舟山人,本科,工程师,从事环境科学与工程研究。