

# 环境中全氟辛酸(盐)的来源及其污染管控措施探讨

刘云<sup>1,2\*</sup>, 宋烈瑶<sup>3</sup>, 余自力<sup>4</sup>, 蒲薇<sup>1,2</sup>, 李林<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>成都山川百源安全环保技术服务有限公司, 四川 成都

<sup>2</sup>四川金谷园环境检测有限公司, 四川 成都

<sup>3</sup>四川七叠环保科技服务有限责任公司, 四川 成都

<sup>4</sup>四川大学材料研究所, 四川 成都

收稿日期: 2023年8月15日; 录用日期: 2023年9月15日; 发布日期: 2023年9月25日

## 摘要

全氟辛酸(盐) (PFOA)广泛应用于含氟聚合物的合成以及织物整理领域, 是存在于环境介质中最典型的全氟化合物。本文在介绍国内外对全氟辛酸(盐)管控要求的基础上, 分析了环境中全氟辛酸(盐)的主要来源和迁移途径。本文着重从制定全氟辛酸(盐)环境基准体系、全氟辛酸(盐)替代品的开发应用以及污染治理和修复技术等方面提出了控制环境中全氟辛酸(盐)污染的对策与建议。

## 关键词

全氟辛酸(盐) (PFOA), 来源与途径, 环境基准, PFOA替代品, 污染治理与修复

# Discussion on Sources and Pollution Control Measures of Perfluorooctanoic Acid (Salt) in the Environment

Yun Liu<sup>1,2\*</sup>, Lieyao Song<sup>3</sup>, Zili Yu<sup>4</sup>, Wei Pu<sup>1,2</sup>, Lin Li<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Chengdu Shanchuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>Sichuan Jingyuan Environmental Testing Co., Ltd., Chengdu Sichuan

<sup>3</sup>Sichuan Qidie Environmental Technology Co., Ltd, Chengdu Sichuan

<sup>4</sup>Institute of Materials Research, Sichuan University, Chengdu Sichuan

Received: Aug. 15<sup>th</sup>, 2023; accepted: Sep. 15<sup>th</sup>, 2023; published: Sep. 25<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

文章引用: 刘云, 宋烈瑶, 余自力, 蒲薇, 李林. 环境中全氟辛酸(盐)的来源及其污染管控措施探讨[J]. 水污染及处理, 2023, 11(4): 91-98. DOI: 10.12677/wpt.2023.114012

## Abstract

Perfluorooctanoic Acid (salt) (PFOA) is widely applied in fluoropolymeric synthesis and fabric finishing fields and is the most characteristic pollutant present in environmental mediums. In this paper, based on the introduction of the control requirements of PFOA at home and abroad, the main sources and transport pathways of PFOA in the environment are analyzed. Furthermore, the countermeasures and suggestions are proposed in terms of the establishment of environmental criteria system, the development and application of substitutes of PFOA, and pollution control and remediation techniques in order to control the pollution of PFOA in the environment.

## Keywords

Perfluorooctanoic Acid (Salt) (PFOA), Sources and Pathways, Environmental Criteria, Substitutes of PFOA, Pollution Control and Remediation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

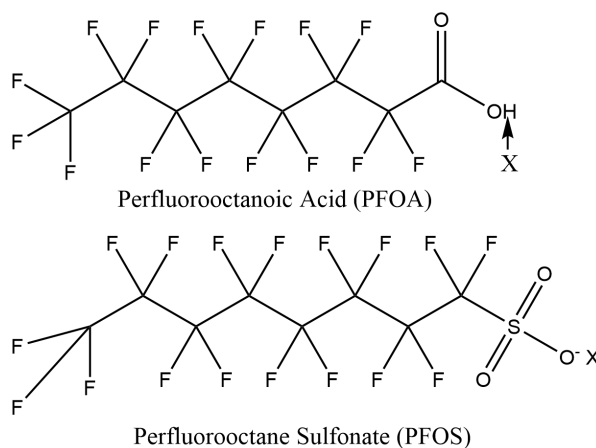
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

全氟化合物(Perfluorinated Compounds, PFCs)是近年来备受关注的一类持久性有机污染物,它具有高表面活性、高热稳定性、高化学稳定性以及优良的疏油、疏水特性,广泛应用于日常消费品和工业生产。PFCs 是人工合成的全氟有机化合物,其 C-F 共价键具有极高的键能(约 460 kJ/mol),因此这类化合物具有很高的稳定性,不易受光、热、化学、微生物和动物代谢作用而降(分)解,并可随食物链的传递在生物体内不断富集和放大。当 PFCs 在动物和人体内的蓄积达到一定浓度阈值,会产生相应的毒性效应,包括脏器毒性、神经毒性、免疫和内分泌毒性、生殖毒性和致癌性等[1] [2] [3],从而对生态系统和人体健康造成持久性的影响。



**Figure 1.** The molecular structures of PFOA and PFOS

**图 1.** PFOA 与 PFOS 的分子结构式

全氟辛烷磺酸及其盐(Perfluorooctane Sulfonate, PFOS)和全氟辛酸及其盐(Perfluorooctanoic Acid, PFOA)分子结构式见图 1 (X 表示阳离子等盐类), 它们是环境中最典型的两类全氟化合物。环境中的 PFOA 和 PFOS 除来自于直接排放外, 也是多种 PFCs 在环境中迁移转化的最终产物。由于 PFOA 和 PFOS 使用量大且难降解, 大量研究表明, 它们是环境中 PFCs 污染物的主要物质[1] [3] [4]。2009 年, 斯德哥尔摩公约缔约方大会已将 PFOS 及其相关化合物列入新型持久性有机污染物(POPs)附录 B, 并已在全球范围内禁止或限制其生产与使用[5] [6]。由于 PFCs 在工业生产中曾经大量合成与使用, 使 PFOA 广泛存在于水体、大气、土壤和底泥等环境中[1] [7] [8]。根据对我国长江流域环境介质中 PFCs 污染情况的调查发现, 长江地表水体和底泥中检出的 PFCs 类污染物以 PFOA 为主[9], 我国已将 PFOA 列入优先管控的新污染物清单。

PFOA 作为持久性有机污染物具有远距离传输性和生物累积性。近年来针对 PFOA 开展的大量环境和人体血液调查表明, 从人体血液检测出的 PFOA 在 1~100  $\mu\text{g/L}$  之间, 而环境水体中检出的 PFOA 也在 ng 级, 有的场所达到 10  $\mu\text{g/L}$  级, 甚至在南半球一些生物体内也可检测到低浓度的 PFOA, 因此 PFOA 污染物已具有全球性分布的特征[10]。PFOA 在世界范围内的广泛分布对生态系统和人类健康存在潜在威胁, 采取积极的 PFOA 污染防控措施已刻不容缓。因而, 掌握环境中 PFOA 污染物的来源及其进入环境的迁移途径对控制 PFOA 的环境污染具有重要的意义。本文在介绍国内外当前对 PFOA 管控要求的基础上, 根据 PFOA 类物质的生产和使用情况, 分析了环境中 PFOA 的主要来源和迁移途径, 并提出了相应的 PFOA 污染防控措施和建议。本文对环境中 PFOA 类物质的来源和途径的分析, 以及对环境中 PFOA 污染防控措施的探讨, 对今后我国环境中 PFOA 来源的解析和防控措施的制定具有一定的参考价值。

## 2. 国内外对 PFOA 的管控要求

2002 年 12 月, 世界经合组织(OECD)召开的第 34 次化学品委员会联合会议上将 PFOA 定义为持久存在于环境、具有生物储蓄性并对人类有害的物质。美国科学顾问委员会(SAB)于 2006 年 1 月 30 日发表报告草案, 建议将 PFOA 分类为“可能性致癌物”, 并建议美国环保署(EPA)将 PFOA 加上有可能诱发肝、睾丸、胰脏和乳腺癌的信息以及 PFOA 会对人体激素分泌、免疫和神经系统产生影响。美国已将 PFOA 列为疑似致癌物质, 要求各大公司在 2010 年前减少 95% 的 PFOA 排放量, 同时于 2015 年全面淘汰 PFOA [5]。根据 EPA 全氟和多氟物质行动计划(EPA's PFAS action plan), 美国已与 8 家 PFCs 主要制造商签署协议, 在 2010~2015 年间逐步减少并最终停止 PFOA 及其相关化学品的生产[11]。

2017 年, 欧盟发布法规(EU) 2017/1000, 对欧盟化学品注册、评估、授权和限制法规(简称 REACH 法规)附件 17 进行了修订, 新增第 68 条关于 PFOA 和相关物质的限制条款, 并要求自 2020 年 7 月 4 日起, 当物品或者混合物中 PFOA 及其盐类质量分数  $\geq 25 \times 10^{-9}$  (即  $\geq 25 \mu\text{g/kg}$ )、PFOA 相关物质单项或总质量分数  $\geq 1000 \times 10^{-9}$  (即  $\geq 1000 \mu\text{g/kg}$ ) 时, 不得生产或者投放市场[6]。2020 年, 欧盟实施的 2020/784 法令将 PFOA 及其盐类纳入 POPs 实施严格的管制。

我国自 2008 年起逐步颁布并实施了一系列涉及 PFOA 的环境管理及其污染物防控措施和要求。2008 年, 原国家环保总局发布第一批 141 种“高污染、高环境风险”产品名录, 其中包括高温热熔融成膜的不粘锅氟树脂涂料、高温热熔融成膜的厨具用防粘氟树脂涂料和高温热熔融成膜的食品机械防粘氟树脂涂等三类含 PFOA 的含氟涂料。原环境保护部于 2016 年 11 月发布《环境标志产品技术要求 纺织产品》(HJ 2546-2016), 该标准规定婴幼儿纺织产品中 PFOA 残余量应低于 0.05  $\text{mg/kg}$ , 其他级别纺织产品中 PFOA 含量应低于 0.1  $\text{mg/kg}$ 。2020 年 11 月, 生态环境部等三部门发布《优先控制化学品名录》(第二批), 将 PFOA 及其盐类和相关化合物列入优先实施环境风险管控的化学品目录[12]。在生态环境部 2021 年公布的《环境保护综合名录(2021 年版)》中, 将以 PFOA 为助剂的不粘锅氟树脂涂料、厨具用防粘氟树脂涂料和食品机械防粘氟树脂涂料等三类产品列入“高环境风险”产品名录[13]。2022 年 5 月, 国务院办

公厅印发《新污染物治理行动方案》，提出了推进 PFOA 等新污染物环境风险管理，建立健全新污染物治理体系的要求。2022 年 11 月，生态环境部等五部门发布《重点管控新污染物清单(2023 年版)》，将 PFOA 和相关化合物(PFOA 类)列入重点管控的新污染物清单，并明确禁止新建 PFOA 生产装置、禁止特定用途外的加工和使用等一系列 PFOA 类物质的环境风险管控措施[14]。上述法规和政策的发布对控制我国 PFOA 的排放、减缓 PFOA 的环境污染将起到重要的作用。

截至目前，在《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》中，关于 PFOA 和相关化合物等 6 种 POPs 实施禁止或限制措施的决定尚未对我国生效。目前我国尚未完全禁止含 PFOA 的原料与产品的使用和销售，我国目前也暂无专门针对 PFOA 的国家强制标准和法规[15]。

### 3. 环境中 PFOA 的来源及迁移途径

#### 3.1. 我国 PFOA 的生产和使用现状

含氟烷基化合物的制备技术主要有电解氟化法、氟烯烃调聚法和氟烯烃齐聚法等三种，在 PFOA 合成中以氟烯烃调聚法为主，PFOA 广泛应用于含氟聚合物合成、纺织品整理和涂料等行业，国内 PFOA 总产量约每年几十吨[16]。我国现已禁止新建 PFOA 生产装置，并禁止除特定用途外的 PFOA 加工和使用[14]。

含氟聚合物是氟化工的主要产品之一，包括氟树脂和氟橡胶两大类，其主要产品有聚四氟乙烯(PTFE)、聚全氟乙丙烯(FEP)、聚偏氟乙烯(PVDF)以及它们的共聚物等，我国含氟聚合物主要生产企业有 8 家，年产能超过 5 万吨，含氟聚合物合成过程部分使用 PFOA 作为乳化剂[17]。在含氟聚合物合成中添加少量的 PFOA 乳化剂即能获得高含量的水性分散液，同时聚合过程稳定且不易发生链转移反应，因此 PFOA 是氟聚合物合成的首选通用助剂，尤其在高分子量 PTFE 的合成方面[18]。尽管含氟聚合物中 PFOA 的含量很少，但当作为氟涂料应用于不粘锅、炊具、食品加工机械时，其与食品直接接触，且有时在较高的温度下使用与接触，极易通过食品等进入人体，存在较大的人群健康风险。研究表明，在 PVDF、PTFE 等含氟聚合物产品中均不同程度地残留有 PFOA [19] [20]。我国已将含 PFOA 氟树脂涂料的产品列入“高风险”产品目录。

含氟整理剂以其优良的性能广泛应用于纺织品的拒水拒油、防污和拒静电的三防整理，我国是全球纺织行业三防整理剂的最大应用市场，据统计，2006 年我国含氟整理剂用量约为 1.1 万吨，其中 95% 以上依赖进口[21]。国内纺织品三防整理剂(乳液)的年需求量在 1.25 万吨以上，含氟整理剂大多数含 PFOA 类物质[17]。目前应用较多的含氟整理剂是全氟烷基磺酰胺类丙烯酸酯聚合物，生产含氟整理剂首先需制备上游单体原料全氟烷基丙烯酸酯，然后采用单体通过乳液或溶剂聚合制备有机氟整理剂。目前单体制备方法主要采用调聚法，该过程伴随副反应生成 PFOA [22]。因此，含氟整理剂均不同程度地含有 PFOA，在其应用于织物整理以及纺织品使用过程中会向环境中释放 PFOA 污染物。

#### 3.2. 环境中 PFOA 的来源分析

在 PFOA 生产、含氟聚合物及织物整理剂的制备及其产品使用过程中，PFOA 可通过不同的途径进入土壤、水体等环境介质。环境中 PFOA 的来源包括直接来源和间接来源，直接来源是指 PFOA 直接排放进入环境，包括 PFOA 的生产、运输、使用，以及含 PFOA 的废弃产品的处置过程。而 PFOA 的间接来源主要为 PFOA 前体物(其它 PFCs 类物质)在环境中的转化产物，即其它 PFCs 在环境中经扩散迁移进入水体、土壤等环境介质，在生物、化学等作用下转化生成 PFOA。具体而言，环境中 PFOA 的直接来源主要有以下几个途径：一是 PFOA 生产企业向环境中的排放；二是印染行业织物整理过程排放的工业废水；第三是含 PFOA 的产品在使用过程中向环境中的释放；最后含 PFOA 的产品废弃后，在填埋场或焚烧厂处置过程中向环境排放的 PFOA。

据统计, 2004~2012 年间我国累积向环境中释放 PFOA 约 250 t, 其中 94% 来自工业排放源, 6% 来自含 PFOA 消费品使用过程。在工业排放源中, 含氟聚合物生产企业贡献了全国累积释放量的 83.7%, PFOA 生产企业贡献了全国累积释放量的 8.3% [23]。因此, PFOA 合成、含氟聚合物和织物表面处理行业是环境中 PFOA 类物质的主要来源。

### 3.3. PFOA 进入环境的迁移途径

PFOA 进入环境的迁移途径包括生产和使用 PFOA 的工业企业排放的废气、废水, 含 PFOA 的产品在日常使用过程以及其作为固体废弃物(如废旧衣物等)进入填埋场或焚烧厂处置过程中向环境中的释放。PFOA 随废水排放进入地表水后可迁移至土壤、底泥和地下水环境。大气中的 PFOA 污染物主要吸附于大气颗粒物中, 其可通过大气干、湿沉降进入水体、土壤等介质。影响 PFOA 在环境中迁移的主要因素包括介质的物理性质(如介质的粒径、表面粗糙度、有机质含量、矿物类型和含水率)、溶液的化学性质(如离子类型、离子强度和 pH)等[24]。而当含 PFOA 的产品以固体废物的形式进入填埋场处置时, PFOA 可随渗滤液的排放进入环境, 或因填埋场防渗层的破损进入土壤和地下水。PFOA 进入环境中的主要途径及其迁移过程见图 2, 环境中的 PFOA 最终会经食物链的传递而富集于人和动物等生物体内而对生态系统和人类健康产生累积性和不可逆的影响。

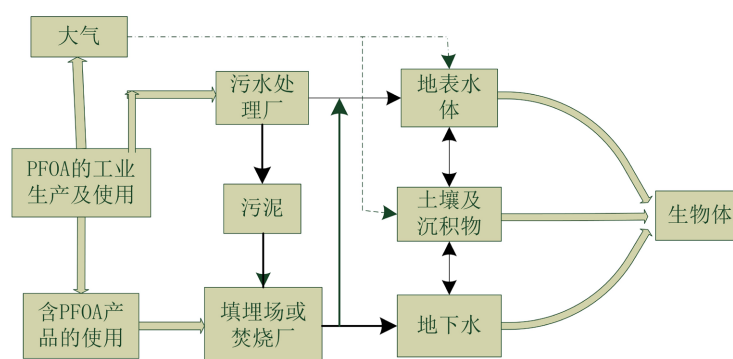


Figure 2. The main pathways and transport trends of PFOA entering the environment  
图 2. PFOA 进入环境的主要途径与迁移归趋

污水处理厂排放的尾水是 PFOA 进入环境的最主要途径。根据对我国中东部环境中 PFOA 的调查研究, 环境中 80~90% 的 PFOA 污染物直接来源于工业生产过程排放的废水, 其它进入环境的途径包括工业废气的排放、生活消费品的使用以及填埋场产生的渗滤液[25]。而纺织印染废水排放的 PFOA 占工业排放总量的 32% [25], 同时垃圾填埋场中纺织品、纸张的浸渍是土壤中 PFOA 污染物的主要来源之一[24]。根据调查研究, 我国七大水系中除黄河外均可检出 PFOA 污染物, 其中长江水体中的浓度值最高[26]。根据对我国江苏、浙江等地的 58 家印染厂废水调节池和污水处理厂排放尾气中 PFCs 的调查表明, PFCs 在印染企业的原水及排放的尾水中被广泛检出, 首要污染物为 PFOA, 其中调节池中原水中 PFOA 的浓度在 1.15~4002.82 ng/L 之间, 企业排放的尾水中 PFOA 的浓度在 2.92~3820.32 ng/L 之间[27]。因此, 随着 PFOA 不断地向环境中释放和迁移, 其已广泛分布于我国的各类环境介质, 对生态环境和人类健康存在潜在的风险。

## 4. 环境中 PFOA 的管控对策与建议

PFOA 在环境中的广泛分布可能引发的环境污染和风险问题已引起全球性的普遍关注, 国内外已对

多种含 PFOA 产品中的 PFOA 含量作出了严格的限定, 并实施越来越严格的管控措施。在采取禁止和限制 PFOA 生产和使用的基础上, 严格控制 PFOA 向环境中的排放及环境中 PFOA 污染物的治理与环境介质修复已势在必行。本文从制定 PFOA 环境基准体系、寻求 PFOA 替代品以控制其生产和使用量以及 PFOA 污染治理和环境修复技术方面, 提出管控 PFOA 环境污染和风险的如下对策与建议。

#### 4.1. PFOA 环境基准体系

目前许多国家已对控制环境中 PFCs 提出了相应的管控标准, 包括推导 PFCs 的预测无效应浓度 (Predicted No Effect Concentration, PNEC) 和 PFCs 环境基准值等, 这将为 PFOA 的环境管理提供科学依据 [28]。环境基准是指环境中污染物对人体健康或环境中的生物不产生不良或有害影响的最大剂量或浓度, 环境基准主要考虑剂量 - 反应关系, 即在不同剂量污染物的环境中, 生态中受体产生的反应。根据美国环保署 (EPA) 发布的临时健康建议确定 PFOA 的环境基值为  $0.4 \mu\text{g/L}$ 。根据调查我国人群血清中 PFOA 分布, 提出了不同年龄段 (<14 岁和  $\geq 14$  岁)、性别 (男性和女性) 和地域 (农村和城市) 人群血清中 PFOA 环境基准值, 不同人群血清中 PFOA 的基准值在  $2.28 \text{ ng/mL} \sim 3.94 \text{ ng/mL}$  之间 [29]。但我国目前还尚未制定基于保护人体健康和生态风险的 PFCs 相关物质的环境基准体系。

考虑到我国对提高生态环境质量和管控 PFOA 等新型污染物的需求, 在充分研究我国当前 PFOA 污染特征、污染物分布和迁移转化规律以及生态毒性的基础上, 应加快研究制定适用于我国环境现状的 PFOA 环境基准, 为我国 PFOA 毒性效应评估、暴露评估、环境风险评估和人体健康风险评估等提供统一的评价指标体系, 同时可对制定 PFOA 重点行业的排放标准、法律法规和政策提供科学依据, 对完善我国在新型污染物方面的环境管理体系建设具有重要的意义。

#### 4.2. PFOA 替代品的开发与应用

在含氟聚合物合成和织物整理过程中向环境中排放的 PFOA 是环境中 PFOA 污染物的主要来源, 因此禁止和限制 PFOA 的生产, 寻求在含氟聚合物合成和织物防水整理方面 PFOA 替代品, 以减少 PFOA 在工业生产中的使用量, 对控制 PFOA 的环境污染具有重要的意义。

在氟树脂和橡胶合成方面, PFOA 替代品的开发主要呈现以下的趋势: 一是开发低碳含氟表面活性剂, 以降低 PFOA 的 C8 生物残留性及其生物危害性; 另一方面为开发主链含杂原子 (如 O 原子) 的全氟聚醚乳化剂, 其具有较好生物可降解性, 可有效降低在生物体中的残留和富集 [30]。但目前尚无能够完全替代 PFOA 适用于所有含氟产品聚合的通用型乳化剂, 所以研制新型环境友好的表面活性剂, 或通过组合、混配来满足不同聚合要求的通用型乳化剂, 成为氟树脂合成领域 PFOA 替代品开发的关键技术。

在织物含氟整理剂替代品的研究方面, 近年来主要集中在开发短链 (C4~C6) 氟碳织物整理剂、低毒低生物累积性的含氟整理剂以及新型无氟整理剂, 同时研究新的氟调聚物工艺以降低织物整理剂中 PFOA 的含量也是从源头上控制 PFOA 污染的重要措施之一 [6] [21] [31], 如采用新型氟调聚物技术制备的全氟己烷磺酸盐 (PFHA) 和全氟己酸 (PFHA) 原料制备的含氟整理剂中基本不含 PFOA (低于检出限) [22]。

#### 4.3. PFOA 去除和环境修复技术研究

由于 PFOA 的高稳定, 传统的污水处理技术对废水中的 PFOA 的去除效果较差 [27]。常规的生物处理工艺并不能将水中 PFCs 降解去除, 其去除的作用主要依靠活性污泥的吸附作用, 因此在实际污水处理中, 活性污泥法等生物处理技术对废水中 PFOA 的去除效果并不明显, 且污泥处置过程 PFOA 会对环境造成二次污染。

现阶段 PFCs (以 PFOA 和 PFOS 为主) 的去除技术研究主要集中于吸附、离子交换、膜分离等物理方法以及电化学氧化、光催化氧化、臭氧氧化、超声波辐照降解等化学方法。张春晖等 [32] 总结了不同工业

废水中最优的 PFCs 去除技术组合工艺, 并给出了不同条件下 PFOA 的去除率。

虽然近年来各种 PFOA 污染处理技术的研究取得了一定的成果, 但是大多仍处于实验研究阶段, 原位环境治理和修复技术的实际应用及多技术的联用将是未来的研究重点。PFCs 去除技术的研究对今后实施含 PFOA 工业废水处理, 以及 PFOA 污染重点区域的水体、土壤和底泥等的环境修复具有重要的意义。

## 5. 结论

PFOA 作为持久性有机污染物一直备受关注, 工业排放源是环境中 PFOA 污染物的最主要来源, 因此限制 PFOA 类物质的生产与使用是控制 PFOA 环境污染的最有效措施之一, 而污水处理厂排放的尾水是 PFOA 进入环境中最主要的途径。在 PFOA 污染防控方面, 首先应逐步建立和完善 PFOA 环境基准体系, 同时鼓励在含氟聚合物合成和织物整理剂领域 PFOA 替代品的开发和应用, 探索高效的 PFOA 污染治理和环境修复技术, 以有效控制环境中的 PFOA 污染物对生态环境和人群健康的影响。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 胡存丽, 种来福. 全氟辛酸磺酸和全氟辛酸毒理学研究进展[J]. 工业医学杂志, 2006, 19(6): 354-358.
- [3] 洪文秀, 费磊, 左胜鹏, 等. 新型 POPs 全氟烷基化合物污染毒理学评述[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(9): 75-82.
- [4] Prevedouros, K., Cousins, I.T., Buck, R.C. and Korzeniowski, S.H. (2006) Sources, Fate and Transport of Perfluorocarboxylates. *Environmental Science and Technology*, **40**, 32-44. <https://doi.org/10.1021/es0512475>
- [5] 王亚韡, 蔡亚岐, 江桂斌. 斯德哥尔摩公约新增持久性有机污染物的一些研究进展[J]. 中国科学(化学), 2010, 40(2): 99-123.
- [6] 章杰, 张晓琴. 近 10 年禁用含氟整理剂的新法规、新替代品和新问题[J]. 印染助剂, 2018, 35(2): 8-14.
- [7] 曹金玲, 席北斗, 许其功, 等. 水环境中 PFOA 和 PFOS 的质量浓度分布及其生态毒性[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 2817-2826.
- [8] Nakata, H., Kannan, K., Nasu, T., et al. (2006) Perfluorinated Contaminants in Sediments and Aquatic Organisms Collected from Shallow Water and Tidal Flat Areas of the Ariake Sea, Japan: Environmental Fate of Perfluorooctane Sulfonate in Aquatic Ecosystems. *Environmental Science & Technology*, **40**, 4916-4921. <https://doi.org/10.1021/es0603195>
- [9] 宋杰玉, 徐婵, 李进, 等. 长江流域全氟化合物污染现状及环境基准探讨[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(9): 219-229.
- [10] 周启星, 胡献刚. PFOS/PFOA 环境污染行为与毒性效应及机理研究进展[J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2153-2162.
- [11] U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2019) EPA's PFAS Action Plan. [https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-02/documents/pfas\\_action\\_plan\\_021319\\_508compliant\\_1.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-02/documents/pfas_action_plan_021319_508compliant_1.pdf)
- [12] 生态环境部, 工业和信息化部, 国家卫生健康委员会. 关于发布《优先控制化学品名录(第二批)》的公告[EB/OL]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202011/t20201102\\_805937.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202011/t20201102_805937.html), 2020-11-02.
- [13] 生态环境部办公厅. 关于印发《环境保护综合名录(2021 年版)》的通知[EB/OL]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202111/t20211102\\_958837.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202111/t20211102_958837.html), 2021-11-02.
- [14] 生态环境部, 工业和信息化部, 农业农村部, 等. 重点管控新污染物清单(2023 年版) [EB/OL]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk02/202212/t20221230\\_1009167.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk02/202212/t20221230_1009167.html), 2022-12-30.
- [15] 杨兴, 何陆春. 纺织品用无氟防水整理剂的现状及进展[J]. 印染助剂, 2022, 39(5): 11-15.
- [16] 巩加文, 付师庆, 周鹏飞, 等. 全氟辛酸的生产、应用及回收处理技术研究进展[J]. 有机氟工业, 2022(4): 39-43.
- [17] 梅胜放. 我国 PFOS/PFOA 的生产、应用以及国内外标准现状[J]. 有机氟工业, 2008(1): 21-25.
- [18] 张德成, 姜文军. 高相对分子质量聚四氟乙烯的制备[J]. 化工生产与技术, 2009, 16(4): 1-4.
- [19] 钟军, 陈剑君, 胡伟, 等. 氟聚合物中残留 PFOA 和 PFOS 含量分析方法研究[J]. 化工生产与技术, 2009, 16(6): 6-8.
- [20] 王利兵, 吕刚, 刘绍从, 等. 气相色谱-质谱法测定氟涂料中全氟辛酸及其盐类物质[J]. 理化检验(化学分册), 2008, 44(3): 228-230.

- [21] 邢航, 周洪涛, 肖进新. 氟表面活性剂和氟聚合物(VIII)-含氟织物整理剂的发展及建议[J]. 日用化学工业, 2016, 46(8): 433-440.
- [22] 章杰. 禁用含氟表面活性剂及其整理剂的新型替代品[J]. 印染, 2009, 35(3): 47-51.
- [23] 李力, 胡建信, 刘建国, 等. 环境中全氟辛酸及其盐类的来源[C]//持久性有机污染物论坛 2017 暨第十二届持久性有机污染物学术研讨会论文集. 2017: 507-508.
- [24] 李辉, 董纤凌, 龚天添, 等. PFOA 和 PFOS 在介质中迁移行为和数值模拟研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2589-2602.
- [25] Liu, Z., Lu, Y., Wang, P., *et al.* (2017) Pollution Pathways and Release Estimation of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) and Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in Central and Eastern China. *Science of the Total Environment*, **580**, 1247-1256. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.085>
- [26] 许罗, 林秋风, 李聪, 等. 典型全氟化合物污染现状及其处理技术研究进展[J]. 中国给水排水, 2022, 38(10): 56-62.
- [27] 顾春节, 钟哲辉, 徐晨焱, 等. 印染末端废水中全氟化合物的污染特征、影响因素及风险评价[J]. 环境化学学报, 2021, 41(5): 1920-1929.
- [28] Giesy, J.P., Naile, J.E., Khim, J.S., *et al.* (2010) Aquatic Toxicology of Perfluorinated Chemicals. In: *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, Vol. 202, Springer, New York, NY, 1-52. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1157-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1157-5_1)
- [29] 李笑. 我国一般人群血清中 PFOS 和 PFOA 分布特征及基准值[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [30] 陆雯, 张冰冰, 朱鹰, 等. PFOA 替代品研究及其在氟橡胶中的应用[J]. 有机氟工业, 2011(2): 20-23.
- [31] 陈荣圻. PFOS 与 PFOA 替代品取向新进展[J]. 印染助剂, 2012, 29(12): 1-10.
- [32] 张春晖, 刘育, 唐佳伟, 等. 典型工业废水中全氟化合物处理技术研究进展[J]. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1109-1118.