



关于持久性有机污染物的 斯德哥尔摩公约

持久性有机污染物审查委员会
第十五次会议
2019年10月1日至4日，罗马

持久性有机污染物审查委员会第十五次会议工作报告

增编

全氟己烷磺酸（PFH_xS）、其盐类及其相关化合物风险管理评价

在 POPRC-15/1 号决定中，持久性有机污染物审查委员会第十五次会议根据秘书处的说明（UNEP/POPS/POPRC.15/2）所载的草案，在会议期间经过修订，通过了关于全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的风险管理评价。所通过的风险管理评价案文载于本增编附件。案文未经正式编辑。

附件

全氟己烷磺酸（PFH_xS）、其盐类及其 相关化合物

风险管理评价

2019年10月

目录

执行摘要	4
1. 引言	5
1.1 全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的化学特性	5
1.2 持久性有机污染物审查委员会对于附件 E 资料的结论	7
1.3 数据来源	7
1.4 该化学品受国际协定和组织管辖的现状	7
1.5 国家和区域风险管理	7
2. 与风险管理评价相关的摘要资料	10
2.1 确定可能的管控措施	13
2.2 可能的管控措施在实现降低风险目标方面的成效和效率	15
2.2.1 技术可行性	16
2.2.2 实施管控措施的成本和效益	16
2.3 关于替代品（产品和工艺）的资料（如相关）	16
2.3.1 特定应用的替代物质	17
2.3.1.1 氟化灭火泡沫	18
2.3.1.2 金属镀层	21
2.3.1.3 纺织品，包括皮革和垫衬物	22
2.3.1.4 抛光剂和清洁剂/洗涤剂，包括涂料、浸渍/防护（用于防潮、防真菌等） ...	23
2.3.1.5 电子产品和半导体制造	23
2.3.2 其他用途	24
2.4 关于实施可能的管控措施所造成社会影响的资料摘要	24
2.4.1 健康，包括公共健康、环境健康和职业健康	25
2.4.2 农业，包括水产养殖业和林业	26
2.4.3 经济方面和社会成本	27
2.4.4 向可持续发展迈进	29
2.5 其他考虑因素	30
2.5.1 获取信息和公众教育	30
2.5.2 控制和监测能力的现状	31
3. 资料综述	31
3.1 风险简介资料摘要	31
3.2 风险管理评价资料摘要	32
3.3 建议采取的风险管理措施	33
4. 结语	33
参考文献	34

执行摘要

1. 2017年5月，挪威提交了一份提案，建议将全氟己烷磺酸（PFH_xS）、其盐类及其相关化合物列入《斯德哥尔摩公约》附件 A、B 和（或）C。持久性有机污染物审查委员会在2017年10月的第十三次会议上对该提案（UNEP/POPS/POPRC.13/4）进行了审查并通过了 POPRC-13/3 号决定。委员会决定设立一个闭会期间工作组，编写全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物风险简介草案，供2018年9月的第十四次会议审议。委员会通过了风险简介（UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1），并设立了一个闭会期间工作组，负责编写一份风险管理评价，其中包括分析有可能按照《公约》附件 F 对全氟己烷磺酸采取的控制措施，供委员会第十五次会议审议。
2. 本风险管理评价涵盖的物质包括全氟己烷磺酸（化学文摘社编号 355-46-4）、其盐类及其相关化合物，其定义是结构成分中含有 C₆F₁₃SO₂ 化学根且可能降解为全氟己烷磺酸的任何物质。
3. 在历史上，3M 公司是主要生产商，该公司已于2002年停止生产 C₆、C₈ 和 C₁₀ 全氟烷基磺酸。关于目前全球全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物生产情况的资料有限。确定了几家位于中国的生产商，但无法从公开渠道获得产量数据。全氟己烷磺酸、其盐类以及许多全氟己烷磺酸相关化合物被列入各国的国家化学品清单，说明含这些物质的产品曾经或现在被生产、进口和（或）使用。
4. 至少在以下应用中，全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物被有意识地使用：(1) 消防用水成膜泡沫；(2) 金属镀层；(3) 纺织品、皮革和垫衬物；(4) 抛光剂和清洁/洗涤剂；(5) 涂层、浸渍/防护（用于防潮、防霉等）；电子产品和半导体制造。此外，其他潜在用途种类可包括杀虫剂、阻燃剂、纸张和包装、石油工业和液压油。全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物被用于某些基于全氟和多氟烷基化合物的消费品。还有一些全氟和多氟烷基化合物在电解氟化（ECF）过程中会无意中产生全氟己烷磺酸。在许多应用中，全氟己烷磺酸被用作全氟辛烷磺酸的替代品。
5. 关于全氟己烷磺酸及其相关化合物用途的资料虽然有限，但足以证明，其用途与全氟辛烷磺酸和全氟辛酸相似。全氟辛烷磺酸、其盐类及全氟辛基磺酰氟以及全氟辛酸的替代品评估表明，所有应用都有技术上可行且已经投入使用的替代品。此外，在持久性有机污染物审查委员会的评估过程中，没有缔约方提交全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的豁免请求，这意味着改用化学替代品和非化学技术解决方案是可行的。
6. 国际化学品管理战略方针（化管方针）在全球一级开展的某些活动，重点是收集和交换关于全氟化学品的信息，以及支持向更安全的替代品过渡。美国实施了逐步淘汰长链全氟和多氟烷基化合物及相关化合物（包括全氟己烷磺酸）的自愿措施。2017年，全氟己烷磺酸及其盐类被欧洲联盟（欧盟）认定为高度关注物质，并被列入《化学品注册、评估、许可和限制条例》（REACH）的候选清单。2018年，欧盟启动了限制进程。
7. 全氟己烷磺酸在其生命周期的所有阶段都会排放到环境中，但据推断在使用寿命内和报废阶段的排放量最高。不过，制造厂也被证明会造成全氟己烷磺酸的大量释放。
8. 根据目前掌握的情况，业界有望替代全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物，而不会产生重大的社会经济成本。此外，由于预期效益相当可观（如可以降低缓解和清理成本），因此禁止或限制使用全氟己烷磺酸的总体效益有望超过预期成本。据估计，对使用灭火泡沫的训练场和机场、垃圾填埋场（特别是接收工业和危险废物的填埋场）进行修复，以及从这些场所附近的饮用水和水源中去除全氟和多氟烷基化合物（包括全氟己烷磺酸）需要高昂的费用。实施全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的控制措施将有助于避免将来产生这些费用。

9. 在全球消除全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物有望为人类健康和环境产生正面影响。因此，最有效的管控措施是将此类物质列入《公约》附件 A，且不设生产和使用豁免。

1. 引言

1.1 全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的化学特性

10. 风险简介（UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1）描述了全氟己烷磺酸的化学特性，内容与持久性有机污染物审查委员会第十三次会议作出的决定（POPRC-13/3 号决定）一致。化学特性包括：

- (a) 全氟己烷磺酸（化学文摘社编号 355-46-4，PFHxS）；
- (b) 结构成分中含有 C₆F₁₃SO₂-化学根且可能降解为全氟己烷磺酸的任何物质。

11. 全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物（包括线性和支链异构体）家族包括多种化学品。经合组织制定了一份新的全氟和多氟化学品清单，其中包含多达 4 730 种物质，该清单包含全氟己烷磺酸相关物质/前体物质/聚合物物质（[http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO\(2018\)7&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO(2018)7&doclanguage=en)）。此外，在《化学品注册、评估、许可和限制条例》下制定的限制提案涵盖 147 种全氟己烷磺酸化合物（欧洲化学品管理局，2019b）。秘书处于 2018 年 9 月将这份包含 147 种化合物的非详尽清单，与要求提供附件 F 资料的信函一并发送给缔约方和观察员。这份全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物以及聚合物和混合物的清单是根据经合组织已查明的全氟和多氟化合物物质数据库以及 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4 号文件附件的附录二（挪威环境署 M-792 号报告中查明的全氟己烷磺酸及其相关物质的非详尽清单）汇编而成。

12. 下表 1 列出了全氟己烷磺酸的化学特性，表 2 列出了全氟己烷磺酸的某些模拟和实验理化属性。

表 1. 全氟己烷磺酸的化学特性

化学文摘社编号：	355-46-4
国际化联名称：	1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-全氟己烷-1-磺酸
欧洲委员会编号：	206-587-1
欧洲委员会名称：	全氟己烷-1-磺酸
分子式：	C ₆ F ₁₃ SO ₃ H
分子量：	400.11
别名：	PFHxS PFHS 全氟己烷磺酸； 1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-全氟己烷-1-磺酸； 全氟己烷-1-磺酸； 1-己烷磺酸，1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-十三氟-； 1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-十三氟-1-己烷磺酸； 十三氟己烷磺酸
全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的商品名称：	RM70（化学文摘社编号 423-50-7）、RM75（3871-99-6）和 RM570（化学文摘社编号 41997-13-1）（意大利 Miteni 股份公司以前生产的全氟己烷磺酸相关化合物）。FC-95 Fluorad 品牌氟化表面活性剂（化学文摘社编号 3871-99-6）含有 3M 公司以前生产的全氟己烷磺酸钾。

表 2. 全氟己烷磺酸的相关理化属性概览¹

属性	数值	参考文献
20 摄氏度和 101.3 千帕条件下的物理状态	全氟己烷磺酸钾呈固态白色粉末状	欧洲化学品管理局 (2017a) 引述 (公司提供)
熔点	320 K (41 摄氏度)	Kim 等人, 2015
沸点	238–239 摄氏度	Kosswig, 2000 (测量值)
离解常数 (pKa)	-3.45 -3.3±0.5 -5.8±1.3	Wang 等人, 2011a (COSMOtherm) ACD/Percepta 14.2.0 (Classic) ACD/Percepta 14.2.0 (GALAS)
蒸汽压	58.9 帕 (0.0046 毫米汞柱)	Wang 等人, 2011a (COSMOtherm) *
水溶性	1.4 克/升 (全氟己烷磺酸钾; 20–25 摄氏度) 2.3 克/升 (未离解)	Campbell 等人, 2009 (测量值) Wang 等人, 2011a (COSMOtherm) *
空气/水分配系数, Kaw (对数值)	-2.38	Wang 等人, 2011a (COSMOtherm) *
正辛醇/水分配系数, Kow (对数值)	5.17	Wang 等人, 2011a (COSMOtherm) *
辛醇-空气分配系数, Koa (对数值)	7.55	Wang 等人, 2011a (COSMOtherm) *
有机碳/水分配系数, Koc (对数值) (流动性)	2.05 2.40 2.31 (范围: 1.8–2.76)	Guelfo 和 Higgins, 2013 (测量值) D'Augustino 和 Mabury, 2017 (测量值) Chen 等人, 2018 (现场数据)

* Wang 等人 (2011a) 的估计值仅针对全氟己烷磺酸的中性形式。应当注意的是, 由于其离解常数低, 全氟己烷磺酸在环境条件下以阴离子形式存在。因此, 如 Schwarzenbach 等人 (2002) 和 Wang 等人 (2011a) 建议, 要描述全氟己烷磺酸的中性和电离物质在环境中的分配, 需要将中性形式的分配系数估计值转换成各自的分配比率。

13. 文献中报告了用于检测全氟己烷磺酸的分析方法, 这些方法可用于测量几乎所有环境介质中的全氟己烷磺酸及全氟和多氟烷基化合物 (详见 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4)。就针对物品和产品的分析而言, 虽然没有标准化的分析方法, 但可以用现行的 CEN/TS 15968 标准对涂覆和浸渍的固体制品、液体及灭火泡沫中的全氟辛烷磺酸进行测定, 以确定离子型全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的水平。ISO 23702-1: 2018 09 15 号标准“皮革-有机氟-第 1 部分”说明了皮革和涂装皮革中可提取的中性、离子、长链、中链和短链全氟和多氟物质的检测和定量标准。ISO 25101 号标准说明了水中的全氟辛酸和全氟辛烷磺酸的分析方法。针对水中 27 种全氟和多氟烷基化合物的国际标准制定工作已经启动 (<https://www.anses.fr/en/system/files/EAUX2018SA0027EN.pdf>)。据 Herzke 等人 (2012) 报告, 对于具有挥发性的中性全氟己烷磺酸相关化合物, 可以使用另一种分析仪器 (GC/PCI-MS) 来检测全氟己烷磺酸及其相关化合物。由于没有标准化的全氟己烷磺酸检测方法, 也没有经过认证的全氟己烷磺酸相关化合物分析标准, 因此难以对产品进行市场监督。对于个别全氟己烷磺酸相关物质也缺乏标准化检测方法。不过, 一些非标准化方法可在商业上用于检测全氟和多氟烷基化合物前体总量, 例如检测可提取有机氟 (EOF) 总量或可氧化前体 (TOP) 总量 (实例见 https://www.eurofins.se/media/1568225/top_precursor_short_facts_170613.pdf)。

¹ 这指的是线性全氟己烷磺酸。

1.2 持久性有机污染物审查委员会对于附件 E 资料的结论

14. 2017 年 5 月，挪威提交了一份提案，建议将全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物列入《公约》附件 A、B 和（或）C。委员会在第十三次会议上审查了该提案（UNEP/POPS/POPRC.13/4）并决定设立一个闭会期间工作组，以编写全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物风险简介草案（POPRC-13/3 号决定）。委员会在第十四次会议上通过了风险简介（UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1），并决定，全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物可能因为远距离环境迁移而对人类健康和环境造成重大不利影响，因而有必要采取全球行动（POPRC 14/1 号决定）。委员会设立了一个闭会期间工作组，负责编写一份风险管理评价，包括分析有可能按照《公约》附件 F 对全氟己烷磺酸采取的控制措施，供第十五次会议审议。

1.3 数据来源

15. 风险管理评价是利用风险简介（UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1）中所载资料以及缔约方和观察员提交的附件 F 资料制定的。下列缔约方和观察员提交了资料：加拿大、德国、印度、日本、大韩民国、瑞典、英国、欧洲成像和印刷协会（I&P Europe）、国际消除持久性有机污染物网络（IPEN）和阿拉斯加社区毒物行动（ACAT）。各方提交的所有附件 F 资料均可在《公约》网站上查阅。²

16. 数据来源还包括从科学数据库（如 ISI Web of Science 和 PubMed）获得的科学文献，以及其他公开资料，如政府报告、风险和危险评估、行业情况说明书等。

1.4 该化学品受国际协定和组织管辖的现状

17. 化管方针将全氟化学品认定为令人关切的问题。其工作重点是收集并交换关于全氟化学品的信息以及支持向更加安全的替代品过渡（<http://www.saicm.org/tabid/5478/Default.aspx>）。经合组织提供了一份关于各国降低全氟和多氟烷基化合物风险的近况综述（经合组织，2015）。参与此项调查的国家的答复表明，现有的国家和（或）区域监管框架大体囊括了各种针对全氟和多氟烷基化合物的降低风险办法，并主要涵盖长链全氟和多氟烷基化合物及其前体和盐类。各国采用的降低风险办法类型各不相同，但往往将自愿办法与监管办法结合起来使用。

1.5 国家和区域风险管理

18. 2017 年，全氟己烷磺酸及其盐类被欧洲联盟认定为高度关注物质，并被列入《化学品注册、评估、许可和限制条例》的候选清单，因为其具有持久性和生物累积性（欧洲化学品管理局，2017a）。全氟己烷磺酸符合“高持久性、高生物累积性”（vPvB）物质的标准。毒性和生态毒性未进行评估。将其认定为高持久性、高生物累积性物质意味着，除了监管机构加强风险管理外，制造商、进口商和供应链必须最大限度地减少该物质在其整个生命周期内的排放，并减少环境和人类接触。列入候选清单之后，在浓度大于 0.1% 的情况下，供应商须根据《化学品注册、评估、许可和限制条例》第 33 条履行告知义务（德国提交的附件 F 资料）。在后续工作中，挪威提交了一份《化学品注册、评估、许可和限制条例》附件十七的修正提案，目的是限制全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的制造、使用和销售，提交日期为 2019 年 4 月 12 日（欧洲化学品管理局，2019a、b）。

19. 一些全氟己烷磺酸相关化合物（非全氟己烷磺酸本身）被列入了加拿大国内物质清单（DSL）（加拿大环境部，2013），该清单收录了在加拿大以商业规模制造、进口或使用的物质。任何人如果打算在加拿大进口或制造一种未被列入加拿大国内物质清单的物质

² <http://chm.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/Meetings/POPRC14/POPRC14Followup/PFHxSInfoSubmission/tabid/7826/Default.aspx>.

（例如全氟己烷磺酸、全氟己烷磺酰氟或全氟己烷磺酸相关化合物），都必须按照《新物质通知条例》提交通知。该条例旨在确保新物质在投放到加拿大市场之前必须经过生态和人类健康评估。在该程序下可以实施管理措施，以减轻对环境或人类健康构成的风险。在美国，未经美国环境保护局（美国环保局）事先对新用途进行评价，禁止将此类化学品用于新用途（美国政府，2002；2007）。美国环保局于2009年发布了一项关于长链全氟和多氟烷基化合物（定义为链长 C₅ 以上的全氟磺酸和链长 C₇ 以上的全氟羧酸），包括全氟己烷磺酸及其盐类和前体的行动计划。所有长链全氟和多氟烷基化学品都被认定为可能具有持久性、生物累积性和毒性（美国环保局，2009）。美国环保局于2019年2月发布了一份更广泛的全氟和多氟烷基化合物行动计划，其中列出了环保局正在采取的更多步骤，目的是更好地了解和管理全氟和多氟烷基化合物，包括全氟己烷磺酸（美国环保局，2019）。华盛顿州最近通过了一项法案，禁止在食品包装中使用全氟化学品（<https://www.foodpackagingforum.org/news/washington-state-bans-pfass-in-food-packaging>），并限制其在灭火泡沫和个人防护装备中的使用（<https://ecology.wa.gov/Waste-Toxics/Reducing-toxic-chemicals/Addressing-priority-toxic-chemicals/PFAS/Toxics-in-firefighting>）。

20. 在澳大利亚，澳大利亚国家工业化学品通知与评估方案（NICNAS）制定了一项行动计划，对可降解为全氟羧酸、全氟烷基磺酸及类似化学物质的化学品进行评估与管理。该行动计划中提出的主要假设是，磺酰基封端的全氟链化学品将降解为（链长相等的）全氟烷基磺酸（澳大利亚国家工业化学品通知与评估方案，2017a、b、c 和 d）。

21. 欧盟和全球都没有适用于全氟己烷磺酸的统一分类或标签制度。不过，在澳大利亚，全氟己烷磺酸相关化合物被纳入《清单多层评估和优先次序》（IMAP）框架，该框架包括人类健康和环境评估（澳大利亚国家工业化学品通知与评估方案，2017c）。澳大利亚国家工业化学品通知与评估方案对可降解为全氟羧酸、全氟烷基磺酸及类似化学物质的化学品进行评估与管理的行动计划规定，如果没有可供使用的特定化学品数据，则使用全氟辛酸磺酸的危害资料来估算全氟己烷磺酸钾、全氟己烷磺酸铵、全氟己烷磺酸二乙醇氨盐和全氟己烷磺酰氟的全身性健康危害。关于人类健康风险，联合国《全球化学品统一分类和标签制度》（《全球统一制度》）将全氟己烷磺酸钾、全氟己烷磺酸铵、全氟己烷磺酸二乙醇氨盐和全氟己烷磺酰氟认定为：吞咽会中毒-第3类（H301），造成严重的眼睛刺激-第2A类（H319），长期或反复接触会对器官造成伤害-第1类（H372），怀疑致癌-第2类（H351）。在环境风险方面，这些化学物质被认定为可能对水生生物造成长期有害影响-第4类（H413）（澳大利亚国家工业化学品通知与评估方案，2017a）。在欧盟，业界提交了自我分类，并根据欧盟法规向分类与标签清册作出通报，其中全氟己烷磺酸和几种全氟己烷磺酸相关物质的分类是：急性毒性第4类（H302，吞咽有害；H312，与皮肤接触有害；H332，吸入有害）和皮肤腐蚀第1B类（H314，造成严重的皮肤灼伤和眼睛损伤）（<https://echa.europa.eu/sv/information-on-chemicals/cl-inventory-database/-/discli/notification-details/10265/1400492>）。

22. 澳大利亚也确定了26处高度优先防范地点，这些地方的地下水受到包括全氟己烷磺酸在内的全氟和多氟烷基化合物的污染（<http://www.defence.gov.au/Environment/PFAS/Publications/Default.asp>）。澳大利亚已实施针对全氟辛酸磺酸和全氟己烷磺酸的健康指导值，即每日容许摄入量（TDI）为0.02微克/千克体重（合计），而全氟辛酸的每日容许摄入量为0.16微克/千克体重。这些数值可供调查污染场地和进行人体健康风险评估时使用（澳大利亚政府，2019）。

23. 在挪威，全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物最近被列入国家优先物质清单（Prioritetslista，<http://www.miljostatus.no/prioritetslisten>），该国的目标是在2020年前逐步停用此类物质。

24. 瑞典化学品管理局规定，从 2020 年 2 月开始，必须向其产品登记处报告关于全氟和多氟烷基化合物（包括全氟己烷磺酸）的资料。无论何种浓度的物质都适用此项规定，但不需要具体说明浓度（瑞典化学品管理局，2018）。
25. 瑞典化学品管理局公布了减少使用全氟和多氟烷基化合物的战略（瑞典化学品管理局，2016、2018b）。应尽量减少并最终停止可能导致环境污染的全氟和多氟烷基物质的应用。为实现这一目标而采取的行动，包括对可能导致向环境大量直接释放的用途优先执行各项措施。该战略就瑞典如何使用含全氟和多氟烷基化合物的灭火泡沫提出了标准，并得出结论认为，有必要制定国家立法来约束含有大量氟化物的灭火泡沫的使用。
26. 2014 年，丹麦环保局发表了一项与全氟烷基物质（包括全氟己烷磺酸及其相关化合物）点源相关的地下水污染研究。根据地下水污染调查结果，开展了一项研究以评估和提出健康质量标准。此项研究制定了 12 种全氟和多氟烷基化合物（全氟丁烷磺酸、全氟己烷磺酸、全氟辛烷磺酸、全氟辛烷磺酰胺、6:2 氟调聚磺酸、全氟丁酸、全氟戊酸、全氟己酸、全氟庚酸、全氟辛酸、全氟壬酸和全氟癸酸）的饮用水总和标准限值。该限值为 0.1 微克/升饮用水，代表 12 种全氟和多氟烷基化合物含量的总和标准（丹麦，2018）。地下水适用相同的总和标准限值。瑞典国家食品局推荐的饮用水中 11 种全氟和多氟烷基化合物（全氟丁烷磺酸、全氟己烷磺酸、全氟辛烷磺酸、6:2 氟调聚磺酸、全氟丁酸、全氟戊酸、全氟己酸、全氟庚酸、全氟辛酸、全氟壬酸和全氟癸酸）的含量限值为 0.09 微克/升（瑞典，2018）。此外，一项正在讨论的新欧洲饮用水指令提案针对全氟和多氟烷基化合物家族提出了一个限值。建议的限值是 0.1 微克/升，全氟和多氟烷基化合物（化学式： $C_nF_{2n+1}-R$ ）总和为 0.5 微克/升（欧洲，2018）。德国政府的水与土壤联合机构编制了“显著性阈值”（GFS），用以评估受全氟和多氟烷基化合物污染的地下水（van der Trenck 等人，2018）。显著性阈值被用来作为标准，以决定是否有必要采取行动修复受污染的地下水。对于全氟己烷磺酸，得出的阈值为 0.1 微克/升。2017 年，德国饮用水委员会（Trinkwasserkommission）建议饮用水中全氟己烷磺酸含量指导值为 0.1 微克/升（德国饮用水委员会，2017）。
27. 美国的几个州通过了饮用水化学品含量限值，其中包括全氟己烷磺酸。美国马萨诸塞州建议的饮用水中全氟辛酸、全氟辛烷磺酸、全氟己烷磺酸、全氟壬酸和全氟庚酸的合计或单项含量限值为 0.07 微克/升（马萨诸塞州政府），明尼苏达州卫生部建议的全氟己烷磺酸指导值为 0.027 微克/升（明尼苏达州卫生部），美国佛蒙特州建议的饮用水中全氟辛酸、全氟辛烷磺酸、全氟己烷磺酸、全氟庚酸和全氟壬酸的合计含量限值为 0.02 微克/升（佛蒙特州卫生部）。另外，新罕布什尔州建议饮用水限量为 0.018 微克/升，密歇根州的全氟己烷磺酸饮用水筛选值为 0.084 微克/升（<https://www4.des.state.nh.us/nh-pfas-investigation/?p=1044>, https://www.michigan.gov/documents/pfasresponse/Health-Based_Drinking_Water_Value_Recommendations_for_PFAS_in_Michigan_Report_659258_7.pdf）。此外，加拿大卫生部规定的全氟己烷磺酸饮用水筛选值为 0.6 微克/升（加拿大政府，2018）。
28. 美国环保局采用监管与自愿相结合的办法，包括“重大新用途规则”和自愿性的 2010/2015 全氟辛酸管理计划（经合组织，2015）。美国环保局制定了饮用水中全氟辛酸和全氟辛烷磺酸健康建议含量。此外，美国环保局利用根据“安全饮用水法”的不受管制污染物监测规定建立的部门，监测包括全氟己烷磺酸在内的成品饮用水中的六种全氟和多氟烷基化合物，以了解其在美国饮用水系统中的出现情况。出现情况数据是公开的（<https://www.epa.gov/dwucmr/third-unregulated-contaminant-monitoring-rule>）。
29. 另外，大韩民国在 2018 年将全氟己烷磺酸以及全氟辛烷磺酸和全氟辛酸列入饮用水监测的初步参数。饮用水中全氟己烷磺酸含量的初步限值为 0.48 克/升，全氟辛烷磺酸和全氟辛酸的含量总和限值为 0.07 克/升（大韩民国，附件 F 资料）。在澳大利亚，按照健康标

准，饮用水中全氟辛烷磺酸和全氟己烷磺酸含量总和指导值为 0.07 微克/升，休闲娱乐用水为 2.0 微克/升（澳大利亚政府，2019）。新西兰已采用该饮用水值作为临时指导（<http://www.mfe.govt.nz/node/24415>）。

30. 丹麦政府建议不要在纸中使用全氟和多氟烷基化合物及有机氟化合物，并公布食品包装材料中有机氟化合物的建议限量为 0.35 微克/平方厘米（丹麦，2015）。

31. 最近，人们开始关注未来对全氟和多氟烷基化合物采取何种行动。200 多名科学家签署了“马德里声明”，呼吁全球逐步淘汰所有全氟和多氟烷基化合物（Blum 等人，2015），此外还发表了“关于在未来对全氟和多氟烷基化合物采取行动的苏黎世声明”（Ritscher 等人，2018）。“苏黎世声明”是 2017 年举办的一次研讨会的成果，其中针对全氟和多氟烷基化合物的未来评估与管理提出若干建议，这些建议得到了国际上 50 多名科学家和监管者的支持（Ritscher 等人，2018）。Cordner 等人（2019）编写的对全氟辛酸和全氟辛烷磺酸饮用水指导值的审查强调指出，不仅需要针对具体化合物，而且需要针对全氟和多氟烷基化合物这一类化学品的含量制定限值，与针对多环芳烃和二恶英制定限值类似。

2. 与风险管理评价相关的摘要资料

32. 全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的出现，是人类生产、使用和处置的结果，因为它们并非自然产生的物质。如风险简介和其中的参考文献所述，环境监测表明，全氟己烷磺酸在环境中广泛存在（UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1）。大量研究报告指出，在各种环境介质中，如全球的地表水、深海海水、饮用水、污水处理厂废水、沉积物、地下水、土壤、大气、灰尘，以及生物群和人体中检测到了全氟己烷磺酸（UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4）。全氟己烷磺酸与全氟辛酸、全氟辛烷磺酸和全氟壬酸都是最常被检测到的全氟和多氟烷基化合物之一（UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1 和其中的参考文献），但尽管如此，关于目前生产和使用情况的资料却非常有限。到目前为止，对于全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物向环境释放的专门研究并不多，导致缺少关于释放情况的定量资料。

33. 历史上，3M 公司是全球最大的全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物生产商，1997 年其在美国的全氟己烷磺酰氟年产量约为 227 吨（3M 公司，2000a）。2000 至 2002 年，3M 公司停止了全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的生产（3M 公司，2000a）。据报道，中国和意大利的一些制造商（意大利的公司破产后，在意大利进行的制造于 2018 年 11 月停止）生产了全氟己烷磺酸及其前体（斯德哥尔摩公约，2012；Miteni，2018；Pan 等人，2018），可能将其作为全氟辛烷磺酸及其前体的替代品（Löfstedt 等人，2016；Huang 等人，2015；Ma 等人，2018；Zhou 等人，2019）。关于中国生产情况的信息与环境数据（例如亚洲湖泊和河流中全氟己烷磺酸含量水平很高）完全吻合（Ma 等人，2018；Pan 等人，2018；Cui 等人，2018）。例如，在 Ma 等人（2018）的一项研究中，全氟己烷磺酸是太湖及其支流河水中的主要全氟和多氟烷基化合物。太湖中的全氟己烷磺酸含量（45.9-351 纳克/升）超过了全氟辛烷磺酸，全氟己烷磺酸含量上升的原因是中国近期加强了对全氟辛烷磺酸的监管，而全氟己烷磺酸被作为替代品生产和使用（Ma 等人，2018）。流入太湖的全氟和多氟烷基化合物总量为 1 255 千克/年，数量最大的物质是全氟己烷磺酸（611 千克/年）、全氟辛烷磺酸（227 千克/年）、全氟辛酸（182 千克/年）和全氟己酸（84.4 千克/年）。另一项研究指出，中国的江河及附近湖泊（太湖和巢湖）中的浓度上升。2016 年，这些河流中的全氟己烷磺酸负荷估计为 21.6 吨，高于 2013 年的 0.09 吨（Pan 等人，2018 年）。据近期关于中国的两条河流（汾河和渭河）的报告，全氟己烷磺酸的平均贡献率远高于全氟辛烷磺酸，原因可能是全氟己烷磺酸作为全氟辛烷磺酸的替代品，被越来越多地生产和使用（Zhou 等人，2019）。在全氟和多氟烷基化合物中，全氟己烷磺酸在这两条河

流中的质量排放速率最高，分别为 116 和 37 千克/年。此外，报告指出，全氟己烷磺酸与全氟辛烷磺酸的比率相对较高，可能是因为全氟己烷磺酸在纺织品、地毯防护涂层及氟聚合物生产中被作为全氟辛烷磺酸的替代品使用（Zhou 等人，2019）。

34. 全氟己烷磺酸、其盐类及（或）许多全氟己烷磺酸相关化合物被列入了化学品清单（澳大利亚、新西兰、加拿大、中国、欧盟、日本、北欧国家³和美国），说明过去或现在存在生产、进口和（或）使用含这些物质的产品的情况（见风险简介 UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1）。至少在以下应用中，全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物被有意识地使用：(1) 消防用水成膜泡沫；(2) 金属镀层；(3) 纺织品、皮革和垫衬物；(4) 抛光剂和清洁/洗涤剂；(5) 涂层、浸渍/防护（用于防潮、防霉等）；(6) 电子产品和半导体制造。其他潜在用途种类可包括杀虫剂、阻燃剂、纸张和包装、石油工业和液压油（UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1）。

35. 关于第(4)和(5)类用途的资料不足，但有迹象表明，这些用途可能与建筑和汽车维修部门的清洁、抛光、密封剂、涂料等有关。大韩民国提供了最新资料并通过进一步调查显示，在欧盟生产并进口到大韩民国的汽车镀膜喷雾剂产品中使用了含全氟己烷磺酸的聚合物（很可能是无意的，系一种全氟辛烷磺酸聚合物（化学文摘社编号 127133-66-8）的组分）（RPA 2019）。据 2016 年报道，从 2013 年到 2015 年，韩国进口了 20 吨该产品所含的这种聚合物（大韩民国，附件 F 资料）。此外，在编写全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物风险简介期间发现，一家北美公司供应一种含全氟己烷磺酸相关化合物的地板密封和涂饰产品，但现在已停止供应（见风险简介 UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1）。有迹象表明，全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物（化学文摘社编号未知）被用于太阳能电池制绒溶液的添加剂。根据大韩民国附件 F 的资料，在与一家使用太阳能电池制绒溶液的制造厂毗邻的一家水处理和净化厂监测到全氟己烷磺酸的浓度突然增加。自 2012 年以来，大韩民国监测了全国 70 家水处理和净化厂的全氟和多氟烷基化合物。2016 年，全氟己烷磺酸的浓度范围是 0.002 微克/升到 0.013 微克/升，但在 2017 年，在位于洛东江溪流的一家工厂中，全氟己烷磺酸浓度突然上升到 0.454 微克/升（大韩民国，附件 F 资料）。这一结果与另一项研究中从源自同一条河流的自来水样本中测出的全氟己烷磺酸浓度是一致的，这些样本中的全氟己烷磺酸浓度最高，从未检出（n.d.）到 190 纳克/升不等（Park 等人，2018）。在采取纠正措施（包括更换该厂的制绒溶液）后，全氟己烷磺酸浓度下降到了前几年的水平。这种溶液是进口到韩国的，韩国没有生产全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物（大韩民国，附件 F 资料）。

36. 此外，在中国的几个全氟辛烷磺酸替代产品样本中检测到高浓度的全氟己烷磺酸。如报告（https://www.switchmed.eu/en/documents/huang_pfos-substitution-in-china.pdf（Huang 等人，2015））所述，“这些产品主要用于水成膜泡沫的表面活性剂，如 VF-230（5 082 毫克/升）、VF-9126（1 771 毫克/升）和 VF-9128（583 毫克/升）。实际上，上述水成膜泡沫产品的生产商从其他供应商购买了用于生产水成膜泡沫的“非全氟辛烷磺酸”氟碳表面活性剂，并且供应商保证这是不含全氟辛烷磺酸的产品。然而，供应商并未告知这些产品中的全氟己烷磺酸含量，并且在销售该产品用于水成膜泡沫（VF-230、VF-9126 和 VF-9128）时也未提供此信息（https://www.switchmed.eu/en/documents/huang_pfos-substitution-in-china.pdf；Huang 等人，2015）。

37. 欧洲的化学品法律，即《化学品注册、评估、许可和限制条例》，并未要求对全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物进行登记。不过，在欧洲化学品管理局的分类、标签和包装（C&L）清单⁴中登记了大约 68 项全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物家族的分类、

³ 挪威、瑞典、丹麦、芬兰、冰岛、格陵兰和法罗岛。

⁴ <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals/cl-inventory-database>。

标签和包装通知/自我分类，这意味着所通报的每种全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物在欧洲的使用数量少于 1 000 千克/年。不过，《化学品注册、评估、许可和限制条例》对链长不小于 3 的聚合物（单体）免于登记和评估，这意味着在各种应用中使用的含全氟己烷磺酸相关化合物（作为侧链存在或无意中产生）的聚合物，可能是造成全氟己烷磺酸释放的另一重要来源。对于聚合物中存在的单体或其他无意中产生的化合物，如果重量比（w/w）超过 2%，且总量达到每年 1 吨以上，则必须根据《化学品注册、评估、许可和限制条例》（第 6(3)条）进行登记。不过，欧盟委员会正在按照《化学品注册、评估、许可和限制条例》（第 138(2)条），审查未来管控市场上的各种聚合物的措施。大韩民国报告了聚合物的此类用途（附件 F 资料），例如含全氟己烷磺酸相关化合物的聚合物被用于汽车镀膜喷雾剂。

38. 据英国提交的附件 F 资料报告，一家废物公司在应要求提供的资料中指出，全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物被用于纺织品、地毯保护剂、皮革、造纸、农药、电镀、灭火泡沫、感光材料和一些合成材料。在印刷油墨和密封剂中也发现了这些物质。根据英国的附件 F 资料，虽然该化学品在英国没有作为原料使用或生产，但有理由假定，日常使用的材料在一定程度上含有该化学品（英国的附件 F 资料）。

39. 此外，应当指出的是，丹麦、瑞典和挪威的主管部门收到了关于全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物数量和用途的报告，但提供者大多声称这是机密商业信息（北欧预备物质，2018；挪威环境署，M-961/2018）。最近在中国渤海湾沿岸地区进行的一项来源分析显示，全氟己烷磺酸与液压油配方、水成膜泡沫工厂、金属电镀、氟聚合物生产与加工，以及食品接触材料有关（Liu 等人，2019）。此外，从几种消费品中检测到全氟己烷磺酸，例如各种形式的纺织品，包括衬垫物、地毯、电气织物和建材等（Becanova 等人，2016）。

40. 可能有几家供应商供应制造全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的原材料全氟己烷磺酰氟（化学文摘社编号 423-50-7）（https://www.lookchem.com/product_High-quality-Perfluorohexane-Sulphonyl-Fluoride/14315526.html），并在广告中宣传以下用途：“本产品是制备含氟表面活性剂的最基本的原料之一。含氟表面活性剂广泛应用于纺织、皮革、造纸、农药、电镀、油田、消防、感光材料、合成材料等领域”。共有六家在中国成立的制造商或下游供应商（<https://www.lookchem.com/newsell/search.aspx?key=423-50-7&countryId=1&businessType=Manufacturers>，2019 年 10 月 1 日查阅）有生产全氟己烷磺酰氟的潜力。另外，许多全氟己烷磺酸（化学文摘社编号 355-46-4）制造商和（或）供应商在以下网页（<https://www.lookchem.com/newsell/search.aspx?p=1&key=355-46-4&ad=>，2019 年 10 月 1 日查阅）注册，意味着可能存在使用和供应情况。

41. 全氟己烷磺酰氟可作为副产品，在生产全氟辛基磺酰氟的电解氟化工艺过程中无意产生（Gramstad 和 Haszeldine，1957；Jiang 等人，2015；3M 公司，2000b）。除非制造商将全氟己烷磺酰氟从全氟辛基磺酰氟中去除，否则它会作为一种污染物存在，并可能发生反应形成全氟己烷磺酸，例证包括：3M 公司，2015；Herzke 等人，2012；Huang 等人，2015。在生产全氟辛基磺酰氟的过程中，全氟己烷磺酰氟与全氟辛基磺酰氟的产出比有可能介于 4%（Gramstad 和 Haszeldine，1957）至 14.2%（据一家中国制造商报告；Ren，2016）之间。商用全氟辛烷磺酸产品中测出的全氟己烷磺酸与全氟辛烷磺酸之比也支持这一推断，该比率在 3M 公司的 FC-95 中为 3.5%–9.8%（3M 公司，2015），在中国的三种产品中为 11.2%–14.2%（Jiang 等人，2015）。在 3M 公司的全氟辛烷磺酸电解氟化生产工艺所产生的全氟己烷磺酸杂质中还检测到全氟己烷磺酸的支链异构体，例如，一个批次的全氟己烷磺酸杂质比率为 4.7%，其中 18%是支链异构体（Benskin 等人，2010）。按目前掌握的情况，尚不清楚全氟己烷磺酸是否作为副产品，在仍在进行的全氟丁基磺酰氟生产中产生。Boucher 等人（2019）指出，无意产生的全氟己烷磺酰氟（在清理全氟辛烷磺酸产品之后）被转换为产品并用于第 34 段所述的用途。

42. 最近公布了一份链长 C₄ 至 C₁₀ 的全氟和多氟烷基化合物及相关前体的全球排放清单（Boucher 等人，2019）。该清单利用历史生产数据，审查并综合了现有的关于原材料全氟己烷磺酰氟及其衍生物生命周期的资料。制定和验证该排放清单的方法与较早前全氟辛基磺酰氟研究（Wang 等人，2017）中使用的方法相同，制定出的全氟己烷磺酰氟清单可以作为全球质量平衡环境归宿模型（CliMoChem）的输入条件，用以估算环境浓度，然后与现场测量值进行比较。该清单并未量化和列入过去和目前的全氟己烷磺酰氟及其衍生物的有意生产，因为找不到公开的产量资料。排放清单估算了全球基于全氟己烷磺酰氟的产品的生命周期总排放量范围，并报告了不同时期各类排放源的全球排放量。在 2016-2030 年期间，因全氟己烷磺酸相关化合物的生产、使用与处置、降解，以及因全氟己烷磺酰氟降解而造成的全球全氟己烷磺酸排放总量为 2-89 吨。在此期间，造成全氟己烷磺酸排放的最大原因估计是全氟己烷磺酸相关化合物的使用与处置（1-21 吨）以及降解（1-66 吨）。由于缺少关于这些物质的定量数据，因此清单中的计算只能依靠估计和假设，这给结果带来了不确定性（Boucher 等人，2019）。

43. 现场浓度报告值与模型推算的全氟己烷磺酸浓度完全吻合。上述结果表明，全氟己烷磺酰氟及其衍生物（如全氟己烷磺酸及其相关化合物）环境浓度上升的情况预计还将持续数十年，并且远离排放源的区域尚未达到估计的峰值浓度。估算出来的上述趋势可能在广大地理范围内具有广泛代表性；不过，由于中国（可能还有其他国家）有意识地生产基于全氟己烷磺酰氟的产品，并且由此造成的排放目前无法量化，这可能会使某些地区的本地接触风险上升，而目前的研究并未反映这些风险（Boucher 等人，2019）。

44. 总之，本节中的资料表明，全氟己烷磺酸在全球环境中的分布非常广泛（详情另见 UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1 和 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4）。在历史上，全氟己烷磺酸及其相关化合物的主要排放原因很可能是在用电解氟化工艺制造全氟辛烷磺酸的过程中无意产生了这些物质。生产和使用全氟辛烷磺酸可能仍在造成全氟己烷磺酸的持续排放和释放。此外，全氟己烷磺酸还可能存在于仍未处置的全氟辛烷磺酸或含全氟辛烷磺酸的产品/化学混合物的库存中。不过，最近得到的资料，特别是来自亚洲的资料表明，全氟己烷磺酸在许多应用中取代了全氟辛烷磺酸。据许多新出版物报告，检测结果显示全氟己烷磺酸是排放到河流和湖泊中的主要全氟和多氟烷基化合物，特别是在亚洲的城市地区和靠近工业设施的地区。据报告，纺织品处理（Park 等人，2018；Ma 等人，2018；Zhou 等人，2019）、电子和化学工业（Park 等人，2018）、半导体工业（Lin 等人，2010）、摄影胶片生产厂（Cui 等人，2018）、地毯防护涂层（Zhou 等人，2019），以及氟聚合物制造（Zhou 等人，2019）等活动可能与全氟己烷磺酸的释放有关。上述研究表明，全氟己烷磺酸被有意识地用于这些应用和工艺中，而并非全氟辛烷磺酸生产过程中无意产生的污染物。此外，全氟己烷磺酸近来被用于水成膜泡沫，作为全氟辛烷磺酸的替代产品在亚洲市场上销售。从公开渠道无法获得关于有意生产全氟己烷磺酰氟（生产全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的原料）的定量数据。因此，无法估算有意生产、使用和处置全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物所造成的排放并为此编制清单。Boucher 等人（2019）提出的排放清单目前仅涵盖全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的无意生产、使用与处置。

2.1 确定可能的管控措施

45. 为了确定涵盖整个生命周期的可能的管控措施，应当考虑最相关的应用和可能的排放途径。全氟己烷磺酸的排放途径可能有三种：

- (a) 生产、使用和处置全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物；
- (b) 作为杂质存在于其他全氟烷基磺酸（如全氟辛烷磺酸）中；

(c) 作为全氟己烷磺酸相关化合物的降解产物，包括产生于侧链含 C₆F₁₃SO₂-根的聚合物。

46. 如第 34 段所述，已查明了以下应用：（1）消防用水成膜泡沫；（2）金属镀层；（3）纺织品、皮革和垫衬物；（4）抛光剂和清洁/洗涤剂；（5）涂层、浸渍/防护（用于防潮、防霉等）；（6）电子产品和半导体制造。其他潜在用途种类可包括杀虫剂、阻燃剂、纸张和包装、石油工业和液压油。根据现有资料，水成膜泡沫，纺织品、皮革和垫衬物处理，以及电子产品和半导体制造可能是造成全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物释放的主要应用。中国（2013）在《巴塞尔公约》下提交的工作成果证实了上述结论，其中指出，在以下应用中查明和检测出全氟己烷磺酸（作为全氟辛烷磺酸的替代品）：（1）水成膜泡沫；（2）防水剂；（3）纺织品整理剂（Huang 等人，2015）。不过，并不能排除造成释放的其他用途，例如家用和专业用抛光剂和清洗/洗涤剂。

47. 在《公约》下可采用不同办法来实现第 3 条要求的“禁止或限制生产、使用、进出口”：

(a) 可将全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物列入附件 A，且设置或不设特定豁免，并在附件 A 特定章节详细规定各项行动；或

(b) 可将全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物列入附件 B，且设置可接受用途/特定豁免，并在附件 B 特定章节详细规定各项行动；及（或）

(c) 可将全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物作为无意形成的持久性有机污染物列入附件 C，以针对人为源头造成的潜在形成和无意释放，例如焚烧可能导致的全氟己烷磺酸无意形成。

48. 在本风险管理评估的编制过程中，没有缔约方或观察员提出豁免请求。无缔约方提出豁免请求，并且所有应用似乎都有技术上可行且已经投入使用的替代品。因此，没有明确的理由将全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物列入《公约》附件 B。此外，目前没有资料显示焚烧可能导致全氟己烷磺酸无意形成，意味着不需要列入附件 C。这表明，完全淘汰全氟己烷磺酸的所有用途是可能的，没有必要设置生产和使用豁免。因此，可能的管控措施是将全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物列入《公约》附件 A，且不设生产和使用豁免。

49. 如果将全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物列入附件 A 且不设豁免，则可通过以下方式实施管控措施：(1) 禁止生产、使用、进出口，(2) 修复受污染场地，(3) 对废物和过时库存进行无害环境管理，(4) 禁止再用和回收废物或库存。

50. 在不设置豁免的情况下，将全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物列入附件 A，须遵守附件 A 的说明（一）。这将意味着，全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物在其他物质中存在时，只能作为一种无意的微量污染物出现。

51. 据估计，使用与处置是造成全氟己烷磺酸排放的最大源头之一（Boucher 等人，2019）。Boucher 等人提供的补充资料概述了可能导致全氟己烷磺酸排放到环境中的可能的废物流途径（图 S6）。除了使用造成的直接排放以外，废水（气体、污水和污泥）和固体废物（填埋场、土地处理）也被证明是全氟己烷磺酸排放到环境中的主要途径。用当前的技术整治受全氟己烷磺酸污染的土壤即便可能，也是非常困难的（Naturvardsverket，2019；环境治理合作研究中心，2017）。此外，当使用者改用替代化学品时，他们需要清洗制造和存储设备，并以无害环境的方式处置由此产生的废液。有多项研究在污水处理厂和工厂的出水中检测到全氟己烷磺酸（Lin 等人，2010；Eriksson 等人，2017；UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4，表 1.5）。此外，据报告，全氟己烷磺酸相关化合物会在污水处理厂降解产生全氟己烷磺酸（Eriksson 等人，2017），并且污水处理厂

出水中含有的全氟己烷磺酸会造成排放（挪威环境局，M-806/2017）。如果通过出水而产生的排放量很大，则应按照第 2.4.1 节所述在污水处理厂实施管控措施。

52. 在将全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物列入《公约》后，第 6 条第 1(d)(二)款的规定必须得到遵守。这意味着废物处置方式应确保销毁或不可逆地转化其中含有的持久性有机污染物，使其不再表现出持久性有机污染物的特征，或者，在销毁或不可逆转化均不是环保的可取选择，或在持久性有机污染物含量较低的情况下，应以其他无害环境的方式处置。缔约方还应考虑在废物管理阶段采取各种减排措施以及使用现有的最佳可得技术和最佳环保做法（环境署，2017）。此外，缔约方应努力制定适当的战略，以查明受全氟己烷磺酸污染的场地。如果查明了污染场地并要进行修复，则应以无害环境的方式进行。

2.2 可能的管控措施在实现降低风险目标方面的成效和效率

53. 为了减少全氟己烷磺酸的排放，需要考虑在生命周期的所有阶段采取管控措施。全氟己烷磺酸在其生命周期的所有阶段都会排放到环境中，但据推断，其在使用寿命内和报废阶段的排放量最高。不过，制造厂也被证明会造成全氟己烷磺酸的大量释放，尤其是在中国（见 Cui 等人，2018；Ma 等人，2018）。因此，对全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物最有效的管控措施是禁止一切生产、使用、进出口。同时，将全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物列入《斯德哥尔摩公约》附件 A 且不设豁免。可以根据第 6 条规定的措施，以无害环境方式对库存和废物进行管理，如要对污染场地（例如位于或靠近制造设施、机场、军事基地及其他源头的污染场地）进行清理，则以无害环境的方式进行。

54. 根据缔约方和观察员提交的附件 F 资料，没有查明全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的关键用途，也没有提出豁免申请。因此，完全有可能停止生产和使用全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物，进而使生产设施以及在使用该产品中使用该物质的设施（如纺织品和皮革处理、半导体制造等）不再排放和释放。

55. 根据经合组织/环境署全球全氟化学品小组进行的一项调查，降低全氟和多氟烷基化合物风险的两个重要驱动因素是，不断发展科学知识和增加有助于向更安全替代品过渡的国际倡议的数量（经合组织，2015）。在制定和实施降低全氟和多氟烷基化合物风险的措施期间，可能会遇到一些挑战（经合组织，2015）。其中一些挑战可能涉及到需要实施管控措施，以实现降低全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物风险的目标。关于全氟己烷磺酸来源（生产和使用），特别是全氟己烷磺酸相关化合物来源的资料是缺乏的。这导致难以查明使用这些化学品的工业生产过程（即纺织品、皮革和其他表面处理、电子产品及半导体行业等）和产品。目标行业并未提供关于来源（生产和使用）以及使用全氟己烷磺酸的工业生产过程与产品的充足资料。此外，目前缺乏检测和量化个别全氟己烷磺酸相关化合物的标准化分析方法，因而难以查明化学混合物和产品中的化合物（第 1.1 节说明了全氟己烷磺酸、其盐类及相关物质的分析方法）。由于缺乏关于产品中化学物质含量的资料，在一般情况下很难将这些产品从废物流中以及在废物处理过程中分离出来。为了改善关于产品中所含化学品的信息交流，在化管方针下制定了一个方案 <http://www.saicm.org/Implementation/EmergingPolicyIssues/ChemicalsInProducts/tabid/5473/language/en-US/Default.aspx>。

56. 此外，添加到产品中的全氟和多氟烷基化合物往往浓度不高，因而可能不适用于物质含量报告义务。例如，欧盟的《化学品注册、评估、许可和限制条例》规定，在物品中的物质浓度高于 0.1% 的情况下，供应商须履行告知义务（见第 1.5 节），并规定登记阈值为 1 000 千克/年，但是如果相关产品含有的全氟和多氟烷基化合物的浓度很低，则可能达不到上述标准（见第 2 节第 34 段），在这种情况下相关聚合物可免于登记。据 Kotthoff 等人（2015）报告，一些消费品（清洗剂、食品接触材料）含有少量全氟烷基酸，而滑雪蜡、皮革样本和户外纺织品等其他产品中的含量较高。

57. 如上文和下一节所述，全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的许多用途与全氟辛烷磺酸相同（详见第 2 节）。在全氟辛烷磺酸工作方案下积累的经验、制定的指南和清单，可以对实施全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物管控措施起到很大作用。

58. 需要考虑开展市场监管和环境监测活动，以监测所实施的管控措施的成效。

2.2.1 技术可行性

59. 虽然对于全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物使用情况没有清晰的总体概述，但预计许多有意识用途与全氟辛烷磺酸相似（详细资料见全氟己烷磺酸风险简介；UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1），在某些情况下与全氟辛酸相似。第 2 节的摘要部分也详细阐述了这种情况。因此，“全氟辛烷磺酸、其盐类及全氟辛基磺酰氟的替代品评估报告”（UNEP/POPS/POPRC.14/4 和 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8）可以提供关于全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的可能替代品/替代技术的有用信息。评估报告表明，所有全氟辛烷磺酸应用都有技术上可行的替代品，这意味着改用化学和非化学替代品是可行的。许多关于替代品的建议也可能适用于全氟己烷磺酸。不过，应当指出的是，对于一些应用（灭火泡沫以及纺织品和皮革处理），全氟己烷磺酸以前曾被使用并被列为全氟辛烷磺酸的替代品（UNEP/POPS/POPRC.12/INF/15/Rev.1）。

60. 在持久性有机污染物审查委员会针对全氟辛烷磺酸、其盐类及全氟辛基磺酰氟开展工作的过程中，业界提供的资料表明针对全氟辛烷磺酸的替代过程正在进行，仅查明了少数几种仍需要全氟辛烷磺酸的用途。这些用途涉及到使用全氟辛烷磺酸（或全氟辛烷磺酸相关化合物）作为闭环系统中硬金属电镀的抑雾剂，以及作为控制切叶蚁的捕虫饵。缔约方大会第九次会议决定将硬金属电镀抑雾剂用途改列为有时限的特定豁免，并将控制切叶蚁的捕虫饵用途保留为一种可接受用途，但将其使用范围限制在农业领域（SC-9/4 号决定）。此外，将生产和使用全氟辛烷磺酸、其盐类及全氟辛基磺酰氟用于灭火泡沫这一可接受用途改为有时限的特定豁免，允许已安装的系统（包括移动和固定系统）中已有的灭火泡沫用于抑止液体燃料蒸汽和扑救液体燃料火灾（B 类火灾）。对于水成膜泡沫中使用的全氟辛酸、其盐类及其相关化合物也通过了同样的决定（SC-9/12 号决定）。对于全氟辛酸，会议商定了几项有时限的豁免，例如，对于在纺织品中使用全氟辛酸、其盐类及其相关化合物以获得拒油拒水性能，从而保护工人免受对其健康和构成风险的危险液体伤害这一用途授予了特定豁免（SC-9/12 号决定），但也在向其他化学和非化学替代品过渡。

61. 如第 2.3 节所述，全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的所有可能用途都有许多非氟化化学替代品，包括一些消除全氟己烷磺酸的技术解决方案。

2.2.2 实施管控措施的成本和效益

62. 由于无缔约方提出豁免请求，因此实施生产和使用控制措施的相关费用预计不会很高。针对全氟辛烷磺酸或全氟辛酸采取的高成本控制措施也可能对全氟己烷磺酸有效，因为假定其具有类似用途（例如，取代和销毁水成膜泡沫）。此外，预计现有库存数量很小，随着全氟辛烷磺酸的逐步淘汰，在全氟辛烷磺酸产品中无意存在的全氟己烷磺酸副产品也将逐步淘汰。据了解，去除饮用水中的全氟和多氟烷基化合物以及修复污染场地的费用很高，所以实施全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的管控措施将有助于避免未来产生此类费用（关于费用的更多资料见第 2.4.3 节）。

2.3 关于替代品（产品和工艺）的资料（如相关）

63. 一般而言，大多数应用缺乏关于全氟和多氟烷基化合物替代品的特性、属性和效率的公开数据，因为这些数据通常作为机密商业信息受到保护。尽管进行了几次尝试，但相关行业尚未提交关于全氟己烷磺酸生产和使用的资料（挪威环境署，M-961/2018；欧洲化

学品管理局，2019b)。不过，许多应用已经在使用替代品，意味着它们已经得到行业的认可，因而是可用的替代品（UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1）。因此，全氟己烷磺酸替代品评估基于风险简介（UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1）中提到的一般性用途，并假设在这些用途中，全氟己烷磺酸的功能与全氟辛烷磺酸（在某些情况下与全氟辛酸）相同或非常相似。

2.3.1 特定应用的替代物质

64. 全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的替代品包括替代化学品和替代技术，后者包括改变设计或产品等非化学替代方案。应尽一切努力确保避免用其他具有持久性和（或）毒性的化学品来替代。

65. 有所谓“令人遗憾的替代”，其定义是“一种有毒化学物质被另一种化学物质取代，但后来证明后者也不合适，因为发现它也是一种具有持久性、生物蓄积性和毒性的物质，或因为它引起其他关切”（美国国家研究委员会，2014）。用类似的全氟烷基酸及相关化合物来取代全氟己烷磺酸及其相关化合物将是令人遗憾的替代，降低这种可能性并非易事，因为同类化学品数量庞大（经合组织，2018），并且对于大多数此类物质而言，关于其属性的资料非常有限。处理数量庞大的同类化学品是一大难题，可用分组方法来解决；这种方法由欧洲化学品管理局（欧洲化学品管理局，2017b）以及几个国家的国家政策制定部门（Ritscher 等人，2018；Cordner 等人，2016）提出，已发现这是减少发生“令人遗憾的替代”可能性的一种重要方法。在许多情况下，长链全氟烷基酸、其盐类及其相关化合物可以被短链全氟烷基酸、其盐类及其相关化合物（短链全氟烷基酸的定义为链长为 C₂ 至 C₇ 的全氟羧酸和链长为 C₃ 至 C₅ 的全氟烷基磺酸）以及行业认为对预期用途而言是安全的其他含氟替代品所取代（氟问题理事会，2015）。虽然链长较短的全氟烷基酸的生物累积性一般较弱，但其持久性较强，具有较高的水溶性和流动性，导致与链长较长的全氟烷基酸相比，保持和控制这些物质在环境中扩散范围的难度较大（Arp 等人，2017；Neumann 等人，2017；Kotthoff 和 Bücking，2018）。

66. 经过生物可吸收性校正后，一些短链全氟烷基酸和其他含氟替代品的毒效与全氟辛酸和全氟辛烷磺酸相近（Gomis 等人，2018）。短链全氟和多氟烷基化合物（链长 C₂ 至 C₇ 的全氟羧酸和链长 C₄ 的全氟烷基磺酸）占雨水样本中可检测到的全氟和多氟烷基化合物的 80% 以上，仅链长 C₂ 至 C₃ 的全氟和多氟烷基化合物就占多伦多雨水和水样本中全氟和多氟烷基化合物总量的 40% 以上（Yeung 等人，2017）。市场上出现了新型含氟化合物，用以取代长链全氟烷基酸、其盐类及其相关化合物。在世界各地的地表水中观察到几种新型全氟烷基醚羧酸和磺酸（PFECA 和 PFESA），包括六氟环氧丙烷二聚体和三聚体酸（HFPO-DA，商品名为 GenX，以及 HFPO-TA）、4,8-二氧杂-3-H-全氟壬酸铵（商品名为 ADONA）、氯化聚氟醚磺酸（6:2 Cl-PFESA）及其氢取代类似物（6:2 H-PFESA）（Pan 等人，2018）。从受 ADONA 污染的自来水使用人群的人体血液中检测出该物质（Fromme 等人，2017）。还观察到水源受到短链全氟烷基酸污染的情况（Gebink 等人，2017；Braunig 等人，2019）。还在从曾受全氟化合物污染的场地采集的天然水中检测到其他全氟和多氟烷基化合物，例如全氟烷基醚羧酸和磺酸（Strynar 等人，2015）。

67. 对于几种被怀疑具有持久性、生物累积性和毒性（PBT）或高持久性、高生物累积性（vPvB）的物质（如 ADONA 和全氟庚酸相关化合物（欧洲化学品管理局欧盟社区滚动行动计划（CoRAP）清单）的短链替代物质，目前正在根据《化学品注册、评估、许可和限制条例》进行物质评估，且（或）正在准备进行监管风险管理（全氟庚酸、全氟丁烷磺酸、全氟己酸（欧洲化学品管理局意向登记册和公共活动协调工具（PACT））。六氟环氧丙烷二聚体酸于 2019 年 7 月被认为属于高度关注物质，因为它具有的持久性、流动性、远距离环境迁移的可能性、观察到的不良影响、吸收可能性低和高水溶性，使该物质可通过

（饮用）水摄取，具有充分的生物可利用性⁵。因此，未来可能限制其中一些物质的使用。此外，这些化合物在应用中的效率通常较低，导致用量增大以及产品使用与处置阶段的排放量上升（Schellenberger 等人，2019）。

68. 持久性有机污染物审查委员会曾在关于全氟辛烷磺酸替代品的建议（POPRC-14/3 号决定）和关于列入全氟辛酸的建议（POPRC-14/2 号决定）中探讨了在《斯德哥尔摩公约》下解决令人遗憾的全氟和多氟烷基化合物替代问题。缔约方大会第九次会议决定，由于短链全氟和多氟烷基化合物是庞大的类别，其中的化学物质具有不同化学和物理属性，并且由于持久性有机污染物审查委员会没有审查该类化学品的数据，因此不会具体提及避免（在灭火泡沫中）使用短链全氟和多氟烷基化合物。取而代之的是采用了以下措辞：“鼓励缔约方和其他各方在有可行和高效的全氟辛酸、其盐类及其相关化合物的替代品时使用替代品，同时考虑到氟基灭火泡沫因其持久性和流动性可能对环境、人类健康和社会经济产生不利影响”（SC-9/5 号决定（全氟辛烷磺酸）和 SC-9/12 号决定（全氟辛酸））。作为替代品的短链全氟和多氟烷基化合物比长链全氟和多氟烷基化合物表现出更高的水溶性和更强的环境流动性（Baduel 等人，2017；Barzen-Hanson 和 Field，2015）。为避免用全氟烷基酸进行令人遗憾的替代，以下各节重点论述非氟化化学替代品和非化学替代技术。

69. 表 3 概述已查明的用途类别和可用的全氟己烷磺酸替代品，随后各节提供关于每种应用及其替代品的信息，重点是非氟化化学和技术解决方案。（在无氟化学替代品和替代技术对用途类别中的所有应用均证明不可行的情况下，才为此类应用列举氟化替代品）。

表 3. 替代品概述

应用	有替代品可用	替代品类型
灭火泡沫	是	非氟化和氟化化学替代品
金属镀层	是	化学替代品（非氟化和氟化化学替代品）以及技术解决方案
纺织品	是	化学替代品（非氟化和氟化化学替代品）以及技术解决方案
抛光、清洁和洗涤剂	是	非氟化化学替代品
涂层、浸渍/防护	是	非氟化化学替代品
电子和半导体	是	非氟化和氟化化学替代品

2.3.1.1 氟化灭火泡沫

70. 包括水成膜泡沫（AFFF）在内的氟化灭火泡沫是高效泡沫，用于扑灭高度危险的可燃液体火灾。水成膜泡沫产生一个薄层，将高度易燃的液体或可燃固体与富氧空气分隔。燃料与泡沫之间的水膜可以冷却燃料表面，起到蒸汽屏障的作用，并有助于泡沫在燃料上扩散。水成膜泡沫通常是用合成碳氢表面活性剂与氟化表面活性剂结合配制而成，作为 B 类灭火泡沫用于扑灭液态碳氢化合物燃料火灾。这一类别的氟化泡沫称为水成膜泡沫、氟蛋白泡沫（FP）或成膜型氟蛋白泡沫（FFFP）。无氟（F3）B 类灭火泡沫用专用的碳氢表面活性剂配方制成。

71. 水成膜泡沫中使用的全氟物质（如全氟辛烷磺酸和全氟己烷磺酸）是利用电解氟化工艺有意识生产的，而氟化氢与有机材料一起作为原料（Buck 等人，2011）。生产氟化物质的电解氟化工艺可以用来生产支化和线性产品，以及具有不同链长的产品（Buck 等人，2011）。全氟辛烷磺酸产品可能含有 1-10% 的全氟己烷磺酸（Wang 等人，2017（补充资料）；详见风险简介：UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1），除非进行清理并去除无意产生的

⁵ <https://echa.europa.eu/candidate-list-table/-/dislist/details/0b0236e1833efc3e>.

全氟己烷磺酸。完全淘汰含全氟辛烷磺酸的水成膜泡沫也将有助于减少全氟己烷磺酸及其相关化合物向环境的排放。

72. 在水成膜泡沫中检测到了全氟己烷磺酸及其相关化合物（D'Agostino 和 Mabury, 2014; 瑞典化学品管理局, 2015; Favreau 等人, 2017），在受水成膜泡沫训练活动影响的土壤和地下水中也发现了此种物质，最主要原因是使用含全氟辛烷磺酸的泡沫，而其中带有无意产生的全氟己烷磺酸（Barzen-Hanson 等人, 2017; Gobelius 等人, 2018; Banzhaf 等人, 2017）。然而，过去市场上还曾销售含全氟己烷磺酸（作为活性全氟化合物）的水成膜泡沫（欧洲化学品管理局, 2019b, 表 8）。由于水成膜泡沫浓缩物的保质期长达 10-20 年，已安装的水成膜泡沫库存中可能仍含有全氟己烷磺酸。此外，2015 年中国生产的一些水成膜泡沫含有全氟己烷磺酸，将其作为全氟辛烷磺酸的替代品（https://www.switchmed.eu/en/documents/huang_pfos-substtution-in-china.pdf）。欧洲消防设备和消防车辆制造商委员会（Eurofeu）指出，欧洲和北美的灭火泡沫行业已经全面实施了美国环保局的管理计划，完全淘汰了基于 C₈ 物质的水成膜泡沫生产，但仍有库存（<http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-POPRC13FU-SUBM-PFOA-FFFC-3-20180112.En.pdf>）。这表明，在 2015 年之前生产的氟化泡沫可能含有 C₈ 全氟物质；此后则实施了“C₆ 纯”政策（欧洲消防设备和消防车辆制造商委员会, 2018）。“C₆ 纯”泡沫含有用调聚方法产生的含氟表面活性剂，因此不含全氟己烷磺酸（灭火泡沫联盟, 2017）。

用于 B 类火灾的灭火泡沫中全氟辛烷磺酸的替代品

73. 本节讨论两个重要的替代品类别：(a) 无氟替代品和 (b) 短链氟化替代品。

(a) 无氟替代品：

74. 几家灭火泡沫制造商提供能够满足 B 类灭火性能认证标准的无氟泡沫（见 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8, 表 6）。唯一无法满足的是美国军用规范（MIL-F-24385），其不仅涉及性能标准，还具体规定了须添加的氟化学品。不过，军用规范的保管者美国海军部多年来一直在考虑修改军用标准，使其以性能为基础，而不再具体规定化学含量和特性（消除持久性有机污染物国际网络, 2018）。2018 年 10 月，美国参议院批准了联邦航空管理局为期五年的再授权，其中修改了灭火泡沫的性能标准，允许在民用机场使用无氟泡沫（美国国会, 2018）。

75. 澳大利亚、丹麦、挪威、瑞典的民用机场以及伦敦希思罗和盖特威克、迪拜、斯图加特、爱丁堡、奥克兰等主要枢纽机场目前正在使用无氟泡沫（消除持久性有机污染物国际网络, 2018）。在挪威的民用机场，这项替代工作同时涵盖固定和移动系统。在挪威，几处军事设施已分阶段采用无氟泡沫。此外，挪威的石油天然气行业正在逐步采用无氟泡沫（包括海上和陆上），该行业满意和信任其性能（与 Equinor 公司及挪威石油天然气协会的个人通信，挪威环境署, 2019）。

76. 德国 Heyrothsberge 消防和灾难控制研究所测试了六种无氟耐酒精灭火泡沫和一种含全氟和多氟烷基化合物的泡沫，以了解其扑灭五种不同极性液体（可作为生物柴油的成分）火灾的能力（Keutel 和 Koch, 2016）。作者得出的结论是，有的无氟泡沫的性能与含全氟和多氟烷基化合物的泡沫相似。澳大利亚昆士兰州的全氟辛酸风险管理评价（2016）也指出，据报告，许多无氟泡沫被确认为达到最严格的灭火标准，在很多情况下超过成膜型氟化泡沫的性能，并且无氟泡沫被机场和包括石油天然气平台在内的其他设施广泛使用。

77. 由 16 家石油公司组成的联合体 LASTFIRE 于 20 世纪 90 年代后期启动了一个项目，以审查与大直径（大于 40 米）敞口浮顶燃料储罐相关的风险。2018 年，LASTFIRE 在大型储罐上测试了六种新的“C₆ 纯”水成膜泡沫和两种无氟泡沫，从他们的经验（基于所测试

的选定泡沫)得出结论是,没有任何一种新一代泡沫(氟化或无氟)可以用来作为以前所用配方的“现成”直接替代品。在考虑替代品的可行性时,既要考虑灭火性能,又要考虑与现有系统的控制和应用方法的兼容性。据指出,替代泡沫的性能具体取决于所用配方和应用设备的类型。因此,不可能断言所有 C₆ 氟化替代品的性能优于所有无氟替代品,反之亦然(Ramsden, 2018)。

78. 关于无氟替代品的化学结构或属性的公开资料相对较少。查明了许多经过安全认证的无氟泡沫制造商和商业产品,但关于配方的精确资料并未披露,因为这是机密商业信息(见 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8, 表 6)。不过,可以从无氟泡沫专利中窥见一斑。例如, Solberg 专利列出了以下成分:二乙二醇丁醚、黄原胶、淀粉、碳化糖、二乙醇胺十二烷基硫酸盐、癸基乙氧基硫酸钠、椰油酰胺丙基甜菜碱、椰油酰胺丙基羟基磺基甜菜碱、辛基硫酸钠、癸基硫酸钠,烷基多糖苷(美国专利 20080196908)。(简化版:碳化糖组合物、交联剂或无机盐、表面活性剂和水)。

79. 使用无氟泡沫的好处是减少对环境的长期影响,但就与生化需氧量(BOD)和化学需氧量(COD)引起的急性毒性相关的短期影响而言,使用无氟泡沫与使用含氟泡沫没有显著差别(消除持久性有机污染物国际网络,2018)。无氟泡沫可生物降解,而水成膜泡沫含有持久性氟化物质(<https://echa.europa.eu/fluorine-free-foams>)。

(b) 短链氟化替代品:

80. 灭火泡沫联盟(灭火泡沫联盟,2017)指出,所有现代水成膜泡沫制剂都含有基于氟变聚物的含氟表面活性剂,并且在过去 25 年中,短链(C₆)含氟表面活性剂(即带有链长小于 C₇ 的全氟羧酸或链长小于 C₆ 的全氟烷基磺酸的短链全氟和多氟烷基化合物)是基于氟调聚物的水成膜泡沫中使用的主要含氟化合物。除电解氟化外,调聚反应是制造全氟物质的重要工艺,反应产物通常在官能团和全氟烷基链之间含有两个非氟化碳原子(Buck 等人,2011)。研究表明,氟代调聚物最终在自然界中降解为全氟化酸,例如,已知 6:2 氟调聚磺酸降解为全氟庚酸和全氟己酸,但不降解为全氟己烷磺酸(Wang 等人,2011b)。市场上有几种得到 B 类认证的基于含氟表面活性剂的水成膜泡沫,它们是通过调聚反应制成的(见 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8, 表 5)。(请注意,几种短链类别全氟化物质正在接受欧盟的监管审查(详见第 2.3 节第 68 段))。与 C₈ 泡沫相比,必须提高 C₆ 氟表面活性剂或低聚表面活性剂的浓度,才能实现高效的灭火效果(Tyco 专利,2014)。

81. 许多区域的水环境(地表水和地下水)受到全氟和多氟烷基化合物(包括全氟己烷磺酸)的污染,对人类健康和环境构成风险。使用含全氟和多氟烷基化合物的水成膜泡沫的灭火训练地点(通常位于机场和军事训练场)已被确定是重要的全氟和多氟烷基化合物污染源之一(Gobelius 等人,2018; Banzhaf 等人,2017; Hu 等人,2016; 消除持久性有机污染物国际网络,2018)。这些热点场地对环境的影响很大,整治费用也很高。此外,作为替代品的带有链长小于 C₇ 的全氟羧酸或链长小于 C₆ 的全氟烷基磺酸(包括其前体)的短链全氟和多氟烷基化合物,显示出相对较高的水溶性和较强的环境流动性(Baduel 等人,2017; Barzen-Hanson 和 Field, 2015)。“由始至终办法”日益受到重视(Ramsden, 2017)。在澳大利亚昆士兰州,即便是“C₆ 纯”泡沫(链长不大于 C₆、纯度 99.995%的全氟和多氟烷基化合物)物质现在也受到日益严格的监管(澳大利亚昆士兰州政府,2016)。在澳大利亚昆士兰州,此类物质不允许直接排放到环境中,必须全部留在现场,且必须作为受管制的废物进行处置(澳大利亚昆士兰州政府,2018)。

82. 出于对环境污染的关切,泡沫行业(灭火泡沫联盟,2016)制定了使用含氟泡沫的最佳做法指南,其中包括以下建议:

- (a) 氟化 B 类泡沫仅应在出现重大易燃液体火灾危险的情况下使用;

- (b) 在决定将氟化 B 类泡沫用于特定液体火灾危险之前，应调查其他非氟化技术能否达到所需的灭火和抗回火能力；
- (c) 提前评估替代技术和制剂，在发生紧急状况时可作出紧急反应；
- (d) 在训练中使用不含含氟表面活性剂的训练泡沫；
- (e) 使用不含含氟表面活性剂的替代液体测试方法来测试固定系统和消防车泡沫比例混合系统；
- (f) 将泡沫溶液密封、处理和适当处置，不要直接释放到环境中。制定使用氟化 B 类泡沫的消防水径流收集计划。

83. 此外，灭火泡沫联盟还提供了以下信息：对于 A 类（木材）或 C 类（电气）危险，不建议使用 B 类泡沫，因为在这些情况下，只有极小的或者没有易燃液体火灾威胁。如果存在易燃液体威胁，C 类应用必须断电，因为泡沫中含有可导电的水。无需使用 B 类泡沫的情况包括但不限于森林火灾、住宅和房舍火灾、计算机房和电信设施、餐馆和商业厨房，以及一般性设施保护。此外，对于一些小型易燃液体火灾威胁也没有必要使用 B 类泡沫，例如没有大量燃油泄漏的汽车火灾，对于这种火灾可以加大喷水速率或使用干式化学灭火剂。

84. 在认识到这些事实的基础上，缔约方大会第九次会议作出以下决定，即：“鼓励缔约方和其他各方在有可行和高效的全氟辛烷磺酸、其盐类及全氟辛基磺酰氟的替代品时使用替代品，同时考虑到氟基灭火泡沫因其持久性和流动性可能对环境、人类健康和社会经济产生不利影响”（SC-9/5 号决定）。针对全氟辛酸也通过了相同的建议（SC-9/12 号决定）。

2.3.1.2 金属镀层

85. 在评估全氟辛烷磺酸替代品期间，讨论了几种替代品，包括非氟化化学替代品和技术解决方案（见 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8，表 3）。

86. 硬金属电镀用于保护金属部件不受磨损和腐蚀。工业滚子、液压缸和曲轴是硬铬电镀的工业应用实例。电镀工艺可以在工件的金属或合金基材表面镀上一个铬薄层，以保证耐久性和硬度等重要属性。在这些应用中，要将工件浸入镀铬（六价铬）槽。抑雾剂是添加到镀铬槽中的化学试剂，用于减少从金属表面上逸出的铬的数量。六价铬是一种人类致癌物，抑雾剂可减少职业接触，进而降低患呼吸系统癌症的风险。化学抑雾剂是表面活性剂，能够降低镀液的表面张力，并通过控制表面张力，使该工艺形成较小的气泡，从而减慢气泡上升速度，使雾气不太可能排放到空气中，而是形成液滴流回到镀槽。

87. 从关于全氟己烷磺酸的公开资料中无法清楚地了解到这种物质在金属电镀中的应用程度。不过，经查明，有若干专利（大日本油墨化学公司，1979、1988；3M 公司，1981；恒新公司，2015）将全氟己烷磺酸、其盐类以及各种全氟己烷磺酸相关化合物作为抑雾剂用于金属电镀，这表明这种用途可能已经发生（详见挪威环境署，M-961/2018）。至少中国湖北恒新公司可能已经销售了用于金属电镀的全氟己烷磺酸钾盐，以及作为各类电镀（装饰等）原材料的全氟己烷磺酰氟（恒新公司，2019）。应当注意的是，有两种全氟己烷磺酸盐（十三氟己烷磺酸，与 2,2'-二乙醇胺化合（1:1），化学文摘社编号 70225-16-0；以及 N-乙基-N-[(十三氟己基)磺酰基]甘氨酸钾，化学文摘社编号 67584-53-6）作为蚀刻剂（包括表面活性剂或抑雾剂）的成分在生产电子器件的电镀工艺中使用，其生产（包括进口）或加工不应被视为须根据美国环保局《全氟烷基磺酸盐和长链全氟烷基羧酸盐化学物质的重大新用途规则》进行报告的重大新用途（美国环保局，2013）。此外，由于全氟己

烷磺酸在电解氟化工艺中无意产生（Wang 等人，2017），用于金属电镀的含全氟辛烷磺酸的抑雾剂可能含有无意产生的少量全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物。

非化学替代技术

88. 一些替代技术可以在电镀工艺过程中不使用化学品来防止铬（六价铬）的释放（UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8，表 3）。这些替代技术包括在镀槽顶部放置带有聚四氟乙烯涂层的球，以及用丝网或毯状覆盖物给电镀槽加盖。不过，相对于抑雾剂，这种方法的功效受到质疑（见 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8，第 2.5.3 节）。还可以使用控制装置，例如复合网垫（CMP）或铬酸烟雾洗涤器（<https://www.monroenvironmental.com/air-pollution-control/packed-bed-wet-scrubbers/>）来捕集铬镀产生的气溶胶。使用全氟辛烷磺酸的最佳可得技术/最佳环保做法指南（环境署，2017b）指出，这些技术被认为是基于全氟辛烷磺酸的控制设备的替代方案，并且还指出，这些控制设备的可得性不受任何因素限制，在加拿大已经可以从商业渠道获得（UNEP/POPS/POPRC.12/INF/15/Rev.1）。复合网垫系统通过一个网状垫毯来收集和运输铬排放物，主要通过物理手段将铬颗粒浓缩并收集。复合网垫系统通常由几个网垫过滤阶段组成。初期阶段去除大颗粒，中间阶段去除较小颗粒，最后阶段去除微观颗粒。复合网垫系统能有效地去除液滴和消除铬酸雾的排放。就我们所知，目前并不知道使用复合网垫是否会导致铬酸废物增加，并因此产生风险/费用。其他可用的替代技术包括：基于纳米技术的铬镀（<http://www.greencoat.it/>），这是荷兰豪泽涂层技术公司开发的双层系统（<https://www.hauzertechnocoating.com/en/>）；以及 Hexagon 系统，该系统基于智能储液池，可以容纳以前与涂料不兼容的防腐化学品（<https://www.hexigone.com/>）。不过，目前还不清楚这些技术是否可以用于硬金属电镀以及装饰金属电镀。

化学替代品

89. Poulsen 等人（2011）已经证明，对于闭环系统中的非装饰性硬铬电镀（六价铬），可以使用无全氟辛烷磺酸的抑雾剂。Atotech 开发的氟化替代品 Fumetrol®21 基于 1H,1H,2H,2H-全氟辛烷磺酸（6:2 含氟调聚物磺酸；化学文摘社编号 27619-97-2），可以减少六价铬的排放。这种替代多氟烷基化学品最终降解为带有烷基链（不超过六个全氟化碳原子）的全氟羧酸混合物。业界还在尝试将三价铬用于硬铬电镀，从而为铬镀中使用的六价铬开发环保型替代品（<https://www.pfonline.com/blog/post/nucor-invests-in-environmentally-friendly-chrome-plating>）。也有不含氟的替代品，如烷基磺酸盐和油胺（欧洲化学品管理局，2019c）。

2.3.1.3 纺织品，包括皮革和垫衬物

90. 全氟和多氟烷基化合物的整理剂广泛应用于纺织品，以使材料具备拒水、拒油和拒污性能，同时保持透气性。据湖北恒新提供的资料，全氟己烷磺酸相关化合物丙烯酸（N-甲基全氟己基磺酰胺基）乙酯（化学文摘社编号 67584-57-0）被用于拒油和拒水的皮革和纺织产品（恒新公司，2019）纺织品生产中全氟和多氟烷基化合物的使用量约占全球全氟和多氟烷基化合物使用量的 50%（丹麦环保署，2015）。丹麦政府开展了一项研究（丹麦环保署，2015），研究报告中提到了五组替代非氟化化学品：(1) 石蜡，(2) 硬脂酸-三聚氰胺，(3) 硅氧烷，(4) 树枝状大分子和 (5) 纳米材料。报告得出结论认为，非氟化替代品可以提供持久的拒水性能，但具有拒油和拒污作用的非氟化化学替代品数量有限（丹麦环保署，2015）。不含氟碳的纺织品拒水整理剂商业产品包括：德国格雷茨里德的 Rudolf Chemie Ltd.公司销售的 BIONIC-FINISH®ECO 和 RUCO-DRY®ECO；德国魏因海姆的 Freudenberg Group 公司销售的 Purtext®WR、Purtext®WA、Purtext®AP；以及瑞士塞沃伦的

Schoeller Technologies AG 公司销售的 ecorepel®。此外，还可以购买到基于丙烯酸酯、甲基丙烯酸酯和己二酸酯的纺织品和地毯表面处理应用产品（UNEP/POPS/POPRC.13/7/Add.2）。

91. 一项消费者研究调查了户外服装面料中长链（C₈）全氟和多氟烷基化合物防水化学品、短链（C₆）全氟和多氟烷基化合物防水化学品以及非氟化防水化学品之间的功能性差异，旨在用新颖的方法来比较目前市场上销售的户外服装防水面料，并对拒水和拒油功能进行评估（Hill 等人，2017）。非氟化化学品目前可以满足户外服装消费者的拒水要求。因此，作者指出，全氟和多氟烷基化合物化学品在户外服装中的应用属于过度设计，提供的拒油性能超出了消费者的需求。在另一项研究中，基于聚二甲基硅氧烷或碳氢化合物的侧链氟化聚合物（SFP）和非氟化拒水剂，在某些情况下表现出优异的拒水和耐久性，而与长侧链氟化聚合物相比，短侧链氟化聚合物就拒水功能而言是更好的替代品（Schellenberger 等人，2018）。随着全氟烷基链长度减小，侧链氟化聚合物的拒油性和耐久性大幅下降。非氟化替代品无法拒油，这可能限制其作为需要对非极性液体具有防护作用的某些纺织品应用替代品的潜力，例如手术衣和铺单、手术室、医生和护士服装以及实验室工作人员服装等医用纺织品，因为此类纺织品必须能够防护作为感染和病毒载体的血液和体液（Schellenberger 等人，2018）。以上资料与 2018 年增订的全氟辛烷磺酸替代品评估（UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8）中提供的资料一致。不过，在同一项研究中，实验结果表明，一些无氟甚至可生物降解的耐久拒水剂可以提供一定程度的拒污作用（Schellenberger 等人，2018）。

2.3.1.4 抛光剂和清洁剂/洗涤剂，包括涂料、浸渍/防护（用于防潮、防真菌等）

92. 从互联网上可以搜索到一些产品，但是关于这些产品中的化学物质含量和特性的资料很少。例如，“Impregno” 石材浸渍剂是一种无氟防水/防污剂（<https://impregno.de/>）。

93. 关于全氟己烷磺酸在清洁、洗涤和（或）抛光产品中使用的公开资料不多。据报告，丹麦、挪威和瑞典至少在 2000 至 2015 年期间有一种全氟己烷磺酸相关化合物（化学文摘社编号 67584-53-6，[N-乙基-N-[(十三氟己基)磺酰基]-甘氨酸钾盐]用在抛光剂和清洁/洗涤剂中（北欧预备物质，2018）。

94. 据报告，丹麦在 2003 至 2009 年期间至少在四种产品的浸渍/防护中使用了一种全氟己烷磺酸相关化合物（化学文摘社编号 67584-61-6，丙烯酸 2-[甲基[(十三氟己基)磺酰]氨基]乙酯），目的是防潮、防霉等（北欧预备物质，2018）。此外，同样的全氟己烷磺酸相关化合物（化学文摘社编号 67584-61-6）于 2011 年在挪威登记为同一用途类别。

95. 据氟理事会报告（见 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8），许多全球供应商正在提供“非氟化”替代品，包括：

- (a) 基于烃蜡的防水整理剂，由石蜡-金属盐配方组成；
- (b) 疏水改性聚氨酯（疏水改性超支化聚氨酯，称为树状大分子）；
- (c) 基于聚硅氧烷的产品；
- (d) 基于树脂的防水整理剂，由脂肪酸改性三聚氰胺树脂组成。

2.3.1.5 电子产品和半导体制造

96. 几项研究报告了半导体行业的全氟己烷磺酸释放和排放情况（详见全氟己烷磺酸风险简介；UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1），表明全氟己烷磺酸在此项应用中取代了全氟辛烷磺酸。调查发现，全氟己烷磺酸是中国台湾省的一家半导体生产厂的最终废水出水中主要的全氟和多氟烷基化合物成分（Lin 等人，2009）。公开发表的资料表明全氟己烷磺酸在半导体行业使用，这进一步证实了上述情况。全氟己烷磺酸（133.3 纳克/升）以及全氟辛

烷磺酸（128.7 纳克/升）是一家半导体制造厂废水出水点的主要污染物之一。这两种全氟烷基磺酸存在于废水中，且数量相当，表明全氟己烷磺酸是该工艺流程中的主要物质（Lin 等人，2010）。全氟和多氟烷基化合物（例如全氟辛烷磺酸或全氟己烷磺酸）不会留在半导体中，因此如果在释放废水之前没有去除其中的全氟和多氟烷基化合物，则这些物质将随废水释放到环境中。

97. 没有其他现有资料可说明电子和半导体制造中哪些具体工艺使用全氟己烷磺酸，因此有必要审查关于电子和半导体制造中的全氟辛烷磺酸替代品的全部现有资料。全氟辛烷磺酸替代品指南（UNEP/POPS/POPRC.9/INF/11/Rev.1）指出，半导体芯片制造中的以下关键光刻应用中需要少量基于全氟辛烷磺酸的化合物：

- (a) 超细显影/光阻剂（作为光酸产生剂和表面活性剂）；
- (b) 抗反射涂层（作为具有独特功能的表面活性剂）。

98. 全氟己烷磺酸与全氟辛烷磺酸一样，可以用作化合物半导体制造中的表面活性剂，并在随后的洗涤处理过程中冲洗掉。

99. 在全氟辛烷磺酸替代品评估期间查明了几种非氟化化学替代品（UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8/Add.1）。以下替代品被归类为可能不具有持久性有机污染物特征的替代品：乙酸戊酯、苯甲醚、乙酸正丁酯、乳酸乙酯、3-甲氧基丙酸甲酯，以及丙二醇甲醚醋酸酯。科学文献表明，有可能开发出一种不含全氟辛烷磺酸的光阻系统（Ayothi 等人，2006）。此外，一些专利说明了将无氟光刻胶成分作为全氟辛烷磺酸/全氟和多氟烷基化合物用途的替代品的的方法（见 UNEP/POPS/POPRC.12/INF/15/Rev.1）。2010 年，IBM 公司公布了一种无氟光酸产生剂，用于逐步淘汰全氟和多氟烷基化合物，IBM 指出，该无氟工艺满足干式和浸式光刻的性能要求(<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/7639/1/Design-synthesis-and-characterization-of-fluorine-free-PAGs-for-193/10.1117/12.846600.short>)，而富士公司发布了用于半导体行业的“无全氟辛烷磺酸且无全氟和多氟烷基化合物”光阻剂（https://www.fujifilmusa.com/products/semiconductor_materials/photoresists/krf/index.html#features）。

2.3.2 其他用途

100. 除上述应用外，其他潜在用途类别包括杀虫剂、阻燃剂、造纸、石油工业中的应用，以及厨具。此外，各种来源的资料表明，在食品接触材料、密封剂、粘合剂、建筑泡沫和涂料，以及建筑施工领域的一些应用中检测到全氟己烷磺酸（见 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4，表 1.9）。

101. 由欧洲联盟内所有主要的摄影产品制造商（摄影成像业和摄影业）组成的欧洲成像与印刷协会通报称，其成员没有使用全氟己烷磺酸、其盐类或全氟己烷磺酸相关化合物（欧洲成像与印刷协会，附件 F 资料）。

2.4 关于实施可能的管控措施所造成社会影响的资料摘要

102. 在全球减少或消除全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物有望对人类健康和环境产生正面影响。在评估各种限制措施对人类健康和环境的影响时，必须考虑全氟己烷磺酸的具体特征。此类物质被认为是持久性有机污染物，因此具有有所界定的属性，这些属性关系到全氟己烷磺酸在环境中持续存在的可能性。因此，由于全氟己烷磺酸在环境中持续存在，并由于其发生远距离迁移，全氟己烷磺酸存在于全球环境中，包括排放可忽略不计的偏远地区。此外，全氟己烷磺酸具有在生物体内累积的潜能，并具有毒理属性，因此可能发生的长期接触会引起对人类健康和环境的不利影响。据报告，全氟己烷磺酸在人血清中的半

衰期是全氟和多氟烷基化合物中最长的。因此，对此类物质的风险管理要借助科学数据，并采取与《斯德哥尔摩公约》第 8 条第 9 款相符的预防措施。

2.4.1 健康，包括公共健康、环境健康和职业健康

103. 通过列入附件 A 且不设豁免来消除全氟己烷磺酸及其相关化合物的生产、使用、进出口，可以减少并最终消除排放，从而对人类健康和环境产生正面影响。如风险简介所述，全氟己烷磺酸对环境，包括对人类和野生生物造成广泛污染（UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1）。可以在人类和动物中观察到接触全氟己烷磺酸造成的各种影响，包括肝功能、脂质和脂蛋白代谢受到负面影响，内分泌干扰作用，血清胆固醇、脂蛋白、甘油三酯和碱性磷酸酶发生改变，生殖影响，以及发育中的大脑和免疫系统可能受到的影响等。某些流行病学研究证明其会影响到对疫苗接种的抗体反应。在血液、脐带血和母乳中发现了该物质（UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1）。全氟己烷磺酸在人体中的半衰期极长（Olsen 等人，2007），并通过胎盘转移和母乳从一代传递到下一代（Winkens 等人，2017）。

104. 现已确定饮用水是人类接触的重要源头，在饮用水受污染的地区，观察到人类血液中全氟己烷磺酸水平呈上升趋势（Li 等人，2018）。由于全氟和多氟烷基化合物曾在水成膜泡沫中广泛使用，并且一些国家继续开展野外训练，加上全氟和多氟烷基化合物具有持久性，导致各大洲许多国家的饮用水源受到污染（Gobelius 等人，2018；Banzhaf 等人，2017；Mak 等人，2009；Kabore 等人，2018；Zafeiraki 等人，2015；Boiteux 等人，2012；Ericson 等人，2009，详见 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4，表 1.6）。据 2014 年的一项调查估计，瑞典的约 1 000 万居民中有 360 万人的饮用水受到全氟和多氟烷基化合物，包括全氟己烷磺酸的影响（Banzhaf 等人，2017）。2010 至 2015 年期间，在美国 23 个州 134 家水厂的饮用水中检测到全氟己烷磺酸，这些水厂服务于 550 万人（环境工作组的自来水数据库）。在美国 4 920 个公共水源中的 55 个检测到高于最低报告水平（MRL=0.03 微克/升）的全氟己烷磺酸，并且 36 971 个样本中有 207 个含有全氟己烷磺酸（美国环保局，2017）。

105. 为了保护居民，许多国家对一些全氟和多氟烷基化合物设定了饮用水含量限值（见第 1.5 节）。2014 年，瑞典化学品管理局和瑞典食品药品监督管理局发起了一个由主管部门、研究人员、县行政委员会、市政当局和水生产商组成的全国全氟和多氟烷基化合物网络。该网络着力解决饮用水中的全氟和多氟烷基化合物问题，并探讨从土壤和饮用水中去除这些物质的解决方案，以及开展包括全氟化物质研究在内的其他倡议。该网络是一个促进沟通联系和为该国各种行为体提供支持的平台（瑞典化学品管理局，2014）。

106. 传统的水处理技术，如铁或明矾混凝、颗粒过滤/微滤/超滤、曝气、氧化（即高锰酸盐、紫外线/过氧化氢）和消毒（即臭氧化、二氧化氯、氯化物和氯胺化）大多无法有效地去除全氟和多氟烷基化合物（Boone 等人，2019）。现已证明，用于消毒的水处理方法，如氯化物和臭氧处理，可以将四种两性离子/阳离子多氟烷基酰胺和磺酰胺的前体物质降解为全氟辛酸和全氟辛烷磺酸（Xiao 等人，2018）。在污水处理厂出水中观察到个别全氟和多氟烷基化合物的水平高于进水。所有污水处理厂出水中的全氟己酸、全氟辛酸、全氟己烷磺酸和全氟辛烷磺酸的净质量均高于入水，平均增幅分别为 83%、28%、37% 和 58%（Eriksson 等人，2017）。研究范围内的污水处理厂进水和污泥中的前体和中间体负荷，加上出水中的持久性全氟羧酸和全氟烷基磺酸的净质量增加，可以支持一种假设，即前体化合物降解是全氟和多氟烷基化合物污染环境的重要因素（Eriksson 等人，2017）。

107. 现已证明，有些技术可以有效地从水中去除全氟和多氟烷基化合物（但成本很高，见第 2.4.4 节）。这些技术也可以用于污水处理厂出水，以减少对环境的排放。纳滤可以将去离子水中 95% 以上的全氟己烷磺酸去除，同时形成人工地下水并在滤膜上形成一个污垢层，这能够更加准确地反映现实情况。微滤或超滤与反渗透相结合已被证明可以去除目标

全氟和多氟烷基化合物，包括全氟己烷磺酸。离子交换树脂可有效地去除 97% 以上的全氟己烷磺酸，但对其他几种短链全氟和多氟烷基化合物的效果较差（详见 Arvaniti 和 Stasinakis, 2015）。阴离子交换（AE）和颗粒活性炭（GAC）处理是去除长链全氟和多氟烷基化合物及全氟烷基磺酸的较佳方法（与全氟羧酸相比），而反渗透已被证明对所有全氟和多氟烷基化合物，包括最小的全氟和多氟烷基化合物（例如全氟丁酸）都有显著的去除效果（Appleman 等人, 2014）。此外，与支化全氟羧酸相比，颗粒活性炭和阴离子交换具有更高的线性去除效率，这表明阴离子交换和颗粒活性炭处理工艺的设计者和操作员必须在同时去除多种全氟和多氟烷基化合物的过程中，考虑到全氟和多氟烷基化合物去除的选择性以及伴随产生的全氟羧酸解吸（McCleaf 等人, 2017）。

108. 粉尘是一种重要的接触源，尤其是职业接触，而婴幼儿接触的情况也很严重，因为他们常常把手放入口中，这会增加粉尘接触。在中国一家生产全氟辛烷磺酸相关化合物的氟化物生产厂，发现室内灰尘（67.3%）和食物（31.6%）是最重要的全氟己烷磺酸人类接触源（Gao 等人, 2015 年）。全氟己烷磺酸的血清浓度范围为 12.8–10 546 纳克/毫升，在室内灰尘中的浓度范围为无数据至 257 201 纳克/克（平均值为 15 726）（Gao 等人, 2015 年）。在对同一地区的一家氟化物生产厂进行的另一项研究中，职工家庭成员血清中的全氟己烷磺酸浓度范围是 4.33–3 164 纳克/毫升，与厂房相连的住宅灰尘中的全氟己烷磺酸浓度范围为 0.44–708 纳克/克（二者均远高于厂区的普通居民）。此外，膳食中全氟己烷磺酸的浓度范围为 0.067–0.448 纳克/克（湿重），饮用水中全氟己烷磺酸的浓度范围为无数据到 3.2 纳克/升（Fu 等人, 2015）。空气通风、个人防护装备以及在不同区域更换防护服的严格程序有可能减少接触。

109. 禁止全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物将使消防员受益。在消防员中，全氟己烷磺酸的血清水平范围为 49–326 纳克/毫升血清，而对照组的范围为 0.2–22 纳克/毫升血清（Rotander 等人, 2015a）。全氟辛烷磺酸与全氟己烷磺酸水平有密切的正相关关系，并且与澳大利亚和加拿大的普通人群相比，消防员中的全氟辛烷磺酸和全氟己烷磺酸最高水平高出一个数量级。在研究参与者中，工作年限不超过十年者的全氟辛烷磺酸（和全氟己烷磺酸）水平与普通人群相似或仅略高。这一现象与所有训练设施于 2003 年停用 3M 公司的水成膜泡沫以及从 2010 年开始使用无氟泡沫的情况相吻合，表明近年来水成膜泡沫中全氟辛烷磺酸和全氟己烷磺酸的接触量有所下降（Rotander 等人, 2015b）。

2.4.2 农业，包括水产养殖业和林业

110. 逐步淘汰全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物将有利于农业，并可以降低人类和环境直接和间接接触的风险。研究表明，全氟和多氟烷基化合物在农业土壤中传播的主要原因是用受污染的水灌溉，以及用受污染的污水污泥或工业废物作为土壤调理剂（Ghisi 等人, 2019）。全氟和多氟烷基化合物（包括全氟己烷磺酸）被植物吸收的程度不同，取决于其浓度、链长、功能基团、植物物种和品种、生长介质（水培还是土培）以及土壤和生物固体特征等（详见 Ghisi 等人, 2019）。用生物固体（处理过的污水处理厂污泥）来给土壤施肥可能导致作物中的全氟和多氟烷基化合物水平上升。在污水处理厂的污泥和出水中检测到全氟己烷磺酸及其相关化合物（UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4, 表 1.5）。据观察，植物会从掺入全氟和多氟烷基化合物的土壤中摄取全氟己烷磺酸（Wen 等人, 2014）。此外，已证明植物能够对前体化学物质进行生物转化，例如已证明小麦可将全氟辛烷磺酰胺生物转化为全氟辛烷磺酸、全氟己烷磺酸和全氟丁烷磺酸（Zhao 等人, 2018）。

111. 如风险简介所述，据研究指出，全氟己烷磺酸存在于食品中（欧洲食品安全局, 2012; Gebbink 等人, 2015; Noorlander 等人, 2011; 澳大利亚和新西兰食品标准, 2016; UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4, 表 1.7）。从产自欧洲的水果和蔬菜中检测到全氟己烷磺酸和其他全氟和多氟烷基化合物（Herzke 等人, 2013; D'Hollander 等人, 2015）。在澳大利

亚主要取自污染地点的环境样本中，牛肉、兔肉和鸡蛋中的全氟己烷磺酸平均上限值最高（澳大利亚和新西兰食品标准，2016）。全氟己烷磺酸浓度较高的其他食品有甲壳类动物、鱼肝和羊肉（澳大利亚和新西兰食品标准，2016）。对生长在受水成膜泡沫污染的土壤上的麦草进行了研究，结果证明全氟己烷磺酸具有生物可利用性和生物累积性（Bräunig 等人，2019）。

112. 由于全氟己烷磺酸和其他全氟和多氟烷基化合物被用于若干工业和家庭应用，这些物质经常在污水处理厂出水和垃圾填埋场沥滤液中被检测到（Hamid 等人，2018；见 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4，表 1.5）。在 Allred 等人（2014）进行的一项研究中，从垃圾填埋场沥滤液中检测到几种全氟己烷磺酸前体（FHxSAA、MeFHxSAA、EtFHxSAA），这表明这些全氟己烷磺酸前体和（或）其母体化合物可能被用于各种应用，因为该垃圾填埋场接收家庭和商业废物、建筑和拆除废物、来自污水处理厂的生物固体以及无害的工业废物。据报告，全氟己烷磺酸会从垃圾填埋场和污水处理厂排放到空气中，并会在垃圾填埋场周围的树叶中累积（Ahrens 等人，2011；Tian 等人，2018）。

113. 在许多水生物种中检测到全氟己烷磺酸（见 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4，表 1）。逐步淘汰全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物也将有利于水产养殖业，特别是在水生物种是重要食物来源，以及食用水产品被证明是居民接触全氟己烷磺酸的途径的地方。在汤逊湖的渔业从业人员和白洋淀居民食用的水产中观察到较高的全氟和多氟烷基化合物及全氟己烷磺酸血清水平，这两个湖泊附近有氟化工厂（Zhou 等人，2014；Cui 等人，2018）。

2.4.3 经济方面和社会成本

禁止使用

114. 根据目前掌握的情况，全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物正在或可能用于许多与全氟辛烷磺酸、其盐类及其相关化合物相同的用途类别。尚无缔约方提出全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物任何应用的豁免请求。此外，预计现有库存数量很小，随着全氟辛烷磺酸的逐步淘汰，在全氟辛烷磺酸产品中无意存在的全氟己烷磺酸副产品也将逐步淘汰。因此，根据目前掌握的情况，可认为业界可能替代全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的现有用途，而不会产生重大的社会经济成本（RPA，2019）。一些国家已经对包括全氟己烷磺酸在内的长链全氟和多氟烷基化合物实施了监管（见第 1.5 节）。

115. 产生的执行费用可以与针对全氟和多氟烷基化合物的其他限制措施分担，例如，可以同时物品中存在全氟辛烷磺酸、全氟辛酸、C₉-C₁₄ 全氟羧酸和全氟己烷磺酸及相关化合物执行监管。欧洲标准化委员会（CEN）规定的全氟辛烷磺酸分析方法可用于检测离子形式的全氟辛烷磺酸及其盐类（关于分析方法及挑战的更多资料见第 1.1 节）。因此，专门用于全氟辛烷磺酸的执行费用应该较少。不过，预计可能会产生一些能力建设费用。由于产品中全氟辛烷磺酸含量水平较低（相对于其他全氟和多氟烷基化合物），在执行方面也会遇到一些困难。必须制定能够清晰区分已列入物质与未列入物质的分析方法（风险评价委员会/社会经济分析委员会针对 C₉-C₁₄ 全氟羧酸进行了类似问题的讨论，以及《化学品注册、评估、许可和限制条例》下的全氟辛酸限制提案（欧洲化学品管理局，2018、2015））。

116. Oosterhuis 等人（2017）的一项研究旨在提供可用于制定基准的资料，以评估用于控制全氟辛酸、全氟辛烷磺酸及其他持久性有机污染物的各种措施的相称性。这项研究分析了已经或考虑采用的监管措施的成本效益。现有证据表明，在过去，成本低于每千克（使用或排放减少数量）物质 1 000 欧元的监管措施通常不会被驳回，而成本高于每千克物质 50 000 欧元的措施可能被驳回。但是，无法将是否驳回措施的决定与任何相称性基准联系起来，因为很少会明确声明驳回的原因是“成本不相称”。

117. 利用有限的对全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物开展的一项研究表明，与处置含全氟己烷磺酸（作为主要氟活性成分）水成膜泡沫相关的成本可能是相称的（RPA, 2019）。

控制排出或排放

118. 在被全氟和多氟烷基化合物污染的水流向的地区或土壤受污染的地区，健康成本（北欧国家的成本估计为 280 万至 460 万欧元）和清理成本（北欧国家的成本估计为 4 600 万至 110 亿欧元）很高（北欧部长理事会，2019）。消除持久性有机污染物国际网络认为，仅因为使用基于氟化合物的泡沫所要承担的法律和财务责任这一项，便使得使用水成膜泡沫的生命周期成本远高于无氟泡沫（消除持久性有机污染物国际网络，2018）。例如，澳大利亚政府在 2018 年宣布投入 7 310 万澳元（5 070 万美元）用于支助受全氟和多氟烷基化合物污染影响的人，将在五年内使用其中的 5 520 万澳元（3 830 万美元）为人们提供安全的饮用水。政府已经为全氟和多氟烷基化合物的调查、管理和整治活动花费了超过 1 亿澳元（6 940 万美元）。所采取的一些措施针对的是污染对人类的影响，例如，公共外联、服务热线、咨询服务，以及为受影响社区提供的自愿验血项目和相关的流行病学研究。

119. 在已知半衰期值的全氟和多氟烷基化合物中，全氟己烷磺酸在人体内的半衰期最长，并且存在于所分析的大多数环境和生物样本中（见 UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8）。没有对全氟辛烷磺酸引起的人类健康和环境影响进行货币估值，因为全氟辛烷磺酸水平与不同健康端点之间的定量因果关系尚未界定，而且难以与其他具有类似影响的全氟和多氟烷基化合物（如全氟辛烷磺酸）区分开来。不过，北欧理事会在研究中进行的社会经济分析发现，不作用的代价巨大，北欧国家 3 每年与健康相关的成本估计为 28 亿至 46 亿欧元，欧洲经济区所有国家则为 520 亿至 840 亿欧元。北欧国家除医疗以外的总体成本估计为 4600 万至 110 亿欧元（北欧部长理事会，2019）。该报告基于与接触全氟和多氟烷基化合物相关的一些选定健康端点进行的货币估值，这些健康断点涵盖肾癌、全因死亡率和高血压。但儿童受到的影响，如低出生体重和感染（由于免疫系统受影响而引起发烧的天数）尚未用货币数额衡量。该报告还将医疗以外的成本加以货币化，包括处理饮用水资源和修复受污染的土壤等。对全氟和多氟烷基化合物污染饮用水的两个案例进行了相关费用估算，乌普萨拉用木炭过滤水的费用为每年 100 万欧元，而龙内比建设新水源的费用为 300 万欧元，后者是一个小城市，在 2013 年发现全氟和多氟烷基化合物含量升高，约 5 000 户居民直接受到影响（瑞典化学品管理局，2016）。此外，通过饮用水接触全氟和多氟烷基化合物（包括全氟己烷磺酸）会引起健康问题而且受影响人群会产生焦虑，这也是也一种社会成本。

120. 由于水成膜泡沫的广泛使用，全氟和多氟烷基化合物（特别是全氟辛烷磺酸）的最大环境来源之一是受污染土壤的扩散。由于基于全氟辛烷磺酸的水成膜泡沫经常含有全氟己烷磺酸，因此它在消防训练场地周围的环境中传播。在挪威和许多其他国家，机场及附近地区的全氟和多氟烷基化合物污染负担很重，因为这些地方必须定期进行消防测试和练习。挪威调查了 50 个机场，在大多数场地查明了全氟辛烷磺酸以及全氟己烷磺酸和其他全氟和多氟烷基化合物，并数量相差很大，有的在土壤中检测出低浓度和少量残留，而有的场地则受到严重污染并扩散到附近的湖泊和峡湾。几个机场正在进行整治工作，但确切成本仍不确定。建议用活性炭过滤器进行过滤，但如果水中含有腐殖质等物质，则容易堵塞。这种整治解决方案的费用可能是每个场地（以埃沃内斯机场为例）高达 5 000 万挪威克朗（650 万美元），具体取决于更换过滤器的频率，整治期则历时三十年。安装水泵和处理系统的费用估计为 1 400 万挪威克朗（180 万美元）。成本估算的最大不确定因素之一是，在全氟辛烷磺酸被从土壤冲入溪流的过程中，经过多长时间才对接纳湖泊或峡湾产生负面影响（Alling 等人，2017）。如果采取适当的整治行动，可以保护饮用水资源和野生生物，以及湖泊和内陆水域等地表水体中的渔业资源。但是，必须对水、沉积物和生物群进行监测，以评估通过采取整治行动而取得的改善效果。

废物管理和储存

121. 如上文所述，Boucher 等人（2019）估计，全氟己烷磺酸的最大排放源是使用与处置。该出版物的补充资料（Boucher 等人，2019 S2.1.3）提供了基于全氟己烷磺酰氟的产品在使用与处置期间的宿命的图表式概述。图表中显示了可能导致全氟己烷磺酸排放到环境中的废物流途径（图 S6）。这些途径包括通过废水（气体、出水和污泥）以及通过固体废物（垃圾填埋场、土地处理）排放。

122. 根据第六条第 1 (d) (二) 款，如果全氟己烷磺酸列入了《斯德哥尔摩公约》，则含全氟己烷磺酸产品的处置方式应确保销毁或不可逆地转化其中含有的持久性有机污染物，使其不再表现出持久性有机污染物的特征，或者应以其他无害环境的方式处置。与全氟己烷磺酸有关的特殊废物管理和处置费用可能很高。由于存在纺织品浸渍剂这一遗留用途，其产生的废液可能会受到影响。此外，在几个产品类别中的广泛使用也会对家庭废物、电子和电气设备以及报废车辆产生影响。高温焚烧的容量可能是一大问题。对于发展中国家而言，工发组织建议采用各种有效的非燃烧技术，包括适用于销毁全氟和多氟烷基化合物的方法，如气相化学还原和球磨（工发组织，2007）。巴塞尔公约下的“关于对由持久性有机污染物构成、含有此类污染物或受其污染的废物实行无害环境管理的一般性技术准则增订本”将气相化学还原列为能够销毁所有持久性有机污染物的方法（UNEP/CHW.14/7，表 4）。电化学氧化已被证明可以破坏 C₄-C₈ 全氟烷基酸（AECOM，2018）。此外，水泥窑联合焚烧作为一种高温焚烧方法，在大多数国家经常使用。不过，关于在不同温度下产生的热解或燃烧产物以及达到破坏程度，尚未得到很好的总结（美国空军，2017）。与废物管理相关的费用不详。关于全氟辛烷磺酸的技术准则（用途、清单和废物）也非常适用于含全氟己烷磺酸的废物（环境署，2017a、b；2015）。

123. 持久性有机污染物审查委员会以前制定了一系列关于管理全氟辛烷磺酸废物流的建议。POPRC-6/2 号决定规定了短期、中期和长期框架内的一系列降低风险的措施。由于全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的使用模式与全氟辛烷磺酸相似，这些建议在很大程度上适用于全氟己烷磺酸。其中包括：“在当前的全氟辛烷磺酸生产和工业使用中，采用符合最佳可得技术和最佳环保做法的销毁技术，处理含有全氟辛烷磺酸的废物。除非对含有全氟辛烷磺酸的沥滤液进行过适当处理，否则不应允许填埋此类废物。在没有可用销毁技术的情况下确保储存安全。在全氟辛烷磺酸生产商或全氟辛烷磺酸工业使用者（造纸、地毯、纺织、镀铬及其他使用全氟辛烷磺酸的行业）储存废物的填埋场开展紧急调查。应分析这些填埋场附近以及全氟辛烷磺酸生产和使用地区附近的水库和水井的饮用水”。

124. 还制定了详细的建议，以降低使用、现有库存、物品回收、城市填埋场沉积的消费品，以及来自受污染场地的释放等风险（POPRC-6/2 号决定）。

2.4.4 向可持续发展迈进

125. 消除全氟己烷磺酸符合旨在减少有毒化学物质排放，以及将化学品安全与可持续发展和减贫联系起来的各项可持续发展计划。对化学品和一切废物的整个生命周期进行无害环境管理，在联合国大会第 70/1 号决议中有所论及，是关于可持续发展的《2030 年议程》中的可持续发展目标的组成部分。全氟化学品和向较安全替代品过渡被在“化管方针”下视为令人关切的问题。化管方针的《总体政策战略》也称，“根据科学的风险评估结果、并计及更为安全的替代品所涉成本和效益及其可得性和实际功效，那些对人类健康和环境构成不合理的和无法加以管理的风险的化学品不再予以生产或用于这些用途”。《总体政策战略》进一步建议，持久性有机污染物可能是优先进行评估以支持向较安全替代品过渡的各类化学品之一。

2.5 其他考虑因素

126. 将全氟己烷磺酸列入附件 A 且不设豁免，意味着需要通知各方采取管控措施，因此应该是有效而适当的，包括适合于化学品监管基础设施有限的国家。关于替代品的资料是现成的，可以根据需要随时提供。在环境监测和生物监测方面，可以将全氟己烷磺酸纳入现有的针对其他持久性有机污染物（特别是全氟辛烷磺酸和全氟辛酸）的监测方案中。

2.5.1 获取信息和公众教育

127. 一些缔约方、观察员和非政府组织在其网站上提供了关于全氟和多氟烷基化合物的信息以及用于公众教育的资料。例如：

- (a) 经合组织的全氟和多氟化学品门户网站：<http://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/>；
- (b) 欧洲化学品管理局：<https://echa.europa.eu/>；（用化学文摘社编号搜索）
- (c) 美国毒物与疾病登记署（ATSDR）：<https://www.atsdr.cdc.gov/pfas/index.html>；
- (d) 澳大利亚：<https://www.pfas.gov.au/>，
<http://www.defence.gov.au/Environment/PFAS/Publications/Default.asp>，
<http://www.health.gov.au/internet/main/publishing.nsf/Content/ohp-pfas-hbgv.htm>；
- (e) 丹麦环境和食品部：<https://mst.dk/>；
- (f) 瑞典环境保护局：<http://www.swedishepa.se/Global-links/Search/?query=PFAS>；
- (g) 挪威环境署：<http://www.environment.no/>；
- (h) 与《1999 年加拿大环境保护法》规定的举措有关的资料：
<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/canadian-environmental-protection-act-registry/general-information/fact-sheets.html>；
- (i) 关于加拿大物质评估与管理的资料：<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/canadian-environmental-protection-act-registry/general-information/fact-sheets/management-process.html>；
- (j) 阿拉斯加州溢油预防和应对司查明的污染场地：
<https://dec.alaska.gov/spar/csp/pfas-contaminants>；
- (k) 可获取氟理事会会员编制的的数据：<https://fluorocouncil.com/health-environment/scientific-studies/>；
- (l) 德国环境署：<https://www.umweltbundesamt.de/>；
- (m) 瑞典化学品管理局：<https://www.kemi.se/en/chemical-substances-and-materials/highly-fluorinated-substances>；
- (n) 瑞典国家食品局：<https://www.livsmedelsverket.se/en/food-and-content/oonskade-amnen/miljogifter/pfas-in-drinking-water-fish-risk-management>；
- (o) 澳大利亚昆士兰州政府“灭火泡沫的环境管理——操作政策”：
<https://www.qld.gov.au/environment/pollution/management/disasters/investigation-pfas/operational-policy>。
- (p) 美国环保局全氟和多氟烷基化合物网站：<https://www.epa.gov/pfas>。

2.5.2 控制和监测能力的现状

128. 全氟己烷磺酸已被纳入几个进行中的监测方案。
129. 加拿大正在监测空气和（或）降水中的全氟己烷磺酸，将其作为全球大气被动取样（GAPS）网络（2009 年开始进行空气监测）、在北极开展的北方污染物方案（NCP）（2006 年开始进行空气监测）以及化学品管理计划（CMP）下的大湖流域监测与监督（分别于 2006 年和 2019 年进行降水和空气监测）所涵盖的物质之一。
130. 在德国环境勘测（GerES）和德国环境标本库（ESB）的框架内进行了人体血液，特别是血浆监测。1982-2010 年的全氟己烷磺酸时间趋势数据已经提供（Schröter-Kermani, 2013）。一个进行中的项目将补充 2013-2019 年的时间趋势分析（德国的附件 F 资料）。在美国，全氟己烷磺酸包括在“全美健康和营养调查”的生物监测调查范围内（https://www.cdc.gov/biomonitoring/PFAS_FactSheet.html）。瑞典将全氟和多氟烷基化合物（包括全氟己烷磺酸）纳入其环境监测方案（Naturvardsverket）以及与健康相关的监测计划（Karolinska Institutet）。加拿大还通过各种方案来监测人体内的全氟己烷磺酸及其他全氟化合物，例如在北极开展的北方污染物方案、加拿大卫生措施调查（CHMS）以及加拿大母婴环境化学品研究（MIREC）等。在加拿大卫生措施调查中，于 2007-2009 年和 2009-2011 年、2016-2017 年以及 2018-2019 年对加拿大普通人群体内的全氟己烷磺酸进行了监测（加拿大政府，2013；Haines 等人，2017）。韩国国家环境健康调查（KoNEHS）从 2018 年开始监测包括全氟己烷磺酸在内的五种全氟和多氟烷基化合物（大韩民国，附件 F 资料）。
131. 由德国环境署作为协调人的欧洲联合方案“欧洲人类生物监测倡议”（HBM4EU）已将全氟和多氟物质确定为优先物质，并将在 2021 年之前汇编欧盟范围内的接触和影响数据。该倡议将测量欧洲各地 12-19 岁青少年血清中的全氟己烷磺酸（Schoeters 等人，2018）。
132. 挪威对空气、淡水、海洋和陆地生物群开展年度监测，监测项目包括全氟己烷磺酸（<http://www.miljodirektoratet.no/no/Tema/Miljoovervakning/Naturovervakning/Giftfritt-miljo/>）。
133. 欧洲、北美和亚洲提供了全氟和多氟烷基化合物（包括全氟己烷磺酸）的监测资料。为了跟踪潜在行动的成效，应将全氟己烷磺酸纳入现有的各种全球持久性有机污染物监测方案。

3. 资料综述

3.1 风险简介资料摘要

134. 持久性有机污染物审查委员会在 2018 年的第十四次会议上通过了风险简介，并得出结论认为，全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物可能因为远距离环境迁移而对人类健康和环境造成重大不利影响，因而有必要采取全球行动。
135. 全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物用于表面活性剂，地毯、造纸、皮革和纺织品的防水和防污涂层，以及灭火泡沫等应用，常常被用来代替全氟辛烷磺酸。全氟己烷磺酸在生产其他全氟和多氟烷基化合物（如全氟辛烷磺酸）等物质的电解氟化工过程中无意产生。关于目前全球全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物生产情况的资料有限。历史上主要由 3M 公司生产。确定了几家位于中国的生产商，但无法从公开渠道获得产量数据。
136. 全氟己烷磺酸在环境中具有极强的持久性。有大量研究反映了土壤、水以及各种生物群中全氟己烷磺酸水平偏高的情况。对关于全氟丁烷磺酸、全氟辛烷磺酸和全氟辛酸的持久性的结论进行了交叉比对，得出的结论是，全氟己烷磺酸无法在自然条件下降解，并

且在水、土壤和沉积物中非常持久。此外，全氟己烷磺酸离子的水溶性相对较强，并且在目标生物中与蛋白质相结合。鉴于已查明与蛋白质结合会造成生物累积，对于水生生物而言，标准的生物浓缩系数/生物累积系数并非说明全氟和多氟烷基化合物（包括全氟己烷磺酸）生物累积性的有意义的指标。不过，生物放大现象的确存在，并且可以得出全氟己烷磺酸的生物放大系数（BMF）和营养放大系数（TMF）大于 1（生物放大系数范围为 1.4-48，营养放大系数范围为 0.1-4.3）。据估计，全氟己烷磺酸在人体内的血清消除半衰期比其他全氟和多氟烷基化合物长，平均为 8.5 年（范围为 2.2-27 年）。

137. 人们发现，全氟己烷磺酸在全球环境和生物群中分布极广。研究指出，远距离环境迁移造成偏远地区也发生接触情况。在偏远地点的水、雪、空气和生物群（包括人体）中检测到了全氟己烷磺酸。目前看来，向北极等偏远地区迁移的主要机制很可能是通过洋流。不过，不能排除全氟己烷磺酸及其相关化合物通过大气迁移的可能性，因为在雪、雨水和空气以及地衣中检测到全氟己烷磺酸。全氟己烷磺酸及其相关化合物有可能通过空气迁移至偏远地区，并且全氟己烷磺酸相关化合物会在当地降解为全氟己烷磺酸。

138. 人类接触全氟己烷磺酸的主要途径是通过食物和饮用水摄取，但也可能在室内环境中通过含全氟己烷磺酸或其前体的灰尘或消费品接触到这种物质。继全氟辛酸磺酸和全氟辛酸之后，全氟己烷磺酸是在全世界普通人群的血液样本中最常检测到的全氟和多氟烷基化合物。全氟己烷磺酸存在于脐带血和母乳中。母乳可能是吃母乳婴儿的重要接触源，因为有文献证明全氟己烷磺酸可通过哺乳排出。由于在人体内的清除时间较长，饮用水污染可导致血清中全氟己烷磺酸水平大幅上升。将饮用水用于食品制作，可增加食品中的背景水平。

139. 在啮齿动物中观察到接触全氟己烷磺酸对肝脏的各种影响在啮齿动物和人体中观察到肝脏脂质和脂蛋白代谢受到影响，并且血清胆固醇、三酸甘油酯和脂蛋白发生改变。在对小鼠和大鼠进行的实验室对照试验中观察到神经毒性和神经发育作用，并且一些研究指出，儿童的行为抑制与出生前和童年时期接触某些全氟和多氟烷基物质（包括全氟己烷磺酸）具有关联性。据报告，大鼠的甲状腺激素系统会受到影响，而各种研究表明，全氟己烷磺酸还可能影响到鸟类、北极熊和人类的甲状腺系统。此外，几项流行病学研究表明，初始及发育中的免疫系统可能容易受到某些全氟和多氟烷基物质及全氟己烷磺酸接触的影响。

140. 最近得到的斯瓦尔巴特（挪威）北极熊研究数据显示，其血浆中全氟己烷磺酸水平在日益升高。在斯瓦尔巴特北极熊中观察到全氟和多氟烷基化合物（包括全氟己烷磺酸）引起的多重应激效应，这表明存在野生动物受到不利影响的风险。在接触全氟和多氟烷基物质的同时接触其他持久性有机污染物所带来的后果不明，但可能导致受应激源严重影响的物种的毒性上升。

3.2 风险管理评价资料摘要

141. 限制或禁止全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物，可减少排放及随后的人类和环境接触，从而对人类健康和环境产生正面影响。

142. 全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物是合成物质，未知有自然产生的情况。C₆、C₈和 C₁₀全氟磺酸主要由 3M 公司生产，该公司自 1958 年起在美国、自 1971 年起在比利时生产，直到 2002 年停产。据 3M 公司报告，从 1958 年到 1997 年，美国每年生产大约 228 公吨全氟己烷磺酸。3M 公司停产，意大利一家制造商继续生产并发布全氟己烷磺酸及其前体化合物的广告，直到 2018 年 11 月申请破产。不过，生产和使用该物质的主要地点已转移到亚洲，且数量自 2002 年以来有增无减，至少有一家制造商在中国。全氟己烷磺酸还会在生产其他全氟和多氟烷基化合物的电解氟化工艺中无意产生。如果不进行去除以提高纯度，基于全氟辛基磺酰氟的产品可能含有最多 10% 的全氟己烷磺酸（系无意产生的杂质）。

143. 据我们所知，全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的用途类别与全氟辛烷磺酸（有时是全氟辛酸）化合物重叠，并且在许多应用中，全氟己烷磺酸或其相关化合物可以用作全氟辛烷磺酸（有时是全氟辛酸）的替代品。至少在以下应用中存在有意识使用的情况：(1) 消防用水成膜泡沫；(2) 金属镀层；(3) 纺织品、皮革和垫衬物；(4) 抛光剂和清洁/洗涤剂；(5) 涂层、浸渍/防护（用于防潮、防霉等）；(6) 电子产品和半导体制造。其他潜在用途种类可包括杀虫剂、阻燃剂、纸张和包装、石油工业和液压油。另外，全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物还用于某些含全氟和多氟烷基化合物的消费品。

144. 在《斯德哥尔摩公约》下对全氟辛烷磺酸替代品开展的定期评估表明，所有潜在应用都可以使用替代品，这一结论也适用于全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物。替代品包括氟化和非氟化物质，以及替代（非化学）技术解决方案。关于替代品的可得性、可接受性及价格的资料，以及关于不同国家的监管措施和使用情况的资料表明，对全氟己烷磺酸实施使用禁令的社会经济成本很低，可以被消除/监管带来的效益所抵消。据估计，修复污染场地（例如以前和现在的灭火泡沫训练场和机场、工业废物和危险废物填埋场）以及去除受全氟己烷磺酸（及其他全氟和多氟烷基化合物）影响的饮用水中的全氟和多氟烷基化合物（包括全氟己烷磺酸）的费用很高。实施全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物的控制措施将有助于避免将来产生这些费用。

145. 全氟己烷磺酸在其生命周期的所有阶段都会排放到环境中，但据推断，其在使用寿命内和废物处置阶段的排放量最高。全氟己烷磺酸在各种环境介质中广泛存在，例如全球各地的地表水、深海水、饮用水、污水处理厂和垃圾填埋场沥滤液、沉积物、地下水、土壤、大气、尘埃，以及生物群（包括野生生物）和人体。采取高效的控制措施来处理废物对于降低环境浓度至关重要。根据《公约》第 6 条，废物处置方式应确保销毁或不可逆地转化其中含有的持久性有机污染物，使其不再表现出持久性有机污染物的特征，或者，在销毁或不可逆转化均不是环保的可取选择，或在持久性有机污染物含量较低的情况下，应以其他无害环境的方式处置。关于全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物目前用途的知识有限，而且目前缺乏可用于检测和量化个别全氟己烷磺酸相关化合物的标准化分析方法，导致难以从化学产品和化学混合物中查明这些化合物。由于缺乏关于消费品/产品中此类化合物含量的信息，很难将这些产品从废物流中以及在废物处理过程中分离出来。对于要投放市场的较新产品，进口商可以要求供应商提供这些信息，但对于已经投放市场的产品，这项任务较为困难。不过，这种情况并不是全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物所独有的，其他受监管的全氟和多氟烷基化合物也是如此。

3.3 建议采取的风险管理措施

146. 没有收到豁免请求。目前没有资料显示焚烧可能导致全氟己烷磺酸无意产生，意味着不需要列入附件 C。因此，为实现“禁止或限制生产、使用、进出口”，建议采取的管控措施将是全氟己烷磺酸、其盐类及其相关化合物列入《公约》附件 A，且不设豁免。

4. 结语

147. 持久性有机污染物审查委员会已决定，全氟己烷磺酸（化学文摘社编号 355-46-4，PFHxS）、其盐类及其相关化合物可能因为远距离环境迁移而对人类健康和环境造成重大不利影响，因而有必要采取全球行动；委员会还编写了一份风险管理评价并审议了各种备选管理方案，同时注意到关于替代品可得性的资料；委员会就此建议，斯德哥尔摩公约缔约方大会依据《公约》第 8 条第 9 款，考虑将全氟己烷磺酸（化学文摘社编号 355-46-4，PFHxS）、其盐类及其相关化合物列入附件 A 且不设特定豁免，并规定相关的管控措施。

参考文献

- 3M (3M Canada Company) (2015). Material Safety Data Sheet – FC-95 Fluorad Brand fluorochemical surfactant (inactive).
http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSuUn_zu8lZNU4txoY_BPv70kDVFNvu9lxtD7SSSSSS-- (last accessed: 4 February 2019).
- 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Co. USA) (2000a). Letter to Charles Auer. Re: Phase-out Plan for PFOSF-Based Products. U.S. EPA Administrative Record 226, No. 600 (AR226-0600).
- 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Co. USA) (2000b). Sulfonated Perfluorochemicals in the Environment: Sources, Dispersion, Fate and Effects. U.S. EPA Administrative Record 226, No. 545 (AR226-0545).
- 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Co. USA) (1981). Patent: Mist suppressant. Patent No. GB 2077765.
- AECOM, (2018). AECOM's Promising New PFAS Treatment Technology DE-FLUOROTM Shows Complete Destruction of PFAS. <https://www.aecom.com/wp-content/uploads/2018/10/PFAS-Info-Sheet.pdf>
- Ahrens L, Shoeib M, Harner T, Lee SC, Guo R, Reiner EJ (2011). Wastewater treatment plant and landfills as sources of polyfluoroalkyl compounds to the atmosphere. *Environ. Sci. Technol.* 45: 8098-8105.
- Appleman TD, Higgins CP, Quiñones O, Vanderford BJ, Kolstad C, Zeigler-Holady JC, Dickenson ER (2014). Treatment of poly- and perfluoroalkyl substances in U.S. full-scale water treatment systems. *Water Res.* 51:246-55. doi: 10.1016/j.watres.2013.10.067.
- Allred BM, Lang JR, Barlaz MA, Field JA (2014). Orthogonal zirconium diol/C18 liquid chromatography-tandem mass spectrometry analysis of poly and perfluoroalkyl substances in landfill leachate. *J Chromatogr A.* 1359:202-11.
- Alling V, Hartnik T, Bjærtnes O (2017). Two case studies for remediation of PFAS contaminated fire-fighting sites in Norway. Proceedings from the Cleanup Conference 2017. <http://www.cleanupconference.com/wp-content/uploads/2017/10/CleanUp-2017-presentations-for-downloading.pdf>.
- Arp HPH, Brown TN, Berger U, Hale SE (2017). Ranking REACH registered neutral, ionizable and ionic organic chemicals based on their aquatic persistency and mobility. *Environ. Sci. Process. Impacts* 19, 939–955.
- Arvaniti OS and Stasinaki AS (2015). Review on the occurrence, fate and removal of perfluorinated compounds during wastewater treatment. *Sci Tot Environ.* 524-525; 81-92.
- Australian Government, Department of Health (2019). Health Based Guidance Values for PFAS for use in site investigations in Australia – September 2019. <https://www1.health.gov.au/internet/main/publishing.nsf/Content/ohp-pfas-hbgv.htm>.
- Ayothi R, Chang SW, Felix N, Cao HB, Deng H, Yueh W, Ober CK (2006) New PFOS free photoresist systems for EUV lithography, *Jour Photopolymer Science and Technol* 19:515-520.
- Baduel C, Mueller JF, Rotander A, Corfield J, Gomez-Ramos M-J (2017). Discovery of novel per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) at a fire fighting training ground and preliminary investigation of their fate and mobility. *Chemosphere.* 185: 1030-1038.
- Banzhaf S, Filipovic M, Lewis J, Sparrenbom CJ, Barthel R (2017). A review of contamination of surface-, ground-, and drinking water in Sweden by perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *Ambio.* 46(3):335-346.
- Barzen-Hanson KA, Roberts SC, Choyke S, Oetjen K, McAlees A, Riddell N, McCrindle R, Ferguson PL, Higgins CP, Field JA (2017). Discovery of 40 Classes of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Historical Aqueous Film-Forming Foams (AFFFs) and AFFF-Impacted Groundwater. *Environ Sci Technol.* 51(4):2047-2057.
- Barzen-Hanson KA, Field JA (2015). Discovery and Implications of C 2 and C 3 perfluoroalkyl sulfonates in aqueous film-forming foams and groundwater. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2, 95-99. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.estlett.5b00049>.
- Bečanová J, Melymuk L, Vojta Š, Komprdová K, Klánová J (2016). Screening for perfluoroalkyl acids in consumer products, building materials and wastes. *Chemosphere.* 164:322-329.
- Benskin JP, De Silva AO, Martin JW (2010). Isomer profiling of perfluorinated substances as a tool for source tracking: a review of early findings and future applications. *Rev Environ Contam Toxicol.* 208:111-60.

- Blum A, Balan SA, Scheringer M, Trier X, Goldenman G, Cousins IT, Diamond M, Fletcher T, Higgins C, Lindeman AE, Peaslee G, de Voogt P, Wang Z, Weber R. The Madrid Statement on poly and perfluoroalkyl substances (PFASs). *Environ Health Perspect* 2015, 123(5), A107–A111.
- Boiteux V, Dauchy X, Rosin C, Munoz JF (2012). National screening study on 10 perfluorinated compounds in raw and treated tap water in France. *Arch Environ Contam Toxicol* 63(1):1-12.
- Boone JS, Vigo C, Boone T, Byrne C, Ferrario J, Benson R, Donohue J, Simmons JE, Kolpin DW, Furlong ET, Glassmeyer ST (2019). Per- and polyfluoroalkyl substances in source and treated drinking waters of the United States. *Sci Total Environ*. 653:359-369. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.245.
- Boucher JM, Cousins IT, Scheringer M, Hungerbühler K, Wang Z (2019). Toward a Comprehensive Global Emission Inventory of C₄–C₁₀ Perfluoroalkanesulfonic Acids (PFASs) and Related Precursors: Focus on the Life Cycle of C₆- and C₁₀-Based Products. *Environmental Science & Technology Letters* 2019 6 (1), 1-7.
- Bräunig J, Baduel C, Barnes CM, Mueller JF (2019). Leaching and bioavailability of selected perfluoroalkyl acids (PFAAs) from soil contaminated by firefighting activities. *Sci Total Environ*. 646:471-479. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.231.
- Buck RC, Franklin J, Berger U, Conder JM, Cousins IT, de Voogt P, Jensen AA, Kannan K, Mabury SA, van Leeuwen SP (2011). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins. *Integr Environ Assess Manag*. 7(4):513-41.
- CRC CARE (2017) Assessment, management and remediation guidance for perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) – Part 5: management and remediation of PFOS and PFOA, CRC CARE Technical Report no. 38, CRC for Contamination Assessment and Remediation of the Environment, Newcastle, Australia.
- Campbell TY, Vecitis CD, Mader BT, Hoffmann MR (2009). Perfluorinated surfactant chain-length effects on sonochemical kinetics. *J Phys Chem A*.10;113 (36):9834-42.
- Chen M, Wang Q, Shan G, Zhu L, Yang L, Liu M (2018). Occurrence, partitioning and bioaccumulation of emerging and legacy per- and polyfluoroalkyl substances in Taihu Lake, China. *Sci Total Environ*. 5;634: 251-259.
- Cordner A, Richter L, Brown P (2016) Can chemical class approaches replace chemical-by-chemical strategies? *Lessons from Environ Sci Technol* 50:12584-12591.
- Cordner A, Richter L, Brown P (2016). Can Chemical Class Approaches Replace Chemical-by-Chemical Strategies? *Lessons from Recent U.S. FDA Regulatory Action on Per- And Polyfluoroalkyl Substances*. *Environ Sci Technol*. 50 (23):12584-12591.
- Cordner A., De La Rosa V.Y., Schaidler L.A., Rudel R.A., Richter L., and Brown P. (2019). Guideline Levels for PFOA and PFOS in Drinking Water: The Role of Scientific Uncertainty, Risk Assessment Decisions, and Social Factors//*J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2019 March; 29(2): 157–171. doi:10.1038/s41370-018-0099-9.
- Cui Q, Pan Y, Zhang H, Sheng N, Dai J (2018). Elevated concentrations of perfluorohexanesulfonate and other per- and polyfluoroalkyl substances in Baiyangdian Lake (China): Source characterization and exposure assessment. *Environ Pollut*. 241:684-691.
- D'Agostino LA, Mabury SA (2017). Certain Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances Associated with Aqueous Film Forming Foam Are Widespread in Canadian Surface Waters. *Environ Sci Technol*. 5; 51 (23):13603-13613.
- D'Agostino LA and Mabury SA (2014). Identification of novel fluorinated surfactants in aqueous film forming foams and commercial surfactant concentrates. *Environ. Sci. Tech*. 48, 121-129.
- Dainippon (Dainippon Ink and Chemicals, Inc., Japan) (1988). Patent: N-(dihydroxypropyl) perfluoroalkanecarbonamide and –sulfonamide derivatives as antifogging agents. Patent No. JP63208561.
- Dainippon (Dainippon Ink and Chemicals, Inc., Japan) (1979). Patent: Prevention of mist formation over plating baths. Patent No. JP54076443.
- Danish Environmental Protection Agency (2015). Alternatives to perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in textiles. Available from: <https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2015/05/978-87-93352-16-2.pdf>.
- Denmark Lovtidene A. (20 June 2018). Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg. PFAS12 = (PFBS, PFHxS, PFOS, 6:2 FTS, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA and PFDA, PFOSA). Lovtidene A 30 of June 2018: https://www.foedevarestyrelsen.dk/SiteCollectionDocuments/Vejledninger/Fodervejledningen/Lovgivning/Drikkevandsbekendtgørelse%20C3%B8relsen_975_2018.pdf.

Denmark (2015). Miljø og fødevarerministeriet, Fødevarestyrelsen. Fluorerede stoffer i fødevareremateriale (FKM) af pap og papir. April 2018. (In Danish only). <https://www.foedevarestyrelsen.dk/SiteCollectionDocuments/Kemi%20og%20foedevarekvalitet/FKM/Notat-graensevaerdiforslag-for-fluorstoffer-i-papir-og-pap-embalage-FINAL.pdf>
<https://www.foedevarestyrelsen.dk/SiteCollectionDocuments/Kemi%20og%20foedevarekvalitet/FKM/Fakta%20ark%20fluorerede%20stoffer.pdf>.

Denmark, 2014. Miljøministeriet, Miljøstyrelsen. Miljøprojekt nr. 1600. Screeningsundersøgelse af udvalgte PFAS-forbindelser som jord- og grundvandsforurening i forbindelse med punktkilder. (In Danish only). Available at : <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2014/10/978-87-93178-96-0.pdf>.

D' Hollander W, Herzke D, Huber S, Hajslova J, Pulkrabova J, Brambilla G, De Filippis SP, Bervoets L, de Voogt P (2015). Occurrence of perfluorinated alkylated substances in cereals, salt, sweets and fruit items collected in four European countries. *Chemosphere* 129: 179–185.

ECHA (2019a). Registry of restriction intentions until outcome. Perfluorohexane-1-sulphonic acid, its salts and related substances. <https://echa.europa.eu/sv/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e1827f87da>.

ECHA (2019b). Annex XV report. Proposal for restriction of perfluorohexane-1-sulphonic acid, its salts and related substances. <https://echa.europa.eu/documents/10162/7722f470-1f29-8caa-c270-5149ad0df076>.

ECHA (2019c). ANNEX XV RESTRICTION REPORT. PROPOSAL FOR A RESTRICTION. Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS) including its salts and precursors. <https://echa.europa.eu/documents/10162/a22da803-0749-81d8-bc6d-ef551fc24e19>.

ECHA (2018). Registry of restriction intentions until outcome, RAC and SEAC opinion for C9-C14 PFCAs. Available at: <https://echa.europa.eu/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18195edb3>.

ECHA (2017a). Member state committee support document for the identification of perfluorohexane-1-sulphonic acid and its salts as substances of very high concern because of their vPvB (Article 57 E) properties. (<https://echa.europa.eu/documents/10162/40a82ea7-dcd2-5e6f-9bff-6504c7a226c5>). Last accessed 04 October 2017.

ECHA (2017b) Strategy to promote substitution to safer chemicals through innovation. https://echa.europa.eu/documents/10162/2792271/mb_58_2017_2_annex_strategy_substitution_safer_alternatives_en.pdf/d1c31c63-4047-e7be-75d1-12320a4a8489.

ECHA (2015). Committee for Risk Assessment (RAC) Committee for Socio-economic Analysis (SEAC) Opinion on an Annex XV dossier proposing restrictions on Perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related substances. Available at: <https://echa.europa.eu/documents/10162/d5edcc90-ac86-64ed-11c1-3daeb14fad89>.

ECHA. <https://echa.europa.eu/data-to-prevent-regrettable-substitution>.

ECHA CoRAP list. <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals/evaluation/community-rolling-action-plan/corap-table>.

EFSA 2012. European Food Safety Authority; Perfluoroalkylated substances in food: occurrence and dietary exposure. *EFSA Journal* 2012; 10(6):2743. (55 pp.) doi:10.2903/j.efsa.2012.2743. Available online: www.efsa.europa.eu/efsajournal.

Environment Canada (2013). Search Engine for the Results of DSL Categorization. Environment Canada, Gatineau, Quebec, Canada. (<http://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/default.asp?lang=En&n=5F213FA8-1&wsdoc=D031CB30-B31B-D54C-0E46-37E32D526A1F>). Last accessed 16 May 2017.

Eriksson U, Haglund P, Kärrman A (2017). Contribution of precursor compounds to the release of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) from waste water treatment plants (WWTPs). *J. Environ Sciences* 61: 80-90.

Ericson I, Domingo JL, Nadal M, Bigas E, Llebaria X, van Bavel B, Lindström G (2009). Levels of Perfluorinated Chemicals in Municipal Drinking Water from Catalonia, Spain: Public Health Implications. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 57(4):631-638.

Eurofeu, (2018). Presentation during POPRC-14: "Fire fighting Foam is needed to fight Flammable Liquid Fires in High Risk Applications.

Europe (2018). (http://ec.europa.eu/environment/water/water-drink/pdf/revised_drinking_water_directive_annex.pdf). RECAST (01.02.18): "The proposal is to regulate the group of PFASs, as defined by the OECD, and to suggest values of 0.1 µg/L for individual PFAS and 0.5 µg/L for

PFASs in total, as is done for pesticides. As these values are higher than those referred to in Sweden or the United States, it should be feasible to meet them https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8c5065b2-074f-11e8-b8f5-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF. http://ec.europa.eu/environment/water/water-drink/review_en.html.

EWG's Tap Water Database. <https://www.ewg.org/research/update-mapping-expanding-pfas-crisis>.

Favreau P, Poncioni-Rothlisberger C, Place BJ, Bouchex-Bellomie H, Weber A, Tremp J, Field JA, Kohler M (2017). Multianalyte profiling of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in liquid commercial products. *Chemosphere* 171: 491-501.

Food Standards Australia New Zealand 2016. Occurrence of perfluorooctane sulfonate (PFOS), perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorohexane sulfonate (PFHxS) in foods and water sampled from contaminated sites. [https://www.health.gov.au/internet/main/publishing.nsf/Content/2200FE086D480353CA2580C900817CDC/\\$File/Occurrence-data-report.pdf](https://www.health.gov.au/internet/main/publishing.nsf/Content/2200FE086D480353CA2580C900817CDC/$File/Occurrence-data-report.pdf).

FFFC (2017). Fact sheet on AFFF fire-fighting foam. https://docs.wixstatic.com/ugd/331cad_fa5766eb867b4a5080330ce96db195fa.pdf.

FFFC (2016). Fire Fighting Foam Coalition. Best Practice Guidance for Use of Class B Fire Fighting Foams. Available at: <https://fluorocouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/bestpracticeguidance.pdf>.

Fluorocouncil (2015). Fluorotechnology Is Critical to Modern Life: The FluoroCouncil Counterpoint to the Madrid Statement. *Environmental Health Perspectives*. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1509910>.

Fromme H, Wöckner M, Roscher E, Völkel W (2017). ADONA and perfluoroalkylated substances in plasma samples of German blood donors living in South Germany. *Int J Hyg Environ Health*. 220(2 Pt B):455-460. doi: 10.1016/j.ijheh.2016.12.014.

Fu J, Gao Y, Wang T, Liang Y, Zhang A, Wang Y, Jiang G (2015). Elevated levels of perfluoroalkyl acids in family members of occupational workers: the implication of dust transfer. *Sci. Rep.* 5, 9313.

Gebbink WA, van Asseldonk L, van Leeuwen SPJ (2017). Presence of Emerging Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in River and Drinking Water near a Fluorochemical Production Plant in the Netherlands. *Environ Sci Technol*. 51(19):11057-11065.

Gebbink WA, Glynn A, Darnerud PO, Berger U (2015). Perfluoroalkyl acids and their precursors in Swedish food: The relative importance of direct and indirect dietary exposure. *Environ Pollut*. 198:108-15.

Ghisi R, Vameralia T, Manzetti S (2019). Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAS) in agricultural plants: A review. *Environmental Research* 169 (2019) 326-341

Gao Y, Fu J, Cao H, Wang Y, Zhang A, Liang Y, Wang T, Zhao C, Jiang G (2015). Differential accumulation and elimination behavior of perfluoroalkyl Acid isomers in occupational workers in a manufactory in China. *Environ Sci Technol*. 49(11):6953-62.

Gobelius L, Hedlund J, Dürig W, Tröger R, Lilja K, Wiberg K, Ahrens L (2018). Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Swedish Groundwater and Surface Water: Implications for Environmental Quality Standards and Drinking Water Guidelines. *Environ. Sci. Technol*. 2018, 52, 4340-4349.

Gomis MI, Vestergren R, Borg D, Cousins IT (2018). Comparing the toxic potency in vivo of long-chain perfluoroalkyl acids and fluorinated alternatives. *Environ Int*. 113: 1-9.

Government of Canada, (2018). Drinking Water Screening Values: Perfluoroalkylated Substances. <https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/documents/services/publications/healthy-living/water-talk-drinking-water-screening-values-perfluoroalkylated-substances/water-talk-drinking-water-screening-values-perfluoroalkylated-substances-eng.pdf>.

Government of Canada. (2013). Second Report on Human Biomonitoring of Environmental Chemicals in Canada: Results of the Canadian Health Measures Survey Cycle 2 (2009-2011). <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/environmental-contaminants/second-report-human-biomonitoring-environmental-chemicals-canada-health-canada-2013.html>.

Gramstad T, Haszeldine RN (1957). 512. Perfluoroalkyl Derivatives of Sulphur. Part VI. Perfluoroalkanesulfonic Acids $CF_3 \cdot [CF_2]_n \cdot SO_3H$ ($n = 1-7$). *Journal of the Chemical Society*, 2640-2645. <https://doi.org/10.1039/JR9570002640>.

- Guelfo JL, Higgins CP (2013). Subsurface transport potential of perfluoroalkyl acids at aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted sites. *Environ Sci Technol.* 7;47(9):4164-71.
- Haines DA, Saravanabhavan G, Werry K, Khoury C (2017). An overview of human biomonitoring of environmental chemicals in the Canadian Health Measures Survey: 2007–2019. *Int J Hyg Environ Health.* 220: 13-28.
- Hamid H, Li LY, Grace JR (2018). Review of the fate and transformation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in landfills. *Environ Poll.* 235: 74-84.
- Herzke D, Huber S, Bervoets L, D' Hollander W, Hajslova J, Pulkrabova J, Brambilla G, De Filippis SP, Klenow S, Heinemeyer G (2013). Perfluorinated alkylated substances in vegetables collected in four European countries; occurrence and human exposure estimations. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 20: 7930–7939.
- Herzke D, Olsson E, Posner S (2012). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in consumer products in Norway - a pilot study. *Chemosphere.* 88: 980-987.
- Hengxin (Hubei Hengxin Chemical Co., Ltd) (2019). Products (HX-601, HX-168). http://www.fluoride-cn.com/product_en.html (last accessed: 2 January 2019).
- Hengxin (Hubei Hengxin Chemical Co., Ltd) (2015). Patent: Chromium fog inhibitor tetraethyl ammonium perfluorohexanesulfonate and its preparation method. Patent No. CN 104611733.
- Hill PJ, Taylor M, Goswami P, Blackburn RS (2017). Substitution of PFAS chemistry in outdoor apparel and the impact on repellency performance. *Chemosphere* 181:500-507.
- Hu XC, Andrews DQ, Lindstrom AB, Bruton TA, Schaidler LA, Grandjean P, Lohmann R, Carignan CC, Blum A, Balan SA, Higgins CP, Sunderland EM (2016). Detection of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in U.S. Drinking Water Linked to Industrial Sites, Military Fire Training Areas, and Wastewater Treatment Plants. *Environ Sci Technol Lett.* 3(10):344-350.
- Huang, J, Gang Y, Mei S (2015). PFOS in China: production, application & alternatives. <http://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW-SUBM-GUID-TGsPOPsWastes-PFOS-UNEPChemicals-RefJunHuangChina-201310.English.pdf&usg=AOvVaw19j7yN3fLiroc5gNmrnaKn> (last accessed: 4 February 2019) .
- H. Vermont (Health Vermont). <http://www.healthvermont.gov/environment/drinking-water/perfluoroalkyl-and-polyfluoroalkyl-substances-pfas-drinking-water>.
- IPEN, 2018. Fluorine-free firefighting foams (3F) viable alternatives to fluorinated aqueous film-forming foams (AFFF). <https://ipen.org/documents/fluorine-free-firefighting-foams>.
- IPEN Annex F information concerning Washington ban on PFAS in food-contact materials. <http://apps2.leg.wa.gov/billsummary?BillNumber=2658&Year=2017&BillNumber=2658&Year=2017>.
- Jiang, W, Zhang Y, Yang L, Chu X, Zhu L (2015). Perfluoroalkyl acids (PFAAs) with isomer analysis in the commercial PFOS and PFOA products in China. *Chemosphere*, 127, 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.01.049>.
- Kaboré HA, Vo Duy S, Munoz G, Méité L, Desrosiers M, Liu J, Sory TK, Sauvé S (2018). Worldwide drinking water occurrence and levels of newly-identified perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances. *Sci Total Environ.* 616-617: 1089-1100.
- Karolinska Institutet, Sweden. <http://ki.se/en/imm/health-related-environmental-monitoring-hami>.
- KemI (2018). <https://www.kemi.se/en/news-from-the-swedish-chemicals-agency/2018/the-swedish-chemicals-agency-is-introducing-a-requirement-to-report-pfass-to-the-products-register/>.
- KemI (2018b). PFASs in the action plan for a toxic-free everyday environment Report 7/18. Selected parts of report 6/17. <https://www.kemi.se/global/rapporter/2018/report-7-18-pfass-in-the-action-plan-for-a-toxic-free-everyday-environment.pdf>.
- KemI (2016). Förslag till nationella regler för högfluorerade ämnen i brandsläckningsskum (In Swedish only). Rapport 1/16. ISSN 0284-1185.
- KemI (2015). Chemical analysis of selected fire-fighting foams on the Swedish market 2014. PM 6/15.
- KemI (2014). <https://www.kemi.se/kemiska-amnen-och-material/hogfluorerade-amnen-pfas/pfas-natverk> (In Swedish only).

- Keutel K, Koch M (2016) Untersuchung fluortensidfreier Löschmittel und geeigneter Lösungsverfahren zur Bekämpfung von Bränden häufig verwendeter polarer (d. h. schaumzerstörender) Flüssigkeiten. 187, date: February 2016. Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge, Abteilung Forschung - Institut der Feuerwehr - Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer A.V.A.F., Katastrophenschutz und zivile Verteidigung. Available (in German only) at: <https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/forschung-idf/publikationen/>.
- Kim M, Li LY, Grace JR, Yue C (2015). Selecting reliable physicochemical properties of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) based on molecular descriptors. *Environ Pollut.* 196:462-72.
- Kosswig K (2000). Sulfonic Acids, Aliphatic. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 7th ed. (1999-2015). New York, NY: John Wiley & Sons. Online Posting Date: Jun 15, 2000.
- Kotthoff M and Bücking M (2018). Four chemical trends will shape the next decade's direction in perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substance research. *Front. Chem* 05 April. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00103>.
- Kotthoff M, Müller J, Jüriling H, Schlummer M, Fiedler D (2015). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in consumer products. *Environ Sci Pollut Res Int.* 22(19):14546-59.
- LASTFIRE (2018). New foam testing. *Hemmingfire, Industrial Fire Journal* 2018 Q3. Available at: https://issuu.com/hemminggroup/docs/ifj_q3_2018?e=29780894/64572047.
- Li Y, Fletcher T, Mucs D, Scott K, Lindh CH, Tallving P, Jakobsson K (2018). Half-lives of PFOS, PFHxS and PFOA after end of exposure to contaminated drinking water. *Occup Environ Med.* 75(1):46-51.
- Lin A Y-C, Panchangam SC, Ciou P-S (2010). High levels of perfluorochemicals in Taiwan's wastewater treatment plants and downstream rivers pose great risk to local aquatic ecosystems. *Chemosphere*, 80, 1167–1174.
- Lin A Y-C, Panchangam SC, Lo C-C (2009). The impact of semiconductor, electronics and optoelectronic industries on downstream perfluorinated chemical contamination in Taiwanese rivers. *Environmental Pollution* 157: 1365–1372.
- Liu Y, Zhang Y, Li J, Wu N, Li W, Niu Z. (2019). Distribution, partitioning behavior and positive matrix factorization-based source analysis of legacy and emerging polyfluorinated alkyl substances in the dissolved phase, surface sediment and suspended particulate matter around coastal areas of Bohai Bay, China. *Environ Pollut.* 246:34-44.
- Lofstedt Gilljam J, Leonel J, Cousins IT, Benskin JP (2016). Is Ongoing Sulfluramid Use in South America a Significant Source of Perfluorooctanesulfonate (PFOS)? Production Inventories, Environmental Fate, and Local Occurrence. *Environ. Sci. Technol.* 50, 653–659.
- Ma X, Shan G, Chen M, Zhao J, Zhu L (2018). Riverine inputs and source tracing of perfluoroalkyl substances (PFASs) in Taihu Lake, China. *Sci Total Environ.* 15; 612:18-25.
- Mass. Gov. <https://www.mass.gov/service-details/per-and-polyfluoroalkyl-substances-pfas-in-drinking-water>
- McCleaf P, Englund S, Ostlund A, Lindegren K, Wiberg K, Ahrenz L (2017). Removal efficiency of multiple poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water using granular activated carbon (GAC) and anion exchange (AE) column tests. *Water Research* 120: 77-87.
- MDH (Minnesota Department of Health). <http://www.health.state.mn.us/divs/eh/hazardous/topics/pfcshealth.pdf>.
- MIL-F-24385 is a U.S. Military Test Specification that critically tests AFFFs for both extinguishment and burnback in sea and potable (fresh) water: Available at: <https://www.firefightingfoam.com/knowledge-base/international-standards/mil-f-24385/>.
- Mak Y L, Taniyasu S, Yeung LWY, Lu G, Jin L, Lam PKS, Kannan K, Yamashita N (2009). Perfluorinated compounds in tap water in China and several other countries. *Environ. Sci. Technol.* 2009, 43, 4824–4829.
- Miteni. Perfluorinated derivatives <http://www.miteni.com/Products/perfluorinatedde.html> (accessed February 12, 2018).
- Naturvårdsverket, Sweden: <http://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Miljoovervakning/Miljoovervakning/Miljogiftssamordning/>.
- Naturvårdsverket, Sweden (2019) NATURVÅRDSVERKET RAPPORT 6871. Vägledning om att riskbedöma och åtgärda PFAS-föreningar inom förorenade områden. <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6871-4.pdf?pid=24088>. (In Swedish with English summary).

- NCM, Nordic Council of Ministers (2019). The cost of inaction: A socioeconomic analysis of environmental and health impacts linked to exposure to PFAS. TemaNord, ISSN 0908-6692; 2019:516. Available at: <http://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:1295959/FULLTEXT01.pdf>.
- Neumann M, Sättler D, Vierlke L, Schliebner I (2017). A proposal for criteria and an assessment procedure to identify Persistent, Mobile and Toxic (PM or PMT) substances registered under REACH, in Oral Presentation at the 16th EuCheMS International Conference on Chemistry and the Environment (ICCE) (Oslo).
- NICNAS (2017a). NICNAS IMAP Environment Tier II Assessment for Direct Precursors to Perfluoroheptanesulfonate (PFHpS), Perfluorohexanesulfonate (PFHxS) and Perfluoropentanesulfonate (PFPeS) <https://www.nicnas.gov.au/chemical-information/imap-assessments/imap-assessments/tier-ii-environment-assessments/direct-precursors-to-perfluoroheptanesulfonate-pfhps,-perfluorohexanesulfonate-pfhxs-and-perfluoropentanesulfonate-pfpes>.
- NICNAS (2017b). NICNAS IMAP HUMAN HEALTH TIER II ASSESSMENT FOR Perfluoroalkane sulfonates (PFSA) (C₅-C₇) and their direct precursors https://www.nicnas.gov.au/chemical-information/imap-assessments/imap-group-assessment-report?assessment_id=444.
- NICNAS (2017c). HUMAN HEALTH TIER II ASSESSMENT FOR Indirect precursors of perfluoroalkane sulfonic acids (PFSA) (C₅-C₇). https://www.nicnas.gov.au/chemical-information/imap-assessments/imap-group-assessment-report?assessment_id=1809.
- NICNAS (2017d). Environment Tier II Assessment for Indirect Precursors to Perfluoroalkyl Sulfonates <https://www.nicnas.gov.au/chemical-information/imap-assessments/imap-assessments/tier-ii-environment-assessments/indirect-precursors-to-perfluoroalkyl-sulfonates>.
- Noorlander CW, J. van Leeuwen SP, Dirk te Biesebeek J, Mengelers MJB, Zeilmaker MJ (2011). Levels of Perfluorinated Compounds in Food and Dietary Intake of PFOS and PFOA in The Netherlands. J. Agric. Food Chem. 2011, 59, 7496–7505.
- Norwegian Environment Agency (2017). Screening program 2017. Selected PBT compounds. Report M-806/2017 <http://www.miljodirektoratet.no/Documents/publikasjoner/M806/M806.pdf>.
- Norwegian Environment Agency (2018). Investigation of sources to PFHxS in the environment. Report M-961/2018 <http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/2018/Februar-2018/Investigation-of-sources-to-PFHxS-in-the-environment/>.
- OECD (2018). TOWARD A NEW COMPREHENSIVE GLOBAL DATABASE OF PER- AND POLYFLUOROALKYL SUBSTANCES (PFASs): SUMMARY REPORT ON UPDATING THE OECD 2007 LIST OF PER- AND POLYFLUOROALKYL SUBSTANCES (PFASs). ENV/JM/MONO(2018)7. [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO\(2018\)7&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO(2018)7&doclanguage=en).
- OECD (2015). Risk reduction approaches for PFASs a cross-country analysis. https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/Risk_Reduction_Approaches%20for%20PFASS.pdf.
- OECD (2013). OECD/UNEP Global PFC Group, Synthesis paper on per- and polyfluorinated chemicals (PFCs), Environment, Health and Safety, Environment Directorate, OECD. Available at: https://www.oecd.org/env/ehs/risk-management/PFC_FINAL-Web.pdf.
- Oosterhuis F, Brouwer R., Janssen M., Verhoeven J, Luttkhuizen C. (2017). Towards a proportionality assessment of risk reduction measures aimed at restricting the use of persistent and bioaccumulative substances, Integrated Environmental Assessment and Management banner, 13 (6) 1100-1112.
- Olsen GW, Burriss JM, Ehresman DJ, Froehlich JW, Seacat AM, Butenhoff JL, Zobel LR (2007). Half-life of serum elimination of perfluorooctanesulfonate, perfluorohexanesulfonate, and perfluorooctanoate in retired fluorochemical production workers. Environ Health Perspect. 115(9):1298-305.
- Pan Y, Zhang H, Cui Q, Sheng N, Yeung LWY, Sun Y, Guo Y, Dai J (2018). Worldwide Distribution of Novel Perfluoroether Carboxylic and Sulfonic Acids in Surface Water. Environ Sci Technol. 52(14):7621-7629.
- Park H, Choo G, Kim H, Oh JE (2018). Evaluation of the current contamination status of PFASs and OPFRs in South Korean tap water associated with its origin. Sci Total Environ. 1; 634:1505-1512.
- Patent US20080196908: <https://patents.google.com/patent/US20080196908>.
- Poulsen PB, Gram LK, AA Jenssen (2011). Substitution of PFOS for use in nondecorative hard chrome plating. Environmental Project No. 1371, Danish Ministry of Environment.

- Queensland Government, Australia (2018). Environmental Management of Firefighting Foam-Operational Policy. Updated 2 May 2018. <https://www.qld.gov.au/environment/pollution/management/disasters/investigation-pfas/operational-policy>.
- Queensland Gov., Australia (2016). Operational Policy 07 July 2016. Department of Environmental & Science www.DES.qld.gov.au ABN 46 640 294 485. Environmental Management of Firefighting Foam https://www.qld.gov.au/_data/assets/pdf_file/0025/68470/firefighting-foam-policy.pdf.
- Ramsden N, (2018). Large scale foam testing. Hemmingfire, Industrial Fire Journal 2018 Q3. Available at: https://issuu.com/hemminggroup/docs/ifj_q1_2018?e=29780894/59376615.
- Ramsden N, LASTFIRE (2017). The evolution of fire fighting foams. How did we get where we are today? Available at: <http://www.lastfire.co.uk/uploads/Foam%20Summit/1.%20Foam%20development.pdf>.
- REACH regulation. <https://echa.europa.eu/da/regulations/reach/legislation>.
- Ren, Xin. (2016). China - Reduction and Phase-out of Perfluorooctane Sulfonic Acid (PFOS) in Priority Sectors Project: environmental assessment: Environmental auditing report for Hubei Hengxin Chemical Co., Ltd (English). China: s.n. <http://documents.worldbank.org/curated/en/779711473149049019/Environmental-auditing-report-for-Hubei-Hengxin-Chemical-Co-Ltd>.
- Ritscher A, Wang Z, Scheringer M, Boucher JM, Ahrens L, Berger U, Bintein S, Bopp SK, Borg D, Buser AM, Cousins I, DeWitt J, Fletcher T, Green C, Herzke D, Higgins C, Huang J, Hung H, Thomas Knepper, Lau CS, Leinala E, Lindstrom AB, Liu J, Miller M, Ohno K, Perkola N, Shi Y, Haug LS, Trier X, Valsecchi S, van der Jagt K, Vierke L (2018). Zurich statement on future actions on per- and perfluoroalkyl substances (PFASs), *Environ Health Perspect* 126, <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/EHP4158>.
- Rotander A, Karrman A, Toms L-ML, Aylward L, Kay M, Mueller JF, Ramos MJG. (2015a). Novel fluorinated surfactants tentatively identified in firefighters using liquid chromatography quadrupole time-of-flight tandem mass spectrometry and case-control approach. *Environ. Sci. Technol.* 49, 2434-2442.
- Rotander A, Toms L-ML, Aylward L, Kay M, Mueller JF. (2015b). Elevated levels of PFOS and PFHxS in firefighters exposed to aqueous film forming foam (AFFF). *Environment International* 82, 28-34.
- RPA, (2019). Risk & Policy Analysts (RPA) and Arche Consulting. Socio-Economic assessment of PFHxS and PFHxS-related substances. Norwegian Environment Agency, M-1388/2019. Available at: <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2019/mai/socio-economic-assessment-of-pfhxs-and-pfhxs-related-substances/>.
- Schellenberger S, Gillgard P, Stare A, Hanning A, Levenstam O, Roos S, Cousins IT (2018). Facing the rain after the phase out: Performance evaluation of alternative fluorinated and non-fluorinated durable water repellents for outdoor fabrics. *Chemosphere* 193:675-684.
- Schellenberger S, Hill PJ, Levenstam O, Gillgard P, Cousins IT, Taylor M, Blackburn RS (2019). Highly fluorinated chemicals in functional textiles can be replaced by re-evaluating liquid repellency and end-user requirements. *Journal of Cleaner Production* 217: 134-143.
- Schröter-Kermani C, Müller J, Jüriling H, Schulte CCA (2013). Retrospective monitoring of perfluorocarboxylates and perfluorosulfonates in human plasma archived by the German Environmental Specimen Bank, *International journal of hygiene and environmental health.* 216: Nr.6, 633-640. DOI: 10.1016/j.ijheh.2012.08.004.
- Schoeters et al., (2018). Initial report on strategies adopted to align studies across Europe and preliminary results Deliverable Report D8.4 WP8 - Targeted field work surveys and alignment at EU level: accessible at: <https://www.hbm4eu.eu/deliverables/>.
- Schwarzenbach RP, Gschwend PM, Imboden DM. (2002). *Environmental Organic Chemistry*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-471-35750-6.
- SPIN (Substances in Preparations in Nordic Countries), 2018. <http://www.spin2000.net/spinmyphp/> (last accessed: 9 January 2018).
- Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Technical Paper on the Identification and Assessment of Alternatives to the Use of Perfluorooctane Sulfonic Acid in Open Applications. UNEP/POPS/POPRC.8/INF/17/Rev.1 (2012).
- Strynar M, Dagnino S, McMahan R, Liang S, Lindstrom A, Andersen E, McMillan L, Thurman M, Ferrer I, Ball C (2015). Identification of novel perfluoroalkyl ether carboxylic acids (PFECAs) and sulfonic acids (PFESAs) in

natural waters using accurate mass time-of-flight mass spectrometry (TOF-MS). *Environ. Sci. Technol.* 49, 11622-11630.

Sweden (2018). National Food Agency, Sweden. PFAS in drinkingwater and fish- risk management: https://www.livsmedelverket.se/en/food-and-content/oonskade-amnen/miljogifter/pfas-in-drinking-water-fish-risk-management?_t_id=1B2M2Y8AsgTpgAmY7PhCf%3d%3d&_t_q=pfas&_t_tags=language%3aen%2csiteid%3a67f9c486-281d-4765-ba72-ba3914739e3b&_t_ip=192.121.89.1&_t_hit.id=Livs_Common_Model_PageTypes_ArticlePage/_b02f793a-d9b8-4377-828e-105b4156bc5b_en&_t_hit.pos=1.

Tian Y, Yao Y, Chang S, Zhao Z, Zhao Y, Yuan X, Sun H (2018). Occurrence and phase distribution of neutral and ionizable per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the atmosphere and plant leaves around landfills: a case study in Tianjin, China. *Environ. Sci. Technol.* 52 (3), 1301–1310.

Trinkwasserkommission, Germany (2017). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/374/dokumente/fortschreibung_der_uba-pfc-bewertungen_bundesgesundheitsbl_2017-60_s_350-352.pdf.

Tyco Patent Application (2014). Perfluoroalkyl composition with reduced chain length, WO 2014144988 A2. Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2014144988A2/en>.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2019). General technical guidelines for the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants (POPs) under the Basel Convention UNEP/CHW.14/7. Tab 4.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2016). Consolidated guidance on alternatives to perfluorooctane sulfonic acid and its related chemicals. UNEP/POPS/POPRC.12/INF/15/Rev.1.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2017). Proposal to list perfluorohexane sulfonic acid (CAS No. 355-46-4, PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds in Annexes A, B and/or C to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.13/4.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2017). Decision POPRC-13/3: Perfluorohexane sulfonic acid (CAS No. 355-46-4, PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds, Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.13/3.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2017). Risk management evaluation on pentadecafluorooctanoic acid (CAS No. 335-67-1, PFOA, perfluorooctanoic acid), its salts and PFOA-related compounds, Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.13/7/Add.2.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Process for the evaluation of perfluorooctane sulfonic acid, its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride pursuant to paragraphs 5 and 6 of part III of Annex B to the Stockholm Convention. Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.14/4.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Additional information on perfluorohexane sulfonic acid (CAS No. 355-46-4, PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related compounds. Decision; UNEP/POPS/POPRC.14/2.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Evaluation of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS), its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride (PFOSF) pursuant to paragraphs 5 and 6 of part III of Annex B to the Stockholm Convention. Decision; UNEP/POPS/POPRC.14/3

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Draft report on the assessment of alternatives to perfluorooctane sulfonic acid, its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride. Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.14/INF/8.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Draft report on the assessment of alternatives to perfluorooctane sulfonic acid, its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride. Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.14/INF/8/Add.1

- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018) Draft risk profile for Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds, Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.14/6/Add.1.
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Addendum to the risk management evaluation on perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related compounds. Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.14/6/Add.2.
- UN Environment (2017a). Draft revised guidance for the inventory of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) and related chemicals listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. <http://chm.pops.int/Implementation/NationalImplementationPlans/GuidanceArchive/GuidancefortheinventoryofPFOS/tabid/3169/Default.aspx>.
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2017b). Guidance on best available techniques and best environmental practices for the use of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) and related chemicals listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants.
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2017c). Technical guidelines on the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with perfluorooctane sulfonic acid, its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride. <http://www.basel.int/Implementation/POPsWastes/TechnicalGuidelines/tabid/5052/Default.aspx>
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2007). Guidelines on best available techniques and provisional guidance on best environmental practices relevant to Article 5 and Annex C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants.
- UNIDO (2007). Non-combustion technologies for POPs destruction: Review and evaluation. United Nations Industrial Development Organization, eds Sergey Zinoviev, Paolo Fornasiero, Andrea Lodolo, Stanislav Miertus.
- U.S. Air Force (2017). AFFF disposals STTR. Available at: <https://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/1254657>.
- U.S. National Research Council (2014) A framework to guide selection of chemical alternatives, Committee on the Design and Evaluation of Safer Chemical Substitutions: A framework to inform government and industry decision; Board on Chemical Sciences and Technology; Board on Environmental Studies and Toxicology; Division on Earth and Life Studies, National Academies Press, 2014 Oct 29 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK253970/>.
- U.S. Congress (2018) An Act to provide protections for certain sports medicine professionals, to reauthorize Federal aviation programs, to improve aircraft safety certification processes, and for other purposes, HR302. <https://www.congress.gov/115/bills/hr302/BILLS-115hr302enr.pdf>
- United States Government (2007). Perfluoroalkyl Sulfonates; Significant New Use Rule. *Federal Register*, 72(194), pp 57222-57235.
- United States Government (2002). Perfluoroalkyl Sulfonates; Significant New Use Rule. *Federal Register*, 67(236), pp 72854-72867.
- U.S. EPA (2019). <https://www.epa.gov/pfas>.
- U.S. EPA (2017). The Third Unregulated Contaminant Monitoring Rule (UCMR 3): Data Summary, January 2017 <https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-02/documents/ucmr3-data-summary-january-2017.pdf>.
- U.S. EPA (2013). Perfluoroalkyl Sulfonates and Long-Chain Perfluoroalkyl Carboxylate Chemical Substances; Final Significant New Use Rule. Published on 22 October 2013. <https://www.federalregister.gov/documents/2013/10/22/2013-24651/perfluoroalkyl-sulfonates-and-long-chain-perfluoroalkyl-carboxylate-chemical-substances-final>.
- U.S. EPA (2009). Long-Chain Perfluorinated Chemicals (PFCs) Action Plan. United States Environmental Protection Agency, Washington DC, USA. Accessed 10 December 2014 at <http://www.epa.gov>.
- von der Trenck KT, Konietzka R, Biegel-Engler A, Brodsky J, Hädicke A, Quadflieg A, Stockerl R, and Stahl T (2018). Significance thresholds for the assessment of contaminated groundwater: perfluorinated and polyfluorinated chemicals. *Environmental Sciences Europe* 30(1):19.
- Wang Z, Boucher JM, Scheringer M, Cousins IT, Hungerbühler K (2017). Toward a Comprehensive Global Emission Inventory of C(4)-C(10) Perfluoroalkanesulfonic Acids (PFSAs) and Related Precursors: Focus on the Life Cycle of C(8)-Based Products and Ongoing Industrial Transition. *Environ Sci Technol*. 51(8):4482-4493.

Wang Z, MacLeod M, Cousins IT, Scheringer M, Hungerbuhler K (2011a). Using COSMOtherm to predict physicochemical properties of poly- and perfluorinated alkyl substances (PFASs). *Environ Chem* 8(4):389–98.

Wang N, Liu J, Buck RC, Korzeniowski SH, Wolstenholme BW, Folsom PW, Sulecki LM (2011b). 6:2 fluorotelomer sulfonate aerobic biotransformation in activated sludge of waste water treatment plants. *Chemosphere*.82(6):853-8.

Wen B, Li L, Zhang H, Mab Y, Shan X-Q, Zhang S (2014). Field study on the uptake and translocation of perfluoroalkyl acids (PFAAs) by wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in biosolids-amended soils. *Environmental Pollution*. 184: 547-554.

Winkens K, Vestergren R, Berger U, Cousins IT (2017). Early life exposure to per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs): A critical review. *Emerging Contaminants* 3; 55-68.

Xiao F, Hanson RA, Golovko SA, Golovko MY, Arnold WA (2018). PFOA and PFOS are generated from zwitterionic and cationic precursor compounds during water disinfection with chlorine or ozone. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 5, 382–388.

Yeung LWY, Stadey C, Mabury SA (2017). Simultaneous analysis of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances including ultrashort-chain C₂ and C₃ compounds in rain and river water samples by ultra performance convergence chromatography. *J Chromatogr A*. 1522:78-85.

Zafeiraki E, Costopoulou D, Vassiliadou I, Leondiadis L, Dassenakis E, Traag W, Hoogenboom RL, van Leeuwen SP (2015). Determination of perfluoroalkylated substances (PFASs) in drinking water from the Netherlands and Greece. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess* 32(12):2048-57.

Zhao S, Zhou T, Wang B, Zhub L, Chen M, Li D, Yang L (2018). Different biotransformation behaviors of perfluorooctane sulfonamidein wheat (*Triticum aestivum* L.) from earthworms (*Eisenia fetida*). *Journal of Hazardous Materials*. 346: 191–198.

Zhou J, Li Z, Guo X, Li Y, Wu Z, Zhu L (2019). Evidences for replacing legacy per- and polyfluoroalkyl substances with emerging ones in Fen and Wei River basins in central and western China. *J Hazard Mater.* 22;377: 78-87.

Zhou Z, Shi Y, Vestergren R, Wang T, Liang Y, Cai Y (2014). Highly elevated serum concentrations of perfluoroalkyl substances in fishery employees from Tangxun lake, china. *Environ Sci Technol.* 48(7):3864-74.