

中国土壤与地下水中全氟和多氟烷基化合物分布现状^{*}

朱清禾^{1,2} 钱佳浩¹ 杨 洁^{1,2#}

(1.上海市环境科学研究院,上海 200233;2.国家环境保护城市土壤污染控制与修复工程技术中心,上海 200233)

摘要 全氟和多氟烷基化合物(PFAS)是近年来备受关注的新污染物,在环境中被广泛检出,有害人类健康,然而目前中国土壤与地下水中的 PFAS 总体分布情况仍未明晰。通过公开发表的文献,比较了不同地区土壤和地下水中 PFAS 的浓度、组成与来源,探讨了 PFAS 空间分布特点,为全面了解中国土壤与地下水中 PFAS 分布状况提供依据。PFAS 在土壤与地下水中普遍存在,总体上呈现东部沿海地区高于西部地区的特点。工业区(尤其是氟化物制造工厂)等污染点源周边土壤与地下水中 PFAS 浓度较高。全氟辛酸(PFOA)和全氟辛烷磺酸(PFOS)是中国土壤与地下水中主要的 PFAS,但新型 PFAS(如全氟丁酸、全氟 2-甲基-3-氧杂己酸等)的检出率及浓度不断升高,其环境风险不容忽视。

关键词 全氟和多氟烷基化合物 土壤 地下水 分布特征

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.202306088

Current status of PFAS distribution in soil and groundwater across China ZHU Qinghe^{1,2}, QIAN Jiahao¹, YANG Jie^{1,2}. (1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233; 2. State Environmental Protection Engineering Center for Urban Soil Contamination Control and Remediation, Shanghai 200233)

Abstract: PFAS were emerging pollutants that have caused great attention in recent years. PFAS were widely detected in the environment and posed potential risk to human health. However, the nationwide distribution of PFAS in soil and groundwater remained unclear. Through published literatures, the concentration levels, component characteristics and the sources of PFAS in soil and groundwater were compared in different regions. The spatial distribution of PFAS were discussed. This work would provide insight into the status of PFAS in soil and groundwater across China. PFAS were pervasively existed in the soil and groundwater. In general, the PFAS level was higher in east China of coastal area than the west areas. The PFAS level around point sources, such as industrial area (especially the fluorochemical facilities) was higher than other areas. PFOA and PFOS were still dominant PFAS in the environment, while the content and detection frequency of novel PFAS (such as perfluorobutanoic acid, perfluoro(2-methyl-3-oxahexanoic acid, etc) was increasing, which could not be neglected.

Keywords: PFAS; soil; groundwater; distribution characteristics

全氟和多氟烷基化合物(PFAS)是碳氢链上的氢原子完全或部分被氟原子取代的一类化合物,具有优异的化学稳定性、疏水疏油特性,广泛应用于金属电镀、消防泡沫、皮革、润滑剂等工业生产及生活用品^[1]。PFAS 种类繁多,包括全氟羧酸(PFCAs)、全氟磺酸(PFSAs)、全氟醚羧酸(PFECAs)、氟调醇(FTOH)等,大部分 PFAS 毒性高,对人体神经、免疫、生殖等系统具有致癌性^[2]。由于 C—F 键能高且不易自然降解,PFAS 进入环境后会长期残留并扩散,对生态系统和人类健康产生危害,是近年来热门的新污染物^[3],已经在土壤、水体、空气、生物体等多种环境介质中检出^[4-5]。

多种 PFAS 通常在环境中共存。全氟辛酸(PFOA)和全氟辛烷磺酸(PFOS)是使用时间长、环境残留量较高的两种化合物^[6],已经被许多国家禁止生产和使用。然而,由于 PFAS 优良的物理化学性质以及扩张的工业生产需求^[7],PFOA、PFOS 的替代品不断地被研发,例如短链全氟化合物(全氟丁酸、全氟丁烷磺酸等)、PFECAs、氯代多氟化合物等,这些新型化合物给 PFAS 环境分布及生态风险的研究带来了新挑战。土壤与地下水既是 PFAS 重要的储存库,又是污染物多介质迁移的关键环节,PFAS 分布可直接影响到人类健康。

许多研究报道了我国土壤与地下水中 PFAS 赋

第一作者:朱清禾,女,1986 年生,博士,工程师,主要从事土壤与地下水污染防治研究。[#] 通讯作者。

^{*} 上海市环境科学研究院青年创新基金项目(No.CX2021140324)。

存特征,然而大部分只针对局部区域,全国范围内的 PFAS 分布状况尚不清晰。本研究通过文献总结我国土壤与地下水中 PFAS 分布状况,并对比不同用地类型下 PFAS 的含量、组分、污染物来源及空间分布特点,以期为全面了解中国土壤与地下水中 PFAS 分布状况提供依据。

1 中国土壤与地下水中常见 PFAS 信息

目前土壤与地下水中研究较多的 PFAS 种类罗列于表 1,除表中所列的化合物外,还包括相应的衍生盐类化合物。

2 中国土壤与地下水中 PFAS 的研究现状

2010 年以前,我国关于 PFAS 环境分布的研究多聚焦于地表水、生物体、血液等介质,土壤与地下

表 1 常见 PFAS 的信息
Table 1 Informations of common PFAS

类型	全称	缩写	分子式	CAS 编号	参考文献
PFCAs	三氟乙酸	TFA	C ₂ F ₃ HO ₂	76-05-1	[8]
	全氟丙酸	PFPrA	C ₃ F ₅ HO ₂	422-64-0	[8]
	全氟丁酸	PFBA	C ₄ F ₇ HO ₂	375-22-4	[8]
	全氟戊酸	PFPeA	C ₅ F ₉ HO ₂	2706-90-3	[8]
	全氟己酸	PFHxA	C ₆ F ₁₁ HO ₂	307-24-4	[8]
	全氟庚酸	PFHpA	C ₇ F ₁₃ HO ₂	375-85-9	[8]
	全氟辛酸	PFOA	C ₈ F ₁₅ HO ₂	335-67-1	[8]
	全氟壬酸	PFNA	C ₉ F ₁₇ HO ₂	375-95-1	[8]
	全氟癸酸	PFDA	C ₁₀ F ₁₉ HO ₂	335-76-2	[8]
	全氟十一酸	PFUnDA	C ₁₁ F ₂₁ HO ₂	2058-94-8	[8]
	全氟十二酸	PFDoDA	C ₁₂ F ₂₃ HO ₂	307-55-1	[8]
	全氟十三酸	PFTriDA	C ₁₃ F ₂₅ HO ₂	72629-94-8	[8]
	全氟十四酸	PFTeDA	C ₁₄ F ₂₇ HO ₂	376-6-7	[9]
	全氟十六酸	PFHxDA	C ₁₆ F ₃₁ HO ₂	67905-19-5	[9]
	全氟十八酸	PFOcDA	C ₁₈ F ₃₅ HO ₂	16517-11-6	[9]
PFSA _s	全氟丁烷磺酸	PFBS	C ₄ F ₉ HSO ₃	375-73-5	[8]
	全氟己烷磺酸	PFHxS	C ₆ F ₁₃ HSO ₃	3871-99-6	[8]
	全氟庚烷磺酸	PFHpS	C ₇ F ₁₇ HSO ₃	375-92-8	[10]
	全氟辛烷磺酸	PFOS	C ₈ F ₁₇ HSO ₃	1763-23-1	[10]
	全氟癸烷磺酸	PFDS	C ₁₀ F ₂₁ HSO ₃	335-77-3	[10]
	全氟丁基乙基磺酸钠	4 : 2 FTS	C ₆ H ₆ F ₉ SO ₃ Na	27619-93-8	[10]
	全氟己基乙基磺酸	6 : 2 FTS	C ₈ H ₅ F ₁₃ SO ₃	27619-97-2	[10]
PFECAs	1H,1H,2H,2H-全氟癸磺酸	8 : 2 FTS	C ₁₀ H ₅ F ₁₇ SO ₃	39108-34-4	[10]
	1H,1H,2H,2H-全氟十二烷磺酸	10 : 2 FTS	C ₁₂ H ₅ F ₂₁ SO ₃	120226-60-0	[10]
	全氟(2-甲基-3-氧杂己酸)	HFPO-DA	C ₆ F ₁₁ HO ₃	13252-13-6	[9]
	六氟环丙氧烷三聚酸	HFPO-TA	C ₉ F ₁₇ HO ₄	13252-14-7	[11]
多氟醚磺酸	4,8-二氧杂环乙烷-3H-全氟壬酸	ADONA	C ₇ F ₁₃ HO ₄	958445-44-8	[11]
	6 : 2 氯代多氟醚磺酸	6 : 2 Cl-PFESA	C ₈ F ₁₆ SO ₄ HCl	73606-19-6	[11]
	8 : 2 氯代多氟醚磺酸	8 : 2 Cl-PFESA	C ₁₀ F ₂₀ SO ₄ HCl	83329-89-9	[11]
全氟/多氟磺酰类化合物	全氟辛基磺酰胺	FOSA	C ₈ H ₂ F ₁₇ NO ₂ S	754-91-6	[12]
	N-甲基-全氟辛基磺酰胺	N-MeFOSA	C ₉ H ₄ F ₁₇ NO ₂ S	31506-32-8	[12]
	N-乙基-全氟辛基磺酰胺	N-EtFOSA	C ₁₀ H ₆ F ₁₇ NO ₂ S	4151-50-2	[12]
	N-甲基-全氟辛烷磺酰基乙醇	N-MeFOSE	C ₁₁ H ₈ F ₁₇ NO ₃ S	24448-09-7	[12]
	N-乙基-全氟辛烷磺酰基乙醇	N-EtFOSE	C ₁₂ H ₁₀ F ₁₇ NO ₃ S	1691-99-2	[12]
	1H,1H,2H,2H-全氟-1-辛醇	6 : 2 FTOH	C ₈ H ₅ F ₁₃ O	647-42-7	[13]
FTOH	1H,1H,2H,2H-全氟-1-癸醇	8 : 2 FTOH	C ₁₀ H ₅ F ₁₇ O	678-39-7	[13]
	1H,1H,2H,2H-全氟十二醇	10 : 2 FTOH	C ₁₂ H ₅ F ₂₁ O	865-86-1	[13]
全氟磷酸	双(全氟己基)亚磷酸钠	6 : 6 PFPi	C ₁₂ F ₂₆ O ₂ PNa	40143-77-9	[10]
	全氟己基-辛基亚磷酸钠	6 : 8 PFPi	C ₁₄ F ₃₀ O ₂ PNa	610800-34-5	[10]
	双(全氟辛基)亚磷酸钠	8 : 8 PFPi	C ₁₆ F ₃₄ O ₂ PNa	40143-79-1	[10]
	双[2-(全氟己基)乙基]磷酸钠	6 : 2 diPAP	C ₁₆ H ₈ F ₂₆ O ₄ PNa	57677-95-9	[10]
	双[2-(全氟辛基)乙基]磷酸	8 : 2 diPAP	C ₂₀ H ₉ F ₃₄ O ₄ P	678-41-1	[10]

水中 PFAS 分布的报道相对较少,因此本研究重点关注 2010 年以后的相关文献。已发表的调查土壤与地下水中 PFAS 的文献分别为 63、32 篇,整体上随时间呈上升趋势,且土壤中 PFAS 的研究报道整体上高于地下水中(见图 1)。

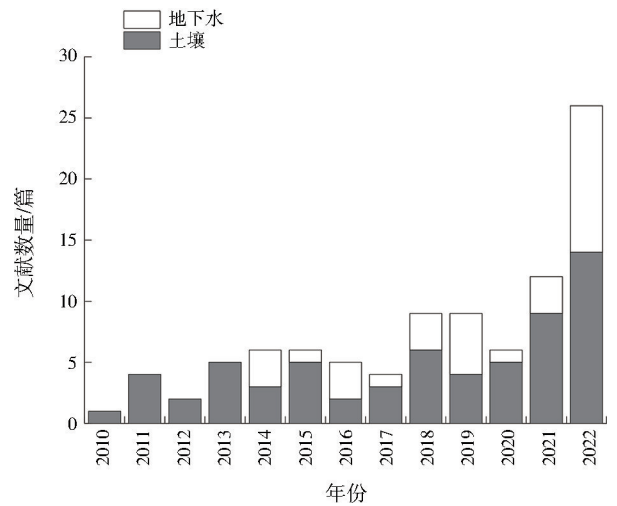


图 1 中国不同年份研究土壤与地下水中 PFAS 分布状况的文献数量统计

Fig.1 Statistics of the number of publications investigating the distribution of PFAS in soil and groundwater in different years in China

我国 PFAS 分布研究热点省份是江苏省、山东省、天津市、辽宁省、广东省和河北省,其中江苏省和山东省的研究最多。

我国部分地区(附近无污染源)土壤与地下水中 PFAS 的研究结果如表 2 所示。在附近无污染源的情况下,我国东、西部地区土壤中 PFAS 含量无明显规律性;地下水中 PFAS 的研究多集中于东部沿海地区,其中广东省地下水中 PFAS 含量最高。

3 不同用地类型下土壤与地下水中 PFAS 的分布状况

为了分析 PFAS 排放源或人体暴露风险,许多研究往往区分用地类型探讨土壤与地下水中 PFAS 分布,如工业区、垃圾填埋场、农田、居民区、森林等。其中工业区、垃圾填埋场是潜在的 PFAS 排放源,农田、居民区等用地类型内 PFAS 的人体暴露风险较高。

3.1 工业区

氟化物制造工厂(FMF)是重要的 PFAS 生产、使用及排放源。目前针对工业区的 PFAS 分布状况调查,大部分围绕 FMF 开展(见表 3),已报道的 FMF 周边土壤 PFAS 最高质量浓度达 4.89 g/kg (位于福建省),其中 PFOS 为 475 mg/kg,达到美国环境保护署(EPA)建议的土壤筛选值(1.6 mg/kg)的近 300 倍,该 FMF 周边土壤中 PFAS 含量远高于湖北省、山东省、江苏省以及辽宁省等省份。福建省某 FMF 周边地下水中 PFAS 也最高(3.10 mg/L),

表 2 中国部分地区 PFAS 分布¹⁾
 Table 2 Distribution of PFAS in some regions of China

地区	年份	PFAS 种类	介质	PFAS 范围	PFAS 平均值	参考文献
北京市	2013	18	地下水	n.d.~119.4 ng/L	37.60 ng/L	[12]
天津市	2015	13	土壤	1.25~10.62 μg/kg	3.55 μg/kg	[14]
天津市	2019	12	土壤	4.60~63.85 μg/kg	9.73 μg/kg	[15]
天津市	2013	12	地下水	0.32~8.3 ng/L	2.40 ng/L	[16]
广州市	2009	2	土壤	0.09~1.02 μg/kg	0.36 μg/kg	[17]
深圳市	2009	2	土壤	0.11~2.58 μg/kg	0.83 μg/kg	[17]
东莞市	2009	2	土壤	0.19~1.96 μg/kg	0.86 μg/kg	[17]
珠海市	2009	2	土壤	0.09~2.45 μg/kg	0.50 μg/kg	[17]
茅洲河流域(广东省)	2018	18	地下水	9.90~592.2 ng/L	144.8 ng/L	[18]
青藏高原东北部(青海省)	2019—2020	12	土壤	0.043~1.57 μg/kg	0.40 μg/kg	[19]
西藏自治区南部	2020	26	土壤	0.81~4.51 μg/kg	2.05 μg/kg	[20]
江苏省	2016	16	地下水	2.69~556 ng/L	43.1 ng/L	[21]
南昌市、九江市等	2016	22	地下水	1.27~381 ng/L	47.6 ng/L	[22]
晋江流域(福建省)	2020	2	地下水	0.26~23.1 ng/L	6.25 ng/L	[23]
淮河流域(安徽省)	2008	16	土壤	n.d.~1.22 μg/kg	0.50 μg/kg	[24]
合肥市、蚌埠市等	2013	15	土壤	1.15~5.89 μg/kg	2.69 μg/kg	[25]
德州市、济南市等	2017	12	土壤	4.23~48.7 μg/kg	13.30 μg/kg	[26]
德州市、滨州市等	2015	13	土壤	0.05~13.97 μg/kg	0.93 μg/kg	[14]
丹东市、锦州市等	2015	13	土壤	n.d.~1.81 μg/kg	0.64 μg/kg	[14]
唐山市、秦皇岛市	2015	13	土壤	n.d.~0.39 μg/kg	0.19 μg/kg	[14]

注: ¹⁾ n.d.为未检出,表 5 同。

表 3 FMF 周围土壤与地下水中 PFAS 分布
Table 3 Distribution of PFAS in soil and groundwater around FMF

地区	年份	介质	PFAS 种类	PFAS 范围	PFAS 平均值	参考文献
南平市	2021	土壤	18	357~4.89×10 ⁶ μg/kg	1.02×10 ⁵ μg/kg	[27]
南平市	2021	地下水	18	1.98×10 ⁴ ~3.10×10 ⁶ ng/L	9.90×10 ⁵ ng/L	[27]
武汉市	2015	土壤	13	1.30~913 μg/kg	65.0 μg/kg	[28]
武汉市	2015	地下水	13	30.0~1.56×10 ⁴ ng/L	2.44×10 ³ ng/L	[28]
武汉市	2010	土壤	9	0.68~189 μg/kg	22.6 μg/kg	[29]
淄博市	2018	土壤	18	4.40~189 μg/kg	39.2 μg/kg	[30]
淄博市	2014	土壤	12	1.86~641 μg/kg	66.0 μg/kg	[31]
淄博市	2014	土壤	12	2.09~200 μg/kg	64.6 μg/kg	[32]
淄博市	2019	地下水	18	10~6.52×10 ³ ng/L		[33]
淄博市	2014	地下水	12	2.09~2.73×10 ⁵ ng/L	2.72×10 ⁴ ng/L	[34]
苏州市	2022	土壤	17	5.93~123 μg/kg	31.2 μg/kg	[35]
苏州市	2012	土壤	35	2.09~33.4 μg/kg	8.82 μg/kg	[36]
苏州市	2012	土壤	14	0.75~28.8 μg/kg	7.17 μg/kg	[37]
苏州市	2017	地下水	17	18.6~1.46×10 ³ ng/L	290 ng/L	[38]
苏州市	2015	地下水	11	4.80~614 ng/L	250 ng/L	[39]
阜新市	2016	土壤	25	2.40~240 μg/kg	49.70 μg/kg	[13]
阜新市	2019	地下水	18	72~6.81×10 ⁴ ng/L	9.10×10 ³ ng/L	[40]
阜新市	2017	地下水	10	216~2.67×10 ⁴ ng/L	1.35×10 ⁴ ng/L	[41]

表 4 其他工业区周围土壤中 PFAS 分布
Table 4 Distribution of PFAS in soil around other industrial areas

地区	年份	介质	工业类型	PFAS 种类	PFAS 范围/ (μg/kg)	PFAS 平均值/ (μg/kg)	参考文献
深圳市	2013	土壤	电镀	14	14~400	82	[42]
深圳市	2013	土壤	电子	14	4.0~89	33	[42]
深圳市	2013	土壤	塑胶	14	11~18	15	[42]
深圳市	2013	土壤	涂料	14	11~16	14	[42]
深圳市	2012	土壤		14	2.7~98	35	[43]
东莞市	2017	土壤	电镀	16	1.71~16.3		[44]
天津市	2021	土壤	油田	26	2.57~32.3	14.3	[45]
天津市	2008	土壤	混合工业区	12	1.3~11	3.61	[46]
江苏省某地	2018	土壤	化工企业(石油、农药等)	12	30~216		[47]
上海市	2021	土壤	化工企业	18	0.68~108	8.01	[9]
上海市	2021	土壤	电镀	18	1.67~28.9	8.46	[9]
德阳市	2018	土壤	混合工业(农药、炼钢等)	11	0.19~1.85	0.83	[48]
宁波市	2021	土壤			3.09~25.4	11.4	[49]

江苏省某 FMF 周边地下水中 PFAS 含量最低。

除了 FMF 之外,纺织、电镀等行业也会使用 PFAS 作为添加剂,造成周边土壤中 PFAS 的累积(见表 4)。总体而言,其他工业区(非 FMF)周边土壤中的 PFAS 含量低于 FMF 工业区。

3.2 垃圾填埋场

除工业区外,垃圾填埋场是土壤与地下水中 PFAS 的另一重要潜在来源,据估计我国垃圾填埋场每年向周围环境中释放约 3 110 kg 的 PFAS^{[50],[51]23}。ZHANG 等^{[52]3835}分析北京市垃圾填埋场的渗滤液发现,其中包含的 PFAS 主要为 PFHxA、PFHpA、PFOA 和 PFOS,质量浓度分别为 876~2 830、408~1 025、1 211~4 658、0~76 ng/L;YAN 等^{[51]24-25}调查了上海市、常州市、南京

市、苏州市和广州市 5 个垃圾填埋场的渗滤液,14 种 PFAS 总量为 7.28~292 μg/L。杭州市垃圾填埋场周边土壤与地下水中的 PFAS 分别为 5.31~108 μg/kg、17.3~163 ng/L^{[53]1,[54]};而宁波市垃圾填埋场周边土壤中 PFAS 为 16.6~19.6 μg/kg,甚至高于工业区土壤中的 PFAS 含量^{[49]4};上海市垃圾填埋场周边表层土壤中 PFAS 为 0.64~11.9 μg/kg^{[9]4}。尽管垃圾渗滤液中 PFAS 含量较高,但经生物降解、反渗透等技术处理后,PFAS 去除率可以达到 43.3%~99.4%^{[52]3836},能够有效降低渗滤液中 PFAS 含量,减少因渗滤液直接排放而造成周边环境的 PFAS 污染。

3.3 居民区

从全国范围看,我国居民区土壤 21 种 PFAS 质

量浓度为 0.24~13.56 $\mu\text{g/kg}$ ^{[55]1},与北美、欧洲等地区土壤中 PFAS 浓度相当,但高于越南等地区^[56]。具体而言,在东部沿海地区,浙江省宁波市居民区土壤中 PFAS 为 0.76~13.37 $\mu\text{g/kg}$ (平均值 6.9 $\mu\text{g/kg}$)^{[49]4};安徽省居民区土壤中 PFAS 为 1.15~5.89 $\mu\text{g/kg}$ (平均值 2.69 $\mu\text{g/kg}$)^[25];江苏省土壤中 PFAS 为 6.59~8.27 $\mu\text{g/kg}$ (平均值 7.27 $\mu\text{g/kg}$)^[57],地下水中 PFAS 为 2.69~556 ng/L ^[21]。华北地区天津市与潍坊市等地居民区的土壤中 PFAS 为 0.27~5.35 $\mu\text{g/kg}$ (平均值 1.93 $\mu\text{g/kg}$),地下水中 PFAS 最高达到 100 ng/L ^[58];珠江三角洲地区居民区土壤中 PFAS 为 2.19~98.5 $\mu\text{g/kg}$ (平均值 5.97 $\mu\text{g/kg}$)^[59]。PFAS 分布与地区城市化进程及工业发展密切相关^[14],东部沿海地区居民区土壤与地下水 PFAS 含量相对比较高^{[55]1},尤其当居民区靠近工业区时,会增加人体暴露风险^[40],应当引起特别关注。

3.4 农 田

农田土壤与地下水中的PFAS会通过食物链

进入人体^[60],从而影响人体健康。农田土壤与地下水中 PFAS 分布见表 5。

总体而言,农田土壤与地下水中 PFAS 浓度低于工业区、垃圾填埋场等场地。部分地区(如淄博市、苏州市和上海市)的农田土壤或地下水中检出了高浓度 PFAS,一方面由于这些研究采样区毗邻 FMF、工业区或处于工业密集型的城市,可能存在工业源污水排放进入农田,或者使用受污染的地下水灌溉的情况^[39],从而导致农田土壤检出高浓度 PFAS;另一方面,目标 PFAS 的选择也影响 PFAS 总量,例如 LI 等^[8]报道的上海地区农田土壤中 PFAS(141~225 $\mu\text{g/kg}$)远高于其他地区农田,该研究中分析的 PFAS 含三氟乙酸(TFA),并且 TFA 占比达 80.8%~89.4%,而其他大部分的调查报告中不包含 TFA,目前对于土壤与地下水中待测 PFAS 种类尚无统一的标准。

田间试验表明,农作物对 PFAS 具有较强的生物积累能力。农田土壤中 PFAS 的迁移过程复杂,土壤理化性质(如pH、孔隙率、有机质等)、微生物

表 5 农田土壤与地下水中 PFAS 分布
 Table 5 Distribution of PFAS in farmland soil and groundwater

地区	年份	介质	PFAS 种类	PFAS 范围	PFAS 平均值	参考文献
上海市	2021	土壤	18	3.21~14.5 $\mu\text{g/kg}$	6.52 $\mu\text{g/kg}$	[9]
上海市	2008	土壤	14	141~225 $\mu\text{g/kg}$	178 $\mu\text{g/kg}$	[8]
盐城市、扬州市等	2014	土壤	17	0.33~17.0 $\mu\text{g/kg}$	2.73 $\mu\text{g/kg}$	[61]
苏州市	2015	土壤	11	0.6~14.1 $\mu\text{g/kg}$	3.91 $\mu\text{g/kg}$	[39]
盐城市、扬州市等	2014	地下水	17	n.d.~614 ng/L	89.4 ng/L	[61]
苏州市	2015	地下水	11	4.8~525 ng/L	180 ng/L	[39]
泰安市	2014	土壤	17	0.64~0.97 $\mu\text{g/kg}$	0.78 $\mu\text{g/kg}$	[61]
泰安市	2014	地下水	17	n.d.~4.20 ng/L	1.06 ng/L	[61]
聊城市	2014	土壤	17	0.9~1.59 $\mu\text{g/kg}$	1.15 $\mu\text{g/kg}$	[61]
聊城市	2014	地下水	17	n.d.~1.2 ng/L	0.32 ng/L	[61]
潍坊市	2014	土壤	21	0.57~4.00 $\mu\text{g/kg}$	1.70 $\mu\text{g/kg}$	[62]
淄博市	2016	土壤	12	8.81~1 641 $\mu\text{g/kg}$	224.7 $\mu\text{g/kg}$	[63]
沈阳市	2014	土壤	21	0.30~4.89 $\mu\text{g/kg}$	1.09 $\mu\text{g/kg}$	[62]
辽东湾地区	2008	土壤	22	n.d.~1.82 $\mu\text{g/kg}$	0.48 $\mu\text{g/kg}$	[64]
宁波市	2018	土壤	9	0.63~25.6 $\mu\text{g/kg}$	11.0 $\mu\text{g/kg}$	[49]
天津市	2014	土壤	17	2.03~8.76 $\mu\text{g/kg}$	5.40 $\mu\text{g/kg}$	[61]
天津市	2021	地下水	11	0.32~8.29 ng/L	2.02 ng/L	[65]
天津市	2014	地下水	17	n.d.~0.5 ng/L	0.18 ng/L	[61]
天津市	2013	地下水	11	0.32~8.3 ng/L	2.4 ng/L	[16]
北京市	2008	土壤	12	0.13~8.50 $\mu\text{g/kg}$	0.65 $\mu\text{g/kg}$	[66]
泸州市	2019	土壤	21	0.026~3.64 $\mu\text{g/kg}$	1.60 $\mu\text{g/kg}$	[67]
成都市等	2014	土壤	21	0.094~0.69 $\mu\text{g/kg}$	0.22 $\mu\text{g/kg}$	[62]
曲靖市	2015	土壤	11	0.30~1.00 $\mu\text{g/kg}$	0.39 $\mu\text{g/kg}$	[68]
河套灌区	2019	土壤	22	0.29~0.59 $\mu\text{g/kg}$	0.36 $\mu\text{g/kg}$	[69]
河套灌区	2019	地下水	22	2~77 ng/L	24 ng/L	[69]
都安瑶族自治县	2014—2016	地下水	10	0.07~1.92 ng/L	1.0 ng/L	[70]
佛山市	2016	土壤	11	0.29~19.0 $\mu\text{g/kg}$	5.72 $\mu\text{g/kg}$	[71]
广州市	2016	土壤	11	0.44~5.52 $\mu\text{g/kg}$	2.35 $\mu\text{g/kg}$	[71]

活性及群落结构等会随着田间管理措施(施肥、灌溉等)发生变化,进而影响农作物对于 PFAS 的富集以及 PFAS 在土壤中吸附与迁移的过程。

3.5 森林

森林一般远离人类活动的区域,受人类生产及生活的直接影响较小,森林土壤中 PFAS 的含量远低于工业区、居民区等区域。WANG 等^[72]调查我国 54 个天然森林土壤中 PFAS 发现质量浓度为 0~9.08 ng/kg。在人造的三北防护林土壤中,PFAS 为 263~707 ng/kg^[73],高于天然的森林土壤,但仍属于 ng/kg 级别。相比于天然森林,三北防护林可能受周边人类活动影响更多。PFAS 的远距离传输以及大气沉降可能是森林土壤中污染物的主要来源,附近的城市或工业区产生 PFAS 进入空气,随着气溶胶而迁移至森林生态系统。另外,森林中偶尔发生火灾,PFAS 作为灭火剂的重要成份,也会造成森林局部区域的 PFAS 高浓度并扩散。

4 土壤与地下水中 PFAS 的分布特征

4.1 空间分布特点

综合已报道的我国土壤与地下水中 PFAS 分布情况,污染物总体呈现由东部沿海向西部递减趋势,总体呈现为华东地区>东北地区>华南地区>华北地区>西南地区>西北地区(见图 2),华东地区土壤中的 PFAS 含量水平处于全国高位,上海市、山东省、江苏省等地 PFAS 的检出率及含量较高,东北地区、华南地区、华北地区、西南地区、西北地区土壤中 PFAS 含量逐渐降低。华东、华南与华北地区不仅有大型的工业聚集地,而且存在超大型城市、特大型城市;西南和西北地区土壤与地下水中 PFAS 含量较低,与该地区工业发展相对滞后的社会发展情况相一致。目前关于华中地区(湖北省、湖

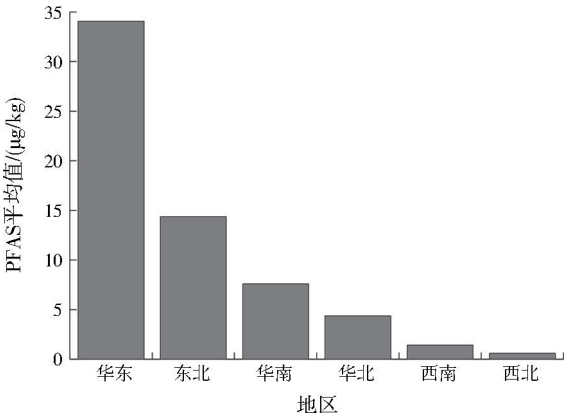


图 2 中国各地区土壤中 PFAS 分布

Fig.2 The distribution of PFAS in soil in China

南省、河南省)的 PFAS 调查文献只获取了武汉市某 FMF 周边土壤与地下水 PFAS 平均含量数据,难以代表华中地区,因此暂未列入统计。PFAS 主要分布在工业区等潜在污染源周边,呈点源污染的特点。

4.2 PFAS 组成与特征污染物浅析

由于土壤与地下水中往往多种 PFAS 共存,不同种类的 PFAS 应用场景以及土壤/地下水迁移过程各异,因此解析环境中 PFAS 的组成是了解污染物分布、分辨特征污染物、深化对 PFAS 分布的认识的有力工具。

我国土壤与地下水中 PFAS 仍然以 PFOA 与 PFOS 为主^[32,44,46],工业区、居民区、垃圾填埋场、农田等典型场地中 PFOA 与 PFOS 的检出率可高达 100%。近些年来,PFBA、HFPO-DA、ADONA 和 6:2 Cl-PFESA 等新型化合物不断地被开发与应用,用于替代 PFOA、PFOS 等传统全氟烷基化合物,导致这些新型 PFAS 不断出现在土壤与地下水中且含量呈上升趋势^[19]。

由于不同结构 PFAS 性质存在差异,各化合物应用的场景或领域也有所区别,研究者通过 PFAS 污染物浓度、检出率以及主成分分析等手段分辨污染源周边的特征污染物:长链 PFCAs 在工业区土壤中的浓度较高,推测长链 PFCAs 可能是工业区的特征污染物^{[9]5};赵亮等^[42]分析认为 PFOS 是五金电镀行业的特征污染物,塑胶和涂料行业的特征污染物是 PFOS、PFOA 以及长链的全氟烷基化合物;垃圾填埋场的特征污染物可能是短链 PFCAs^{[53]1},而 HFPO-DA、6:2 Cl-PFESA 和 6:2 FTS 等新型 PFAS 可能也是垃圾填埋场周边 PFAS 特征污染物;居民区的土壤中仍以 PFOA 与 PFOS 为主要的 PFAS,短链 PFSA 检出率较低;农田土壤中 PFAS 的特征污染物则随地理空间变化较大,有研究认为 PFOA、PFOS 是农田土壤中的主要成分,CHEN 等^[61]和 WANG 等^[74]分析认为 PFUnDA 是辽东湾和东部农田土壤 PFAS 的特征污染物,天津市农田土壤中 PFAS 则以 PFDA 为代表^[62];森林土壤中则仍以 PFOA 等传统全氟烷基化合物为主。

4.3 PFAS 分布与污染源距离的关系

一般而言,PFAS 浓度随着与污染源的距离增大呈指数或对数下降趋势。据报道,工业区周边土壤样品 PFAS 浓度比背景土壤样品浓度高 2~3 个数量级^[29],污染源影响范围可以达 25 km 以

上^{[47]784},但 PFAS 浓度在距离污染源 2~3 km 范围内显著降低,距离污染源 4 km 以上时,PFAS 含量基本趋于稳定^[28,35]。短链化合物亲水性强,易进入深层土壤或地下水,因此随着与污染源距离增加,土壤中短链 PFAS 浓度更容易降低^{[47]785}。PFAS 在土壤与地下水中的迁移距离还受主导风向、地下水流向以及干湿沉降等综合因素影响,在污染源的下风向处及地下水的下游方向,污染物含量通常更高。

4.4 PFAS 在土壤与地下水中的垂直分布情况

大部分 PFAS 在土壤与地下水中的浓度分布都随深度的增加而降低^[75],然而 PFCAs 前体化合物在土壤中的分布则可能随土壤或地下水深度的增加而升高。除了 PFAS 在土壤中的迁移过程外,前体化合物中可能包含易分解的-CH₂-基团,在浅层土壤中能够被氧化或微生物降解,而在深层土壤或地下水的缺氧环境中,微生物活性受到抑制,前体化合物不易被转化而含量更高^[11]。中长链 PFAS 因其疏水性强,易残留在表层或者浅层土壤中^[48];短链 PFAS 经淋溶过程向深层土壤迁移,当地下水埋深较浅时,短链 PFAS 直接进入地下水^[76]。可见,以短链 PFAS 替代传统的 PFOA 及 PFOS,可能造成地下水 PFAS 污染风险升高,其生态风险不容忽视。

5 结 语

PFAS 在我国分布广泛,全国土壤与地下水中均已检出多种 PFAS,就全国范围而言,呈现出华东地区>东北地区>华南地区>华北地区>西南地区>西北地区,与区域的城市化水平及工业发展密切相关。我国大部分土壤与地下水中 PFAS 处于 μg/kg 及 ng/L 级别,然而工业区附近土壤与地下水中 PFAS 浓度较高,尤其是 FMF 附近。目前 PFOA 与 PFOS 仍是我国土壤与地下水中的主要 PFAS,新型 PFAS 在环境中的检出率及含量上升,PFAS 在环境中的生态风险面临着新的挑战。

我国目前尚未颁布针对土壤与地下水 PFAS 的相关标准,研究中分析的 PFAS 种类、提取及分析方法会存在一定的差异。国内对消防训练场、机场等潜在 PFAS 污染场地中污染物分布情况仍然研究不足。加强对重点行业周边土壤与地下水中 PFAS 的调查、建立统一的化合物及分析方法,对于深入了解我国 PFAS 的分布状况、建立环境 PFAS 安全限值具有重要的意义。

参考文献:

[1] TAKAGI S, ADACHI F, MIYANO K, et al. Fate of perfluorooctanesulfonate and perfluorooctanoate in drinking water treatment processes[J]. *Water Research*, 2011, 45(13): 3925-3932.
 [2] LESCORD G L, KIDD K A, DE SILVA A O, et al. Perfluorinated and polyfluorinated compounds in lake food webs from the Canadian High Arctic[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(5): 2694-2702.
 [3] LIU S, LU Y, XIE S, et al. Exploring the fate, transport and risk of perfluorooctane sulfonate (PFOS) in a coastal region of China using a multimedia model[J]. *Environment International*, 2015, 85: 15-26.
 [4] POST G B, LOUIS J B, LIPPINCOTT R L, et al. Occurrence of perfluorinated compounds in raw water from New Jersey public drinking water systems [J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(23): 13266-13275.
 [5] SHARMA B M, BHARAT G K, TAYAL S, et al. Perfluoroalkyl substances (PFAS) in river and ground/drinking water of the Ganges River basin: emissions and implications for human exposure[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 208: 704-713.
 [6] WANG T, WANG P, MENG J, et al. A review of sources, multimedia distribution and health risks of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in China[J]. *Chemosphere*, 2015, 129: 87-99.
 [7] LI L, ZHAI Z, LIU J, et al. Estimating industrial and domestic environmental releases of perfluorooctanoic acid and its salts in China from 2004 to 2012[J]. *Chemosphere*, 2015, 129: 100-109.
 [8] LI F, ZHANG C, QU Y, et al. Quantitative characterization of short- and long-chain perfluorinated acids in solid matrices in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(3): 617-623.
 [9] ZHU Q, QIAN J, HUANG S, et al. Occurrence, distribution, and input pathways of per- and polyfluoroalkyl substances in soils near different sources in Shanghai[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 308.
 [10] LI J, PENG G, XU X, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in groundwater from a contaminated site in the North China Plain: occurrence, source apportionment, and health assessment[J]. *Chemosphere*, 2022, 302: 134873.
 [11] ZHOU J, LI S, LIANG X, et al. First report on the sources, vertical distribution and human health risks of legacy and novel per- and polyfluoroalkyl substances in groundwater from the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 404: 124134.
 [12] 高杰,李文超,李广贺,等.北京部分地区地下水中全氟化合物的污染水平初探[J]. *生态毒理学报*, 2016, 11(2): 355-363.
 [13] CHEN H, YAO Y, ZHAO Z, et al. Multimedia distribution and transfer of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) surrounding two fluorochemical manufacturing facilities in Fuxin, China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 52(15): 8263-8271.
 [14] MENG J, WANG T, WANG P, et al. Are levels of perfluoroalkyl substances in soil related to urbanization in rapidly developing coastal areas in North China? [J]. *Environmental Pollution*, 2015, 199: 102-109.
 [15] 武倩倩,吴强,宋帅,等.天津市主要河流和土壤全氟化合物空间分布、来源及风险评价[J]. *环境科学*, 2021, 42(8): 3682-

- 3694.
- [16] QI Y J, HUO S L, HU S B, et al. Identification, characterization, and human health risk assessment of perfluorinated compounds in groundwater from a suburb of Tianjin, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 432.
 - [17] 胡国成, 郑海, 张丽娟, 等. 珠江三角洲土壤中全氟化合物污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(增刊 1): 37-42.
 - [18] LI B B, HU L X, YANG Y Y, et al. Contamination profiles and health risks of PFASs in groundwater of the Maozhou River basin [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 113996.
 - [19] 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 等. 青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, 43(6): 3253-3261.
 - [20] ZHOU J, ZHAO G Q, LI M, et al. Three-dimensional spatial distribution of legacy and novel poly/perfluoroalkyl substances in the Tibetan Plateau soil: implications for transport and sources [J]. *Environment International*, 2022, 158: 107007.
 - [21] WEI C, WANG Q, SONG X, et al. Distribution, source identification and health risk assessment of PFASs and two PFOS alternatives in groundwater from non-industrial areas [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 152: 141-150.
 - [22] WANG Q, SONG X, WEI C, et al. Distribution, source identification and health risk assessment of PFASs in groundwater from Jiangxi Province, China [J]. *Chemosphere*, 2022, 291: 132946.
 - [23] LI Y, LIU Y, SHI G, et al. Occurrence and risk assessment of perfluorooctanoate (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) in surface water, groundwater and sediments of the Jin River Basin, Southeastern China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2022, 108: 1026-1032.
 - [24] 孟晶, 王铁宇, 王佩, 等. 淮河流域土壤中全氟化合物的空间分布及组成特征[J]. *环境科学*, 2013, 34(8): 3188-3194.
 - [25] 李法松, 倪卉, 黄涵宇, 等. 安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2017, 38(1): 327-332.
 - [26] ZHANG G, PAN Z, WU Y, et al. Distribution of perfluorinated compounds in surface water and soil in partial areas of Shandong Province, China [J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2019, 28(5): 502-512.
 - [27] JIA X, LI X T, ZHOU L F, et al. Variations of the level, profile, and distribution of PFAS around POSF manufacturing facilities in China: an overlooked source of PFCA [J]. *Environmental Science and Technology*, 2023, 57(13): 5264-5274.
 - [28] GAO Y, LIANG Y, GAO K, et al. Levels, spatial distribution and isomer profiles of perfluoroalkyl acids in soil, groundwater and tap water around a manufactory in China [J]. *Chemosphere*, 2019, 227: 305-314.
 - [29] WANG Y, FU J, WANG T, et al. Distribution of perfluorooctane sulfonate and other perfluorochemicals in the ambient environment around a manufacturing facility in China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(21): 8062-8067.
 - [30] XIE L N, WANG X C, DONG X J, et al. Concentration, spatial distribution, and health risk assessment of PFASs in serum of teenagers, tap water and soil near a Chinese fluorochemical industrial plant [J]. *Environment International*, 2021, 146: 106166.
 - [31] LIU Z Y, LU Y L, SHI Y J, et al. Crop bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl acids through multi-media transport from a mega fluorochemical industrial park, China [J]. *Environment International*, 2017, 106: 37-47.
 - [32] LIU Z Y, LU Y L, SONG X, et al. Multiple crop bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl substances around a mega fluorochemical industrial park, China: implication for planting optimization and food safety [J]. *Environment International*, 2019, 127: 671-684.
 - [33] FENG X M, YI S J, SHAN G Q, et al. Occurrence of perfluoroalkyl substances in the environment compartments near a mega fluorochemical industry: implication of specific behaviors and emission estimation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 445: 130473.
 - [34] LIU Z, LU Y, WANG T, et al. Risk assessment and source identification of perfluoroalkyl acids in surface and ground water: spatial distribution around a mega-fluorochemical industrial park, China [J]. *Environment International*, 2016, 91: 69-77.
 - [35] LIU Z, XU C, JOHNSON A C, et al. Source apportionment and crop bioaccumulation of perfluoroalkyl acids and novel alternatives in an industrial-intensive region with fluorochemical production, China: health implications for human exposure [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 127019.
 - [36] JIN H, ZHANG Y, ZHU L, et al. Isomer profiles of perfluoroalkyl substances in water and soil surrounding a Chinese fluorochemical manufacturing park [J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(8): 4946-4954.
 - [37] SHAN G, WEI M, ZHU L, et al. Concentration profiles and spatial distribution of perfluoroalkyl substances in an industrial center with condensed fluorochemical facilities [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 490: 351-359.
 - [38] LIU Z, XU C, JOHNSON A C, et al. Exploring the source, migration and environmental risk of perfluoroalkyl acids and novel alternatives in groundwater beneath fluorochemical industries along the Yangtze River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 827: 154413.
 - [39] LU G H, JIAO X C, PIAO H T, et al. The Extent of the impact of a fluorochemical industrial park in eastern China on adjacent rural areas [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, 74(3): 484-491.
 - [40] TANG J, ZHU Y L, LI Y, et al. Occurrence characteristics and health risk assessment of per- and polyfluoroalkyl substances from water in residential areas around fluorine chemical industrial areas, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 60733-60743.
 - [41] BAO J, YU W J, LIU Y, et al. Perfluoroalkyl substances in groundwater and home-produced vegetables and eggs around a fluorochemical industrial park in China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 171: 199-205.
 - [42] 赵亮, 张鸿, 郑正, 等. 深圳市典型行业全氟化合物特征污染指纹 [J]. *深圳大学学报*, 2014, 31(5): 537-543.
 - [43] 张鸿, 赵亮, 何龙, 等. 不同功能区表层土中全氟化合物污染指纹及其来源解析 [J]. *环境科学*, 2014, 35(7): 2698-2704.
 - [44] NA S T, HAI R T, WANG X H, et al. Trends and levels of perfluorinated compounds in soil and sediment surrounding a cluster of metal plating industries [J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2021, 30(4): 423-435.
 - [45] MENG Y, YAO Y, CHEN H, et al. Legacy and emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in Dagang Oilfield: multimedia distribution and contributions of unknown precursors [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 412: 125177.

[46] WANG T, LU Y, CHEN C, et al. Perfluorinated compounds in a coastal industrial area of Tianjin, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2012, 34(3): 301-311.

[47] 丁达, 宋昕, 刘朝阳, 等. 某化工园区周边土壤中传统和新兴全氟化合物的赋存特征及潜在来源[J]. *土壤*, 2021, 53(4).

[48] GAN C D, PENG M Y, LIU H B, et al. Concentration and distribution of metals, total fluorine, per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) in vertical soil profiles in industrialized areas[J]. *Chemosphere*, 2022, 302: 134855.

[49] TANG L, LIU X, YANG G, et al. Spatial distribution, sources and risk assessment of perfluoroalkyl substances in surface soils of a representative densely urbanized and industrialized city of China[J]. *Catena*, 2021, 198.

[50] 陈典, 张照荷, 赵微, 等. 北京市再生水灌区地下水中典型全氟化合物的分布现状及生态风险[J]. *岩矿测试*, 2022, 41(3): 499-510.

[51] YAN H, COUSINS I T, ZHANG C, et al. Perfluoroalkyl acids in municipal landfill leachates from China: occurrence, fate during leachate treatment and potential impact on groundwater[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 524/525.

[52] ZHANG C H, PENG Y, NIU X M, et al. Determination of perfluoroalkyl substances in municipal landfill leachates from Beijing, China[J]. *Asian Journal of Chemistry*, 2014, 26(13).

[53] XU C, LIU Z, SONG X, et al. Legacy and emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in multi-media around a landfill in China: implications for the usage of PFASs alternatives[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751.

[54] XU C, SONG X, LIU Z, et al. Occurrence, source apportionment, plant bioaccumulation and human exposure of legacy and emerging per- and polyfluoroalkyl substances in soil and plant leaves near a landfill in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 776: 145731.

[55] LI J, HE J, NIU Z, et al. Legacy per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) and alternatives (short-chain analogues, F-53B, GenX and FC-98) in residential soils of China: present implications of replacing legacy PFASs[J]. *Environment International*, 2020, 135.

[56] RANKIN K, MABURY S A, JENKINS T M, et al. A North American and global survey of perfluoroalkyl substances in surface soils: distribution patterns and mode of occurrence[J]. *Chemosphere*, 2016, 161: 333-341.

[57] MENG J, WANG T, SONG S, et al. Tracing perfluoroalkyl substances (PFASs) in soils along the urbanizing coastal area of Bohai and Yellow Seas, China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 404-412.

[58] MA D, ZHONG H, LV J, et al. Level, distributions, and sources of legacy and novel per- and perfluoroalkyl substances (PFAS) in the topsoil of Tianjin, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 112: 71-81.

[59] LIU B, ZHANG H, YU Y, et al. Perfluorinated compounds (PFCs) in soil of the Pearl River Delta, China: spatial distribution, sources, and ecological risk assessment[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, 78(2): 182-189.

[60] LAN Z, YAO Y, XU J, et al. Novel and legacy per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in a farmland environment: soil distribution and biomonitoring with plant leaves and locusts[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263: 114487.

[61] CHEN S, JIAO X C, GAI N, et al. Perfluorinated compounds in soil, surface water, and groundwater from rural areas in eastern China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 211: 124-131.

[62] ZHANG Y W, TAN D F, GENG Y, et al. Perfluorinated compounds in greenhouse and open agricultural producing areas of three provinces of China: levels, sources and risk assessment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(12): 1224.

[63] 薛建芳. 氟化工园区周边农田中全氟化合物的动态变化[D]. 太原: 山西大学, 2018.

[64] WANG P, WANG T, GIESY J P, et al. Perfluorinated compounds in soils from Liaodong Bay with concentrated fluorine industry parks in China[J]. *Chemosphere*, 2013, 91(6): 751-757.

[65] WANG X W, ZHANG H W, HE X S, et al. Contamination of per- and polyfluoroalkyl substances in the water source from a typical agricultural area in North China[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 10: 1071134.

[66] WANG T, CHEN C, NAILE J E, et al. Perfluorinated compounds in water, sediment and soil from Guanting Reservoir, China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, 87(1): 74-79.

[67] 樊芮君, 甘淳丹, 杨金燕. 地氟病区农田土壤中全氟化合物的组成及污染特征研究[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(9): 1177-1182.

[68] 黄楚珊, 马鹏程, 王小娇, 等. 云南省会泽县农田土壤中全氟化合物污染特征研究[J]. *生态毒理学报*, 2017, 12(6): 233-241.

[69] MAO R Y, LU Y L, ZHANG M, et al. Distribution of legacy and novel per- and polyfluoroalkyl substances in surface and groundwater affected by irrigation in an arid region[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159693.

[70] QIAO X C, JIAO L X, ZHANG X X, et al. Contamination profiles and risk assessment of per- and polyfluoroalkyl substances in groundwater in China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192: 76.

[71] 孙腾飞. 广州、佛山工业区周边土壤及蔬菜中全氟化合物的污染特征[D]. 广州: 暨南大学, 2017.

[72] WANG Q, ZHAO Z, RUAN Y, et al. Occurrence and distribution of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) in natural forest soils: a nationwide study in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 596-602.

[73] WANG Q, RUAN Y, ZHAO Z, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the Three-North Shelter Forest in northern China: first survey on the effects of forests on the behavior of PFAS[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 427: 128157.

[74] WANG T, LU Y, CHEN C, et al. Perfluorinated compounds in estuarine and coastal areas of north Bohai Sea, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8): 1905-1914.

[75] BRUSSEAU M L, ANDERSON R H, GUO B. PFAS concentrations in soils: background levels versus contaminated sites[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140017.

[76] 兰仲惠, 周萌, 姚义鸣, 等. 全氟烷基酸类在土壤中的吸附解吸及淋溶行为研究[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9): 1884-1894.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2023-06-17)