

银川市土壤中 PFAS 的赋存特征与健康风险研究

邢思洋 刘邓超*

宁夏大学地理科学与规划学院

DOI:10.32629/eep.v9i6.3252

[摘要] 全氟/多氟烷基化合物(PFAS)是一类典型的持久性有机污染物,目前针对我国西北沙戈荒区域土壤中PFAS污染的研究较为薄弱。本研究以宁夏银川市典型沙戈荒生态脆弱区土壤为研究对象,确定其中PFAS的含量、组成和空间分布特征,结合比值法、相关性分析开展污染源解析,并利用CSOIL模型评估土壤中PFAS对成人与儿童的健康暴露风险。结果表明,研究区土壤中PFAS的总浓度为0.935~11.523 ng/g,6:2 FTS为主要化合物;3#、7#、11#采样点的PFAS浓度相对较高。源解析结果显示区域污染以大气湿沉降为主,同时受到附近道路交通、养殖等人为活动的影响。健康风险评估结果表明,研究区土壤中PFAS对周边居民的整体健康风险较低,但人群尤其是儿童对PFOA的暴露情况需要重点关注。本研究可为西北生态脆弱区PFAS污染防控提供理论依据与数据支撑。

[关键词] 全氟/多氟烷基化合物;土壤;赋存特征;源解析;健康风险评估

中图分类号: Q938.1+3 **文献标识码:** A

Occurrence Characteristics and Health Risks of PFAS in Soils of Yinchuan

Siyang Xing Dengchao Liu*

School of Geography and Planning, Ningxia University

[Abstract] Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are typical persistent organic pollutants, and relevant studies on PFAS contamination in soils of sandy, gobi and wilderness areas across northwest China are still scarce. In this study, surface soils collected from typical ecologically fragile sandy, gobi and wilderness areas in Yinchuan, Ningxia, were selected to investigate the concentration, composition and spatial distribution of PFAS. The ratio method and correlation analysis were applied for pollution source apportionment, while the CSOIL model was used to evaluate the health exposure risks of soil PFAS to adults and children. The results showed that the total PFAS concentrations in the study area ranged from 0.935 to 11.523 ng/g, with 6:2 FTS as the predominant compound and relatively high PFAS levels observed at sampling sites 3#, 7# and 11#. Source analysis indicated that PFAS pollution mainly originated from atmospheric wet deposition, and was additionally impacted by surrounding anthropogenic activities including road traffic and livestock breeding. Health risk assessment suggested that soil PFAS posed low overall health risks to local residents. However, exposure to PFOA requires close attention, particularly for children. This study provides theoretical support and basic data for the prevention and control of PFAS pollution in ecologically fragile areas of northwest China.

[Key words] per- and polyfluoroalkyl substances; soil; occurrence characteristics; source apportionment; health risk assessment

根据世界经合组织的定义,全氟/多氟烷基化合物(per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS)是指碳链中含有至少一个全氟化的甲基或者亚甲基的有机化合物^[1]。由于具有独特而优良的化学性质,PFAS被广泛应用于电镀、消防泡沫、造纸等多个领域,因此广泛存在于环境之中并可能对人类和生态环境造成长期影响^[2]。

土壤是PFAS污染重要的汇,研究人员已针对土壤中PFAS的

赋存特征展开了多项研究。Dalahmeh等调查了乌干达首都坎帕拉市土壤中的PFAS污染情况,发现其总浓度为1.7~7.9 ng/g dw(干重),PFOS为主要的污染物类型^[2]。针对中国31个省市自治区共352个土壤样本中PFAS浓度的研究结果表明,东部沿海地区土壤中的PFAS浓度明显高于内陆地区^[3]。通过对上海市不同功能区土壤中PFAS浓度的测定,研究人员发现消防站和工业生产(尤其是废物处理)是土壤中PFAS的主要来源^[4]。然而,

针对中国西北地区，尤其是沙戈荒区域土壤中PFAS污染情况的研究相对较少。因此，本研究以中国西北宁夏典型“沙戈荒”区域为研究对象，探究其土壤中PFAS的赋存特征、可能的来源及生态环境风险情况，为国家和地区新污染物治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及采样点设置

本研究选取宁夏银川市灵武市某沙戈荒区域作为研究区。该区域位于银川市东南部，整体地势开阔平坦，荒漠与丘陵地貌分布广泛；气候干燥、降雨稀少、蒸发强烈、大风频发。该区域内植被覆盖度较低，人烟稀少，受人类日常活动干扰相对较弱，但生态环境较为脆弱，是典型的“沙戈荒”生态脆弱区。本研究采用网格布点法共布设11个采样点，具体采样点信息如表1所示。采样前，使用甲醇提前冲洗所用工具和器皿，且全程避免使用含氟材料，防止对样品造成污染。采样过程中，采集0~20 cm深度的表层土壤，去除石块、植物根茎等杂质后保存于PP袋中，运输至实验后于阴凉处避光保存。

表1 采样点信息

采样点编号	经度	纬度
1	106.51119498	37.72903023
2	106.56538836	37.74030005
3	106.63898766	37.73839792
4	106.73047530	37.72503945
5	106.59205678	37.66584771
6	106.67128076	37.67127871
7	106.73739379	37.69326758
8	106.61417051	37.63254881
9	106.70995165	37.64347081
10	106.66182745	37.61360860
11	106.65713243	37.57126003

1.2 土壤样本的预处理与样品分析

为了准备测定土壤样本中的PFAS浓度，需要对其进行预处理，具体步骤如下：称取2 g过筛后的土壤样本，置于50 mL的PP离心管中，加入5 ng同位素标记内标。向混合物中加入8 mL甲醇后，将离心管于1000 r/min下涡旋振荡1 min，再超声提取30 min。

超声提取结束后，将样品以3500 r/min转速离心5 min，上清液转移至500 mLPP瓶中。以上萃取操作共进行3次，合并全部上清液并稀释至500 mL以进行固相萃取。进行固相萃取前，首先使用甲醇10 mL、10 mmol/L的乙酸铵溶液10 mL对萃取小柱进行活化。随后以3~5 mL/min的流速上样，完成后使用甲醇2 mL淋洗小柱，再通氮气吹干5 min。最后使用0.1%的氯化甲醇5 mL洗脱，收集洗脱液，氮吹浓缩后定容至1 mL，再加入5 ng仪器内标，低温保存于进样小瓶中。

1.3 源解析与健康风险评价

本研究采用相关性分析对土壤中PFAS的可能来源进行分析，具体方法细节与之前的研究相似^[5]。使用CSOIL模型计算了人体经多种途径从土壤摄入PFAS的潜在健康风险，其暴露途径包括经作物摄入的饮食暴露(EDI_{intake})，以及土壤经口腔(EDI_{oral})、皮肤接触(EDI_{dermal})、土壤颗粒经呼吸摄入($EDI_{particle}$)等的非饮食暴露，其摄入量具体计算公式如下^[6]：

$$EDI_{intake} = \frac{C_{soil} \times BAF \times IRF}{BW} \quad (1)$$

式中： C_{soil} 为土壤中PFAS的浓度(ng/kg)；BAF为PFAS从土壤向蔬菜、粮食等作物转移的生物富集因子；IRF为居民每日食用该区域种植的蔬菜、粮食等作物的摄入量(kg/d)；BW为居民的体重(kg)。

$$EDI_{oral} = \frac{C_{soil} \times IRS}{BW} \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中：IRS为土壤经口腔的日摄入速率(mg/d)。

$$EDI_{dermal} = \frac{C_{soil} \times SA \times AF \times ABS}{BW} \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中：SA为皮肤暴露面积(cm^2)；AF为土壤皮肤附着率(mg/cm^2)；ABS为土壤中污染物经皮肤的吸收系数。

$$EDI_{particle} = \frac{C_{soil} \times I_{hR}}{PEF \times BW} \quad (4)$$

式中： I_{hR} 为呼吸速率(m^3/d)；PEF为颗粒排放因子(m^3/kg)。

最后，可以通过式(5)计算出每日估计总摄入量 EDI_{total} (ng/($\text{kg}_{bw} \cdot \text{day}$))：

$$EDI = EDI_{intake} + EDI_{oral} + EDI_{dermal} + EDI_{particle} \quad (5)$$

以上所用相关参数及取值如表2所示。

2 结果与讨论

2.1 土壤中PFAS的赋存特征与空间分布

从检测结果可以看出，研究区所有采样点均检测到了PFAS物质，检出的化合物种类为22种，其检出率介于9%~100%之间。其中，6:2氟调聚磺酸(6:2 fluorotelomersulfonic acid, 6:2 FTS)在所有采样点均有检出，是研究区最主要的PFAS物质；而全氟己酸(Perfluorohexanoic acid, PFHxA)、全氟壬酸(Perfluorononanoic Acid, PFNA)、全氟辛酸(Perfluorooctanoic acid, PFOA)的检出率也均高于55%。其余PFAS化合物的检出率相对较低，均小于45%。

表2 计算摄入风险的主要相关参数及取值^[6]

参数名称	取值	
	儿童	成人
IRF	0.30	0.73
BW	25.0	60.6
IRS	30	10
SA	2800	5700
AF	0.2	0.07
ABS	0.1	0.1
IhR	9.9	15.7
PEF	1.36×10^9	1.36×10^9

表3 不同地区土壤中PFAS的检出情况

国家	地区	检出 PFAS 种类	PFAS 浓度(ng/g)	参考文献
中国	上海	PFOA, PFOS, PFNA	0.11~18	[1]
乌干达	坎帕拉	PFOS, PFOA, PFHxA	1.7~7.9	[2]
中国	全国	PFOA, PFNA, PFDA, 4:2 FTS, 9Cl-PF3ONS	0.074~24.88	[3]
中国	上海	PFOA, PFOS, PFBA	0.64~294	[4]
中国	东营	PFOA, PFOS, PFBA, PFDA, OBS	1.38~22.5	[4]
中国	石家庄	OBS, PFOS, PFOA	0.59~7.25	[5]
中国	湖北	PFBS, PFOS, PFHxA	$882 \sim 2.82 \times 10^5$	[6]
中国	深圳	PFBS, PFOS, PFHxA	0.6~60.6	[9]
中国	天津	PFOA, PFHpA, 6:2 Cl-PFESA	0.21~5.35	[10]
中国	某电镀企业周边	PFOS, PFOA	1.6~15.4	[11]
中国	银川市	6:2 FTS, PFHxA, PFNA, PFOA	0.935~11.523	本研究

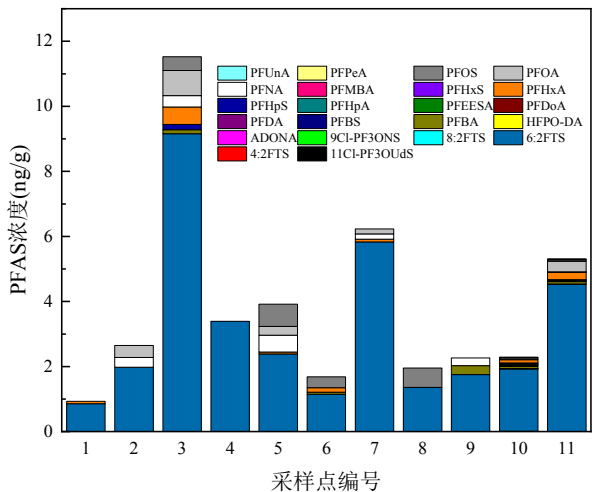


图1 土壤中PFAS的浓度与组成

研究区土壤中PFAS的浓度和组成情况如图1所示。不同采样点土壤中PFAS的总浓度 Σ_{22} PFAS介于0.935~11.523 ng/g之间，平均浓度为3.832 ng/g。与国内外不同地区的研究结果相比(表3)，银川市土壤中的PFAS以6:2 FTS为主，表明研究区PFAS的主要来源与其他地区明显不同；浓度方面，银川市土壤中PFAS的浓度略高于乌干达坎帕拉的湿地、石家庄市和天津市的城区土壤，明显低于上海、东营、深圳和某电镀企业周边的土壤，比湖北省某电解氟化工厂周边土壤中PFAS的浓度低了1~4个数量级。

由污染物种类上来看，银川市土壤中的PFAS以6:2 FTS为主，不仅检出率达到了100%，且浓度为0.855~9.158 ng/g，约占各采样点PFAS总浓度的80.4%。其次是PFOS、PFOA、PFNA和PFHxA，而其它PFAS的浓度贡献很小。

此外，从图1还可以看出，研究区内3#、7#和11#采样点的PFAS浓度较高。结合现场实地调研结果可知，3#和11#采样点不仅临近公路主干道，同时附近均建有养殖场；而7#采样点附近有煤矿和发电厂，交通和人类的生产生活活动可能是这三个采样点附近的土壤中PFAS浓度较高的原因。

2. 2污染来源分析

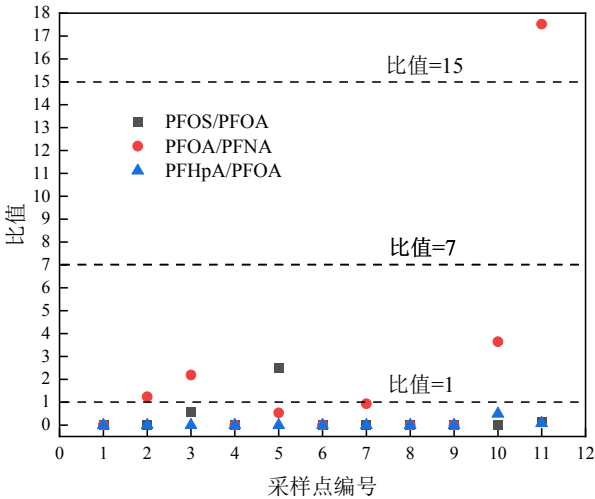


图2 土壤中PFAS的比值

分别根据PFOS/PFOA、PFOA/PFNA、PFHpA/PFOA的比值和不同PFAS化合物的相关性对研究区土壤中的PFAS来源进行分析。从图2可以看出，由于1#、4#、6#、8#、9#采样点PFOA浓度为0，而1#、4#、6#、8#采样点的PFNA浓度为0，因此1#、4#、6#、8#、9#采样点PFOS/PFOA和PFHpA/PFOA的比值无意义，且1#、4#、6#、

8#采样点PFOA/PFNA的比值无意义。2#、3#、7#、10#、11#采样点的PFOS/PFOA的比值<1,表明这些采样点的PFAS主要来自于湿沉降,而5#采样点附近可能存在点源污染^[5]。2#、3#、5#、7#、9#采样点PFOA/PFNA的比值<7,表明这些采样点的PFAS以大气沉降等间接来源为主;11#采样点PFOA/PFNA的比值>15,表明该采样点的PFAS可能来自于前体物的降解^[5]。2#、3#、5#、7#、10#、11#采样点PFHpA/PFOA的比值均小于1,表明虽然研究区整体受大气沉降的控制,但是道路交通、养殖场等直接排放也是土壤中PFAS的重要来源^[5]。

由图3中所示土壤中不同PFAS的相关性分析可以看出,11C1-PF30UdS、4:2FTS、8:2FTS、9C1-PF30NS、ADONA、PFBS、PFDA、PFDoA、PFEESA、PFHpA、PFUnA等11种PFAS两两之间呈强正相关($r>0.74$),表明其主要来自于大气沉降等共同来源;而HFP0-DA、PFHpS、PFHxS、PFMBA、PFPeA等5种PFAS之间呈低至强正相关($r=0.38\sim1$),且与上述11种PFAS之间呈中等正相关($r>0.59$),表明这5种PFAS除了受区域大气沉降影响的同时还受到附近道路交通、养殖场等直接排放源的影响。PFOS与其他所有PFAS之间的相关性均较弱($r=-0.27\sim0.21$),表明研究区存在独立的PFOS排放源。综合相关性分析与特征比值结果可知,研究区土壤中的PFAS主要来自于大气湿沉降,同时受到部分直接排放源的影响。

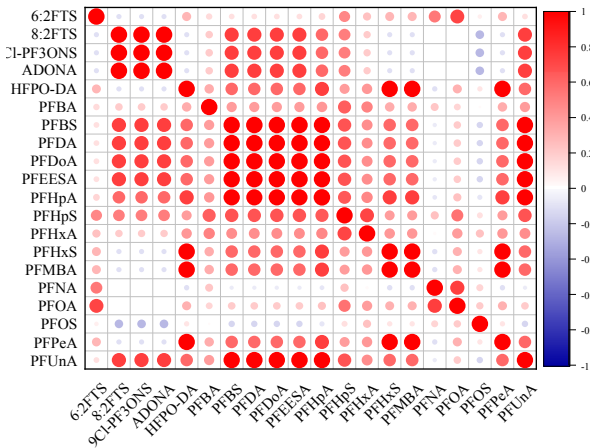


图3 土壤中不同PFAS的相关性分析

2.3健康风险评价

由于大部分检出的PFAS的检出率及浓度较低,而6:2 FTS的预测无效应浓度极高,因此仅选取PFOA、PFNA、PFOS开展人体健康风险评价,而其BAF取值分别为0.027、0.011、0.011^[5,6]。从表4中计算出的不同采样点PFAS对不同人群的EDI_{total}值可以看出,对于同一种PFAS化合物来说,儿童的EDI_{total}明显高于成人。这主要是由于儿童的体重更轻且土壤经口腔的日摄入量更高,但也同样意味着PFAS对儿童的潜在危害更大。与美国环境保护署(EPA)规定的PFOA、PFNA、PFOS的每日可耐受量(TDI, PFOA:4, PFNA:4, PFOS:10)相比,研究区三种PFAS的EDI_{total}明显较低,表明这三种PFAS对周边区域居民的健康风险极低。然而,与EPA新颁布的三种PFAS的参考剂量(RfD, PFOA:0.03, PFNA:3,

PFOS:0.1)相比,儿童和成人对PFOA的EDI_{total}则相对较高。综上所述,研究区PFAS的整体健康风险较低,但儿童与成人对PFOA的EDI_{total}均超过了美国EPA规定的参考剂量,需要引起重视。尤其是儿童体重较轻,土壤经口腔的日摄入速率较高,对有毒物质也更加敏感,因此其健康暴露风险尤其值得关注。

表4 土壤中不同采样点PFAS的每日估计总摄入量

采样点	EDI _{total} (ng/(kg _{bw} ·day))					
	儿童			成人		
	PFOA	PFNA	PFOS	PFOA	PFNA	PFOS
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.121	0.122	0.041	0.040	0.000	0.000
3	0.251	0.253	0.048	0.047	0.057	0.056
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.089	0.090	0.070	0.069	0.093	0.091
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045	0.044
7	0.050	0.050	0.022	0.022	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.081	0.079
9	0.000	0.000	0.032	0.032	0.000	0.000
10	0.014	0.015	0.002	0.002	0.000	0.000
11	0.107	0.107	0.001	0.001	0.006	0.005
平均值	0.058	0.058	0.020	0.019	0.026	0.025

3 结论

本研究系统揭示了宁夏银川市典型沙戈荒区域土壤中PFAS的赋存水平、空间分布规律、污染源及人体健康暴露风险。研究区土壤中共检出22种PFAS,浓度与国内外研究相比处于中等偏低水平;6:2 FTS是主要化合物,这一组成特征与国内外研究结果存在明显差异。源解析结果证实,研究区土壤中的PFAS主要来自于大气湿沉降,而道路交通、畜禽养殖、工矿生产等近距离排放进一步加剧了部分采样点的污染,同时PFOS还存在独立的点源污染。健康评价结果表明,儿童对土壤中PFAS的暴露水平整体高于成人,而两者的EDI_{total}均低于美国EPA规定的每日可耐受摄入量,整体健康风险较低。但儿童与成人对PFOA的EDI_{total}均超过了美国EPA规定的参考剂量(RfD),存在潜在的健康隐患,需要持续监控以确认其长期风险。

[基金项目]

宁夏自然科学基金项目(2023AAC03112); 宁夏回族自治区重点研发计划项目-引才专项(2021BEB04007)。

[参考文献]

[1]Xiao Y,Chen S,Jiao E,et al.Tracking the Spread of PFAS and EOF in Shanghai Soils over a Decade: Insights from 2007,2012,and 2017[J].Environmental Science & Technology,2026,60(1):1172-1181.

[2]Dalahmeh S,Tirgani S,Komakech A J,et al.Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs)in water, soil and plants in wetlands and agricultural areas in Kampala, Uganda[J].Science of The Total Environment,2018,631-632:660-667.

[3]Wang L,Chen L,Wang J,et al.Spatial distribution,compositional characteristics, and source apportionment of legacy and novel per-and polyfluoroalkyl substances in farmland and soil:A nationwide study in mainland China[J].Journal of Hazardous Materials,2024,470:134238.

[4]钱佳浩.上海市不同功能区土壤中PFAS的赋存特征及吸附研究[D].华东理工大学,2023.

[5]刘邓超,张洋沔,郝嘉仪,等.典农河银川段PFAS污染特征与生态风险研究[J/OL].安全与环境学报:1-10[2026-06-17].https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2026.0060.

[6]Lei Q,Niu L,Tang Z,et al.Occurrence, spatial distribution, and risk assessment of per-and polyfluoroalkyl substances in soil and groundwater of a petrochemical industrial park in China[J].Environmental Pollution,2025,385:127064.

[7]李鹏飞.石家庄市陆地环境中全氟/多氟化合物的污染特征研究[D].河北科技大学,2024.

[8]易川,徐春燕,高盼,等.典型电解氟化工场地全/多氟化合物的污染特征及健康风险评估[J].环境工程,2025,43(05):221-232.

[9]Zheng H,Chen X,Lu B,et al.Occurrence, distribution, and potential risk of per-and polyfluoroalkyl substances in soil,outdoor dust,and atmospheric particles in the electronic industrial agglomeration zone in South China[J].Environmental Pollution,2026,390:127470.

[10]Ma D,Zhong H,Lv J,et al.Levels, 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.

[11]郭婧,刘梦,刘金林,等.电镀企业周边环境中全氟化合物残留特征及变化趋势研究[J].实验与分析,2024,2(04):54-61.

作者简介:

邢思洋(2005--),女,汉族,甘肃庆阳人,本科在读,主要从事新污染物环境行为研究。

***通讯作者:**

刘邓超(1985--),男,汉族,四川万源人,博士,副教授,博士生导师,主要从事新污染物环境过程研究。