

# 临沂地区脐带血中全氟及多氟烷基化合物的暴露水平

杜伟,王琳倩,胡矩锋\*

作者单位:276000 山东 临沂,临沂市妇幼保健院产科

作者简介:杜伟,毕业于安徽医科大学,硕士研究生,主治医师,主要研究方向为围产医学

\* 通信作者, E-mail: hujufeng126@163.com

**【摘要】目的** 本研究主要分析临沂地区脐带血中的全氟及多氟烷基化合物(PFAS)的浓度水平,从而更全面地评估胎儿 PFAS 的负荷状况。**方法** 基于前瞻性出生队列研究在 2019 年 1 月至 2021 年 12 月在山东临沂加入出生队列的 420 例母婴队列中选取 120 例经阴道自然分娩足月产儿脐血为研究对象,采用液相色谱-串联质谱(UPLC-MS/MS)法测定脐带血中 29 种 PFAS 浓度,评估其暴露水平。**结果** 样本中未检出 6:2 FTS,样本中检出率较低的 PFAS 分别为:4:2 FTS (17.5%)、8:2 FTS (6%)、FOSA (15%)、NADONA (10%)、N-EtFOSAA (3%)、N-MeFOSAA (10.8%)、PFNS (4%)、 $\Sigma$ m2-PFOS (13%)、PFPeS (20%)。其他 19 种 PFASs 分别为:6:2 Cl-PFESA、PFBA、PFDoA、PFHpS、L-PFHxS、PFNA、PFOA、L-PFOS、6m-PFOS、3,4,5m-PFOS、PFUdA 检出率均为 100%;HFPO-DA、PFBS、PFDA、PFHpA、PFHxA、1m-PFOS、PFPeA、PFTeDA,其检出率为 77.1%~100%。PFAS 的暴露浓度:PFOA 的中位浓度最高(3.234 ng/mL)、其次为 6:2 Cl-PFESA (1.351 ng/mL)、L-PFOS (0.935 ng/mL)、PFNA (0.268 ng/mL)、3,4,5 m-PFOS (0.191 ng/mL)、L-PFHxS (0.170 ng/mL)、PFUdA (0.122 ng/mL)、其他检出化合物的中位浓度为 0.001~0.099 ng/mL。**结论** 在临沂地区脐带血所检测到的 29 种 PFAS 中,PFOA 暴露水平最高,其次是 6:2 Cl-PFESA 暴露水平已经超过以往研究中暴露水平较高的 PFOS。全面评估胎儿 PFAS 的负荷状况,对今后进一步开展 PFSA 对胎儿生长发育的持续监测以及健康风险评估工作提供基础资料,具有重要意义。

**【关键词】** 全氟烷基化合物;多氟烷基化合物;脐带血清

**【中图分类号】**R 714.56 **【文献标志码】**A **【文章编号】**1674-4020(2024)01-058-06

doi:10.3969/j.issn.1674-4020.2024.01.18

## Exposure levels of perfluorinated and polyfluoroalkyl compounds in umbilical cord blood in Linyi, China

Du Wei, Wang Linqian, Hu Jufeng\*

Department of Obstetrics, Linyi Maternal and Child Health Hospital, Linyi Shandong 276000, P. R. China

\* Corresponding author, E-mail: hujufeng126@163.com

**【Abstract】Objective** To analyze the concentration levels of perfluorinated and polyfluoroalkyl compounds (PFAS) in umbilical cord blood of pregnant women in Linyi area, so as to evaluate the fetal PFAS load more comprehensively. **Methods** Based on the prospective birth cohort study from January 2019 to December 2021, among 420 mother-infant cohorts who joined the birth cohort in Linyi, Shandong Province, 120 full-term infants born naturally through vaginal delivery were selected as the research objects. The concentrations of 29 kinds of PFAS in umbilical cord blood were determined by liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) to assess their exposure levels. **Results** 6:2FTS was not detected in the sample, and the PFAS with low detection rate in the sample were: 4:2 FTS (17.5%), 8:2 FTS (6%), FOSA (15%), NADONA (10%), N-EtFOSAA (3%), N-

MeFOSAA (10.8%), PFNS(4%),  $\Sigma$ m2-PFOS(13%), PFPeS(20%)。The other 19 kinds of PFASs were: 6:2 Cl-PFESA, PFBA, PFDoA, PFHpS, L-PFHxS, PFNA, PFOA, L-PFOS, 6m-PFOS, 3,4,5m-PFOS and PFUdA, and the detection rates were all 100%。The detection rates of HFPO-DA, PFBS, PFDA, PFHpA, PFHxA, 1m-PFOS, PFPeA and PFTeDA were 77.1% ~ 100%。Exposure concentration of PFAS: the median concentration of PFOA was the highest (3.234 ng/mL), followed by 6:2 Cl-PFESA (1.351 ng/mL), L-PFOS(0.935 ng/mL), PFNA(0.268 ng/mL), 3,4,5m-PFOS (0.191 ng/mL), L-PFHxS (0.170 ng/mL), PFUdA (0.122 ng/mL), and the median concentration of other detected compounds was 0.001 ~ 0.099 ng/mL. **Conclusion** Among the 29 kinds of PFASs detected in umbilical cord blood in Linyi area, PFOA exposure level is the highest, followed by 6:2 Cl-PFESA exposure level, which has exceeded the PFOS exposure level in previous studies. It is of great significance to comprehensively evaluate the load status of fetal PFAS and provide basic data for further continuous monitoring of fetal growth and development and health risk assessment by PFSA in the future.

**【Key words】**perfluoroalkyl compounds; polyfluoroalkyl compounds; umbilical cord serum

全氟及多氟烷基化合物(PFAS)是一类含有高能碳氟(C-F)共价键的新型全球性环境污染物,其性质稳定,兼具疏水和疏油性。广泛用于各种消费品中,包括表面活性剂、炊具、润滑剂、衣服和食品包装<sup>[1]</sup>,通常在环境、野生动物及人类中被广泛检测到。部分PFAS具有较长的半衰期,如:全氟己烷磺酸盐(PFHxS)的半衰期估计为7.3年,全氟辛烷磺酸盐(PFOS)的半衰期为5.4年,全氟辛酸酯(PFOA)的半衰期为3.8年<sup>[2]</sup>。人群研究和毒理学证明,该类物质是一类多器官毒性的环境污染物,可能具有神经毒性、发育毒性、遗传毒性、生殖毒性、内分泌干扰等多种生理作用和疑似的致癌性。一般人群主要通过包装食品、水、家庭灰尘和空气吸入接触PFAS。因PFAS的持续存在和广泛使用导致其无处不在。人群流行病学研究证实,PFAS在血清、血浆中广泛检出<sup>[3-4]</sup>。此外,尿液、母乳、精液、羊水中也能检出PFAS<sup>[5-7]</sup>。PFAS还可以穿过胎盘屏障从人类母亲转移至胎儿<sup>[8]</sup>。胎儿期是人类生长发育的关键时期,对化学污染物较为敏感,对胎儿而言,PFAS的潜在不良健康影响包括低出生体重、肥胖、甲状腺功能障碍、小于胎龄、肠道微生物组多样性较少等,因此,对于胎儿在子宫内暴露于PFAS的不利影响应该受到关注。通过查阅文献发现,现有的PFAS相关研究主要集中在成人血清的暴露水平,较少对脐带血清中PFAS暴露情况进行评估,已有研究表明胎儿在子宫内PFAS暴露情况与母亲本身的暴露水平不完全一致,因此直接研究脐带血清中PFAS暴露水平非常有意义。本研究主要通过检测临沂地区孕妇脐带血清中PFAS的浓度,评估其暴露水平,从而更全面地评估胎儿PFAS的负荷状况。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究对象

本研究的研究对象来自临沂市前瞻性出生队列,旨在研究遗传、环境对妊娠结局、儿童生长发育和疾病风险的影响。招募对象为孕早期在临沂市妇幼保健院建册的孕妇。所有研究对象均自愿参加并签署知情同意书,同时接受经过专业训练的调查员面对面的问卷调查。本研究通过临沂市妇幼保健院医学伦理委员会的审批(批号:KYL-YXLL2021015)。纳入标准:①年满20

周岁(中国法定结婚年龄);②妊娠时间小于16周;③单胎妊娠;④定居于临沂且未来无移居其它城市的计划;⑤计划在临沂市妇幼保健院进行产前检查并在该院分娩;⑥自愿参加本项目,并签署知情同意书。排除标准:①剖宫产分娩的孕妇;②年龄小于20周岁;③多胎妊娠;④于我院不规律产检的孕妇。本研究在招募的420例孕妇中,剔除255例产前剖宫产分娩的孕妇、10例产时剖宫产的孕妇和35例有甲状腺疾病史的孕妇,最终120例经阴道自然分娩的孕妇纳入研究。

### 1.2 研究方法

1.2.1 调查问卷 通过问卷和病史摘抄两种方式获得孕妇基本信息(包括:年龄、身高、体重、文化程度、职业、家庭年收入、吸烟及饮酒情况)、家庭生活环境(包括:家庭住址、有无环境装修)、职业暴露史(包括:孕妇怀孕前后的工作环境,是否有接触过或者暴露于有毒有害物质)、孕期饮食情况(主要是调查孕妇孕期海产品的摄入频率)、生育史和个人疾病史(甲状腺疾病史,甲状腺疾病相关药物使用史等信息)以及胎儿信息(主要包括:胎儿分娩方式、胎儿性别、出生体重等)。

1.2.2 生物样本的采集 生物样本的采集过程中涉及到的所有采集器材均保证无菌和无化学污染。孕妇经阴道分娩后由统一培训的工作人员采用一次性注射器穿刺脐带进行血样采集,离心后采用一次性无菌巴斯德滴管将血清分装入聚丙烯EP管,收集到的脐带血分装于冻存管内置于-80℃冰箱保存,直至分析测定。样本从分装到分离、入库保证在2h内完成。

### 1.3 脐带血PFAS检测

将0.1 mL血浆样本经固相萃取法(SPE)处理后,采用高效液相色谱串联质谱法(UPLC-MS/MS)进行靶向定量测试血浆中29种PFAS的浓度。

1.3.1 标准品和试剂 PFAS标准品:Wellington Laboratories,纯度>98.0%。同位素内标(<sup>13</sup>C<sub>4</sub>-PFBA、<sup>13</sup>C<sub>5</sub>-PFPeA、<sup>13</sup>C<sub>5</sub>-PFHxA、<sup>13</sup>C<sub>4</sub>-PFHpA、<sup>13</sup>C<sub>8</sub>-PFOA、<sup>13</sup>C<sub>9</sub>-PFNA、<sup>13</sup>C<sub>6</sub>-PFDA、<sup>13</sup>C<sub>7</sub>-PFUdA、<sup>13</sup>C<sub>2</sub>-PFDoA、<sup>13</sup>C<sub>2</sub>-PFTeDA、<sup>13</sup>C<sub>8</sub>-POSA、d3-N-MeFOSAA、d5-N-EtFOSAA、<sup>13</sup>C<sub>3</sub>-PFBS、<sup>13</sup>C<sub>3</sub>-PFHxS、<sup>13</sup>C<sub>8</sub>-FPOS、<sup>13</sup>C<sub>2</sub>-4:2FTS、<sup>13</sup>C<sub>2</sub>-6:2FTS、<sup>13</sup>C<sub>2</sub>-8:2FTS):Wellington Laboratories。试剂:质

谱级甲醇、乙腈 (Merck, Darmstadt, Germany)、氨水 (28% ~ 30%)、超纯水、乙酸铵。

1.3.2 标准曲线及检出限 (标准品母液 2 000 ppb、内标 1 000 ppb) 标准曲线范围 0.01 ~ 100 ng/mL。吸期待测物标准品,以甲醇作溶剂,配制 0.01 ng/mL、0.05 ng/mL、0.1 ng/mL、0.5 ng/mL、1.0 ng/mL、5.0 ng/mL、10.0 ng/mL、20.0 ng/mL、50.0 ng/mL 和 100.0 ng/mL 的标准溶液,以 PFAS 浓度为横坐标,响应比为纵坐标绘制标准曲线。

1.3.3 样品制备 0.1 mL 血浆中加入内标和甲酸充分震荡混匀。采用 Oasis-HLB 柱 (3 mL/150 mg、Waters Inc, Milford, MA, USA) 进行固相萃取,将萃取液浓缩近干,复溶后进行 UPLC-MS/MS 检测。

1.3.4 UPLC-MS/MS 分析 使用 AB SCIEX 5500 + 高效液相色谱串联质谱系统进行检测,色谱柱 (ZORBAX RRHD Eclipse Plus C18, 2.1 mm × 50 mm、1.8 μm、Agilent),乙酸铵水溶液和乙腈为流动相,ESI 负离子模式,采用多反应监测模式 (MRM) 采集数据,内标法定量。

1.3.5 分析质量控制结果 每 20 个样本加入一个绵羊血浆空白和两个高低浓度的质控样本 (1 ppb 和 10 ppb),用以检测分析性能。所有批次的 QC 样本对应的目标化合物回收率的范围均在 70% ~ 130% 内,显示了出色的分析性能。

#### 1.4 统计学方法

运用 SPSS 20.0 统计软件对数据进行统计分析。对一般人口学信息、PFAS 暴露水平进行基本的统计学描述。对于正态分布的连续性变量,使用  $\bar{x} \pm s$  进行描述;使用中位数 (M) 和四分位数 ( $P_{25} \sim P_{75}$ ) 对非正态的连续性变量采用描述;对于分类变量,采用百分比描述。根据 LOD 计算出血浆 PFAS 水平检出率,低于 LOD 的水平用各自的  $LOD/\sqrt{2}$  计算。对于检出率 < 40% 的 PFAS,只描述其水平,不纳入相关性分析。由于研究人群 PFAS 浓度呈右偏态分布,对于检出率 > 40% 的 PFAS 采用 Spearman 等级相关来计算各 PFAS 之间的相关性。

## 2 结果

### 2.1 研究对象一般人口学信息

研究对象的平均年龄为 (28.62 ± 4.52) 岁,平均孕前体质量指数为 (21.42 ± 3.50) kg/m<sup>2</sup>。受地区影响,研究对象的文化程度较低,高中及以下学历占 49 人 (40.8%)。初产妇有 107 人,占总数的 89.2%。孕妇本次妊娠的平均孕周为 (39.26 ± 1.31) 周。62 名 (51%) 新生儿为男婴,58 名 (49%) 新生儿为女婴。新生儿平均出生体重为 (3 363.70 ± 815.64) g,平均出生身高为 (49.9 ± 1.3) cm。详见表 1。

### 2.2 研究对象 PFAS 暴露浓度

本研究对 120 份孕妇脐带血清中 PFAS 进行了检测。PFAS 的检出限 (LOD) 为 0.009 ~ 0.01 ng/mL,样本中未检出 1H,1H,2H,2H 全氟辛基磺酸 (6:2 FTS),样

本中检出率较低的 PFAS 分别为:1H,1H,2H,2H 全氟己基磺酸 (4:2 FTS) (17.5%)、1H,1H,2H,2H 全氟壬基磺酸 (8:2 FTS) (6%)、全氟辛基磺酰胺 (FOSA) (15%)、4-8-二氧-3H-全氟辛酸铵 (NADONA) (10%)、N-乙基全氟辛基磺酰胺乙酸 (N-EtFOSAA) (3%)、N-甲基全氟辛基磺酰胺乙酸 (N-MeFOSAA) (10.8%)、全氟-1-壬烷磺酸 (PFNS) (4%)、全氟辛烷磺酸二甲基取代支链异构体总量 ( $\Sigma m 2$ -PFOS) (13%)、全氟-1-戊烷磺酸 (PFPeS) (20%)。其他 19 种 PFAS:6:2 氯代多氟醚基磺酸 (6:2 Cl-PFESA)、全氟丁酸 (PFBA)、全氟十二烷酸 (PFDoA)、全氟庚烷磺酸 (PFHpS)、全氟己烷磺酸钠 (L-PFHxS)、全氟壬酸 (PFNA)、全氟辛酸 (PFOA)、全氟辛烷磺酸钠 (L-PFOS)、全氟-6-甲基庚烷磺酸 (6m-PFOS)、全氟-3,4,5-甲基庚烷磺酸 (3,4,5m-PFOS)、全氟正十一酸 (PFUdA) 均为 100%;六氟环氧丙烷二聚体 (HFPO-DA)、全氟丁烷磺酸 (PFBS)、全氟癸酸 (PFDA)、全氟庚酸 (PFHpA)、全氟己酸 (PFHxA)、全氟-1-甲基庚烷磺酸 (1m-PFOS)、全氟戊酸 (PFPeA)、全氟十四酸 (PFTeDA) 检出率为 77.1% ~ 100%。对 PFAS 来说,其中 PFOA 的中位浓度最高 (3.234 ng/mL)、其余依次为 6:2 Cl-PFESA (1.351 ng/mL)、L-PFOS (0.935 ng/mL)、PFNA (0.268 ng/mL)、3,4,5m-PFOS (0.191 ng/mL)、L-PFHxS (0.170 ng/mL)、PFUdA (0.122 ng/mL)、其他检出化合物的中位浓度为 0.001 ~ 0.099 ng/mL。详见下页表 2。

表 1 研究对象的基本信息

项目	例数	$\bar{x} \pm s, \%$
样本量	120	
产妇年龄 (岁)	120	28.62 ± 4.52
孕前体质量指数 (kg/m <sup>2</sup> )	120	21.42 ± 3.50
产次		
初产妇	107	89.2
经产妇	13	10.8
产妇教育		
高中或以下	49	40.8
大专或本科	69	57.5
硕士及以上	2	1.6
分娩孕周	115 *	39.26 ± 1.31
新生儿出生体重 (g)	120	3 363.70 ± 815.64
新生儿出生长度 (cm)	120	49.9 ± 1.3
新生儿性别		
男	62	51
女	58	49

注: \* 数据缺失:分娩孕周 (N=5)

### 2.3 各 PFAS 之间的相关性

应用 Spearman 相关系数对血清中 19 种 PFAS 浓度之间的相关性进行分析,结果如表 3 所示。孕妇血清中 PFAS 之间的浓度存在显著相关性 ( $P < 0.05$ )。

表 2 孕妇脐带血中 PFAS 浓度暴露水平 (ng/mL)

名称	% > LOD	中位数	平均值	几何均数	最大值-最小值	百分位数		
						<i>P</i> <sub>25</sub>	<i>P</i> <sub>50</sub>	<i>P</i> <sub>75</sub>
PFAS( ng/mL)								
6:2 Cl-PFESA	100	1.351	1.669	1.313	0.271-8.832	0.835	1.351	2.012
HFPO-DA	80.8	0.001	0.005	0	< LOD - 0.092	< LOD	0.001	0.006
PFBA	100	0.075	0.131	0.081	0.010-0.081	0.049	0.075	0.113
PFBS	80.8	0.007	0.015	0	< LOD - 0.156	< LOD	0.007	0.017
PFDA	99	0.099	0.110	0	< LOD - 0.417	0.058	0.099	0.137
PFDoA	100	0.027	0.031	0.026	0.029-0.082	0.017	0.027	0.041
PFHpA	77.1	0.026	0.096	0	< LOD - 1.173	< LOD	0.026	0.097
PFHpS	100	0.021	0.022	0.019	0.004-0.055	0.014	0.021	0.027
PFHxA	96.9	0.025	0.025	0	< LOD - 0.065	0.008	0.025	0.039
L-PFHxS	100	0.170	0.185	0.164	0.039-0.646	0.122	0.170	0.216
PFNA	100	0.268	0.280	0.251	0.084-0.604	0.179	0.268	0.364
PFOA	100	3.234	3.443	3.121	0.096-9.93	2.321	3.234	4.315
L-PFOS	100	0.935	1.108	0.904	0.061-3.803	0.628	0.935	1.413
6m-PFOS	100	0.088	0.134	0.089	0.004-1.038	0.054	0.088	0.174
3,4,5m-PFOS	100	0.191	0.218	0.192	0.050-0.698	0.140	0.191	0.265
1m-PFOS	98.5	0.001	0.001	0	< LOD - 0.065	0.001	0.001	0.002
PFPeA	79.2	0.002	0.005	0	< LOD - 0.068	< LOD	0.002	0.007
PFTeDA	90	0.022	0.024	0	< LOD - 0.220	0.013	0.022	0.032
PFUdA	100	0.122	0.137	0.111	< LOD - 0.366	0.085	0.122	0.181

注: PFAS 的检出限 (LOD ng/mL): 6:2 Cl-PFESA (0.003)、HFPO-DA (0.001)、PFBA (0.002)、PFBS (0.005)、PFDA (0.006)、PFDaA (0.015)、PFHpA (0.002)、PFHpS (0.0007)、PFHxA (0.0017)、L-PFHxS (0.0035)、PFNA (0.0052)、PFOA (0.0045)、L-PFOS (0.0035)、6m-PFOS (0.005)、3,4,5m-PFOS (0.0086)、1m-PFOS (0.0006)、PFPeA (0.001)、PFTeDA (0.009)、PFUdA (0.01)

表 3 采用 Spearman 等级相关分析 19 种 PFAS 相关性

	6:2Cl-PFESA	HFPO-DA	PFBA	PFBS	PFDA	PFDaA	PFHpA	PFHpS	PFHxA	L-PFHxS	PFNA	PFOA	L-PFOS	6m-PFOS	3,4,5m-PFOS	1m-PFOS	PFPeA	PFTeDA	PFUdA
6:2 Cl-PFESA	1.0																		
HFPO-DA	-0.082	1.0																	
PFBA	-0.045	0.1	1.0																
PFBS	-0.69	0.178	0.099	1.0															
PFDA	0.596 *	0.003	0.044	-0.022	1.0														
PFDaA	0.348 **	0.083	0.087	0.056	0.805 **	1.0													
PFHpA	-0.034	-0.016	-0.023	0.033 **	-0.144	-0.166	1.0												
PFHpS	0.516 **	0.106	0.102	0.091	0.667 **	0.577 **	-0.01	1.0											
PFHxA	-0.038	0.051	0.231 **	-0.154	-0.082	0.007	-0.159	0.189 *	1.0										
L-PFHxS	0.336 **	0.179	0.060	0.092	0.504 **	0.405 **	-0.006	0.636 **	0.134	1.0									
PFNA	0.472 **	0.043	0.067	0.060	0.840 **	0.701 **	-0.023	0.767 **	0.046	0.539 **	1.0								
PFOA	0.2 *	0.21 *	0.104	0.065	0.369 **	0.295 **	0.04	0.475 **	0.093	0.628 **	0.634 **	1.0							
L-PFOS	0.737 **	-0.053	0.054	0.025	0.799 **	0.605 **	-0.104	0.772 **	0.016	0.514 **	0.726 **	0.341 **	1.0						
6m-PFOS	0.391 **	0.075	0.134	0.121	0.430 **	0.344 **	0.049	0.595 **	-0.068	0.416 **	0.499 **	0.277 **	0.495 **	1.0					
3,4,5m-PFOS	0.514 **	0.068	0.128	0.075	0.619 **	0.515 **	-0.043	0.889 **	0.223	0.595 **	0.675 **	0.463 **	0.756 **	0.660 **	1.0				
1m-PFOS	0.698 **	0.014	0.077	0.041	0.783 **	0.59 **	0.137	0.752 **	0.074	0.536 **	0.719 **	0.342 **	0.948 **	0.413 **	0.746 **	1.0			
PFPeA	-0.064	0.049	0.123	-0.234 *	-0.052	0.009	0.017	0.057	0.549 **	0.042	-0.051	-0.078	-0.048	-0.199 **	0.077	0.016	1.0		
PFTeDA	0.229 **	0.062	0.074	0.043	0.551 **	0.724 **	0.056	0.443 **	0.156	0.34 **	0.476 **	0.260 **	0.405 **	0.23 **	0.4268 *	0.39 **	0.095	1.0	
PFUdA	0.558 **	-0.025	0.29	0.02	0.897 **	0.817 **	-0.154	0.694 **	0.1	0.54 **	0.847 **	0.413 **	0.788 **	0.355 **	0.595 **	0.799 **	0.34	0.556 **	1.0

注: \* 在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关; \*\* 在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

### 3 讨论

大量文献表明 PFAS 可通过胎盘屏障暴露给胎儿,使胎儿可能出现体重低下、子代后期发生肥胖、糖脂代谢异常、哮喘、注意缺陷多动障碍等不良影响<sup>[9]</sup>。目前在国内外文献中,大多讨论孕妇血清中的 PFAS 暴露水平,而关于胎儿脐带血中的 PFAS 暴露水平少有报道。

本研究发现所检测的 29 种 PFAS,其中 6:2 FTS 未检测出,还有 9 种 PFAS 检出率较低,均低于 30%,分别为 4:2 FTS、8:2 FTS、FOSA、NADONA、N-EtFOSAA、N-MeFOSAA、PFNS、 $\Sigma$  m2 -PFOS、PFPeS。其余 19 种 PFAS 检出率均在 80% 以上。提示胎儿广泛暴露于 PFAS。

本研究同时也对国外及中国不同地区脐带血 PFAS 暴露水平进行了汇总,发现各国及国内各省之间的暴露水平存在差异。PFOA 不同地区暴露浓度分别为:山东 34.67 ng/mL<sup>[10]</sup>、上海 7.57 ng/mL<sup>[11]</sup>、台湾 2.55 ng/mL<sup>[12]</sup>、北京 1.15 ng/mL<sup>[13]</sup>、南非 1.3 ng/mL<sup>[14]</sup>、广州 1.23 ng/mL<sup>[15]</sup>、韩国 1.15 ng/mL<sup>[16]</sup>、日本未检出<sup>[17]</sup>。本研究 PFOA 暴露浓度(3.234 ng/mL),较山东及上海偏低,较北京、南非、广州、韩国地区偏高。PFOA 在山东及上海地区暴露水平增高,考虑与脐血采集地点主要为重工业地区有关。

PFOS 不同地区暴露浓度分别为:台湾新生儿脐血中,PFOS 浓度高达 5.11 ng/mL<sup>[12]</sup>,高于广州(2.99 ng/mL)<sup>[15]</sup>、上海(2.51 ng/mL)<sup>[11]</sup>、山东(1.39 ng/mL)<sup>[10]</sup>、韩国(1.26 ng/mL)<sup>[16]</sup>、南非(0.7 ng/mL)<sup>[14]</sup>。本研究 L-PFOS、6m-PFOS、3,4,5PFOS、1mPFOS 作为 PFOS 异构体平均浓度为 1.108 ng/mL、0.134 ng/mL、0.218 ng/mL、0.001 ng/mL,总 PFOS 低于台湾、广州、上海等地区。

本研究还发现 PFNA 脐血中暴露浓度为 0.28 ng/mL,较台湾 3.57 ng/mL<sup>[12]</sup>、上海 0.66 ng/mL<sup>[11]</sup>、韩国 0.45 ng/mL<sup>[16]</sup>均偏低,高于广州(0.15 ng/mL)<sup>[15]</sup>。在加拿大一项研究中,只有不到 30% 的脐带血样本中检测到 PFNA、PFHxS,和本研究差别较大。L-PFHxS 暴露水平(0.170 ng/mL)明显低于南非(0.3 ng/mL)<sup>[14]</sup>、韩国(0.6 ng/mL)<sup>[16]</sup>,而高于江苏金湖地区(0.064 ng/mL)<sup>[19]</sup>。PFUdA 暴露水平(0.122 ng/mL)明显低于台湾(10.26 ng/mL),台湾地区约为江苏金湖<sup>[19]</sup>的 50 倍,江苏金湖地区 PFUdA 水平约为本研究中临沂地区 2 倍。

本研究还发现脐带血中未检测出 6:2 FTS,这与 Yang 等<sup>[13]</sup>报道中提示 6:2 FTS 具有最高的浓度水平[浓度中位数(23.53 pg/mL)]和检出率(90%)完全不一致,其报道中还提示 N-MeFOSAA、N-EtFOSAA、FOSA、8:2 FTS 脐血中检出率分别为 67%、20%、6%、0,而本研究检出率分别为 10.8%、3%、15%、6%。这说明不同地区脐带血中 6:2 FTS、N-MeFOSAA、N-EtFOSAA、FOSA、8:2 FTS 暴露水平存在明显差异。

除此之外还检测到较高的 6:2 Cl-PFESA 暴露浓度(1.351 ng/mL),此化合物仅在一项天津孕妇血清研究中报道过,浓度为(6.360 ng/mL),考虑到孕妇血清与脐带血中暴露水平有差距,而其他文献未查阅到相关脐带血的暴露水平,因此不再进一步比较。

通过分析以上的脐带血各种 PFAS 暴露水平的差异,推测这可能与采集地区及各个研究采样的时间有关,最早的采样时间是在 1996~2002 年,最近的则是在 2022 年进行的采样,采样时间差距长达十多年。

综上所述,本研究通过测定脐带血中 PFAS 的暴露水平,可以进一步准确地评估胎儿的负荷状况,对今后进一步开展 PFSA 对胎儿生长发育的持续监测以及健康风险评价工作提供基础资料,具有重要意义。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突。

### 【参考文献】

- [1] Buck RC, Franklin J, Berger U, et al. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins [J]. *Integr Environ Assess Manag*, 2011, 7(4):513-541.
- [2] Bjerregaard-Olesen C, Bossi R, Liew Z, et al. Maternal serum concentrations of perfluoroalkyl acids in five international birth cohorts [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2017, 220(2 Pt A):86-93.
- [3] Zhou W, Zhang L, Tong C, et al. Plasma perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances concentration and menstrual cycle characteristics in preconception women [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2017, 125(6):067012.
- [4] Liew Z, Ritz B, Bonefeld-Jorgensen EC, et al. Prenatal exposure to perfluoroalkyl substances and the risk of congenital cerebral palsy in children [J]. *Am J Epidemiol*, 2014, 180(6):574-581.
- [5] Wang Y, Shi Y, Vestergren R, et al. Using hair, nail and urine samples for human exposure assessment of legacy and emerging per- and polyfluoroalkyl substances [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 636:383-391.
- [6] Zhang T, Sun H, Lin Y, et al. Distribution of poly- and perfluoroalkyl substances in matched samples from pregnant women and carbon chain length related maternal transfer [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(14):7974-7981.
- [7] Song X, Tang S, Zhu H, et al. Biomonitoring PFAAs in blood and semen samples: investigation of a potential link between PFAAs exposure and semen mobility in China [J]. *Environ Int*, 2018, 113:50-54.
- [8] Gutzkow KB, Haug LS, Thomsen C, et al. Placental transfer of perfluorinated compounds is selective—a Norwegian mother and child sub-cohort study [J]. *Int J Hyg Environ Health*, 2011, 215(2):216-219.
- [9] Liew Z, Ritz B, von Ehrenstein OS, et al. Attention deficit/hyperactivity disorder and childhood autism in association with prenatal exposure to perfluoroalkyl substances: a nested case-control study in the danish national birth cohort [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015, 123(4):367-373.



- [10] Han W, Gao Y, Yao Q, et al. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in matched parental and cord serum in Shandong, China [J]. *Environ Int*, 2018, 116:206-213.
- [11] Aimuzi R, Luo K, Chen Q, et al. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances and fetal thyroid hormone levels in umbilical cord blood among newborns by prelabor caesarean delivery [J]. *Environ Int*, 2019,130:104929.
- [12] Tsai MS, Lin CC, Chen MH, et al. Perfluoroalkyl substances and thyroid hormones in cord blood [J]. *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)*, 2017, 222:543-548.
- [13] Yang L, Li J, Lai J, et al. Placental transfer of perfluoroalkyl substances and associations with thyroid hormones: Beijing prenatal exposure study [J]. *Sci Rep*, 2016, 6:21699.
- [14] Hanssen L, Rllin H, Odland J, et al. Pernuorinated compounds in maternal serum and cord blood from selected areas of South Africa : results of a pilot study [J] . *Journal of Environmental Monitoring*, 2010,12 (6):1355-1361.
- [15] Zhang YZ, Zeng XW, Qian ZM, et al. Perfluoroalkyl substances with isomer analysis in umbilical cord serum in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24 ( 15 ): 13626-13637.
- [16] Kim S, Choi K, Ji K, et al. Trans-placental transfer of thirteen perfluorinated compounds and relations with fetal thyroid hormones [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(17) :7465-7472.
- [17] Inoue K, Okada F, Ito R, et al. Perfluorooctane sulfonate (PFOS) and related perfluorinated compounds in human maternal and cord blood samples: assessment of PFAS exposure in a susceptible population during pregnancy [ J ]. *Environmental Health Perspectives*, 2004,112 (11):1204.
- [18] Liu J, Li J, Liu Y, et al. Comparison on gestation and lactation exposure of perfluorinated compounds for newborns [J]. *Environ Int*, 2011,37(7) : 1206-1212.

(收稿日期:2023-05-12 编辑:牟术容)

(上接第 52 页)

- [10] 王泽华. 妇产科学[M]. 第 5 版. 北京:人民卫生出版社,2004.
- [11] Li M, Tian Q. Risk factors for postoperative pelvic floor dysfunction in patients with cervical cancer: evidences for management strategies [J]. *Transl Cancer Res*, 2021, 10(10) :4338-4346.
- [12] Baessler K, Windemut S, Chiantera V, et al. Sexual, bladder and bowel function following different minimally invasive techniques of radical hysterectomy in patients with early-stage cervical cancer [J]. *Clin Transl Oncol*, 2021, 23(11) :2335-2343.
- [13] 王秋静, 巫梦雪, 杜薇娜, 等. 盆底功能障碍性疾病耻感现状及其影响因素研究 [J]. *中国性科学*, 2020, 29(8) :135-138.
- [14] 杨昕宇, 吴倩芸, 吴奕霖, 等. 暴发性心肌炎短期死亡的危险因素及其列线图预测模型的建立及验证:回顾性分析 [J]. *临床心血管病杂志*, 2023, 39(3) :225-230.
- [15] 修晨, 李娟, 王卓, 等. LTH 术结合圆韧带悬吊术对子宫肌瘤患者术后并发 PFD 的预防效果分析 [J]. *河北医科大学学报*, 2021, 42(10) :1171-1174, 1184.
- [16] Tyagi V, Perera M, Guerrero K, et al. Prospective observational study of the impact of vaginal surgery (pelvic organ prolapse with or without urinary incontinence) on female sexual function [J]. *Int Urogynecol J*, 2018, 29(6) :837-845.
- [17] 刘艳娟, 张斌, 王慧敏, 等. 子宫全切术后盆底功能障碍性疾病发生危险因素 Logistic 回归分析及预测模型建立 [J]. *中国计划生育和妇产科*, 2021, 13(8) :52-55.
- [18] 王乾华, 邓飞涛, 王源. 产后盆底康复治疗效果评价及其影响因素 Logistic 回归分析 [J]. *华中科技大学学报(医学版)*, 2018, 47(5) :118-120.
- [19] Jiang DD, Gallagher S, Burchill L, et al. Implementation of a pelvic floor physical therapy program for transgender women undergoing gender-affirming vaginoplasty [J]. *Obstet Gynecol*, 2019, 133(5) : 1003-1011.
- [20] 宋桂英, 李红, 朱静. 不同术式子宫切除术术后盆底功能障碍性疾病症状的发生及危险因素分析 [J]. *生殖医学杂志*, 2016, 25(9) :840-844.

(收稿日期:2023-04-08 编辑:杨叶)