

张芸,唐冲,颜廷昱,等.成都市西南郊区冬季大气颗粒物中典型新污染物的污染特征[J].中国环境科学,2025,45(6):2983-2991.

Zhang Y, Tang C, Yan T Y, et al. Pollution characterization of typical emerging contaminations in atmospheric particulate matter in winter at southwest suburbs of Chengdu City [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):2983-2991.

## 成都市西南郊区冬季大气颗粒物中典型新污染物的污染特征

张芸<sup>1</sup>,唐冲<sup>1</sup>,颜廷昱<sup>2</sup>,刘伟<sup>1</sup>,孙静<sup>1</sup>,方淑红<sup>1\*</sup> (1.成都信息工程大学资源环境学院,四川成都610225; 2.成都信息工程大学电子工程学院,四川成都610225)

**摘要:** 选取全氟及多氟烷基化合物(PFASs)和药物及个人护理品(PPCPs)作为典型新污染物,研究其在成都地区大气中的污染特征.采用超高效液相色谱-串联质谱法分析成都地区大气中25种PFASs和9种PPCPs浓度水平,对PFASs进行源解析并将其浓度与总悬浮颗粒物(TSP)做相关性分析.结果表明,大气中共检出10种PFASs和1种PPCPs.∑<sub>10</sub>PFASs的浓度范围为4.58~647.59pg/m<sup>3</sup>,平均值为140.81pg/m<sup>3</sup>,其中PFBA含量最高(平均值为133.18pg/m<sup>3</sup>).∑PPCPs的浓度范围为34.98~474.00pg/m<sup>3</sup>,平均值为189.88pg/m<sup>3</sup>,其中可替宁(CTN)是唯一检出物质.主成分分析表明成都地区大气中PFASs主要来源于表面活性剂、纺织业和皮革业等行业生产使用后排放至大气中形成的面源污染.成都市大气PFASs的物质中除了6:2氟调磺酸(6:2FTSA)和全氟丁酸(PFBA),其余检出物质均与TSP呈显著正相关( $P<0.05$ ),这与大气颗粒物中含有Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>氧化物以及有机质有关.

**关键词:** 新污染物; 全氟化合物; 药物及个人护理品; 大气颗粒物; 源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)06-2983-09

**Pollution characterization of typical emerging contaminations in atmospheric particulate matter in winter at southwest suburbs of Chengdu City.** ZHANG Yun<sup>1</sup>, TANG Chong<sup>1</sup>, YAN Ting-yu<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, SUN Jing<sup>1</sup>, FANG Shu-hong<sup>1\*</sup> (1.College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2.College of of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China). *China Environmental Science*, 2025,45(6): 2983~2991

**Abstract:** Per-/polyfluoroalkyl substances (PFASs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) were selected as the typical emerging contaminations to investigate the pollution characteristics in the atmospheric particulate matter (APM) of Chengdu. Concentration levels of 25PFASs and 9PPCPs in the APM of Chengdu were analyzed by ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS), and source analysis was carried out on the PFASs, and the concentrations of the PFASs were correlated with total suspended particulate matter(TSP). The results showed that 10PFASs and 1PPCPs were detected in the APM. ∑<sub>10</sub>PFASs concentrations ranged from 4.58 to 647.59pg/m<sup>3</sup>, with a mean value of 140.81pg/m<sup>3</sup>, and the highest level was found in PFBA (mean value of 133.18pg/m<sup>3</sup>). The concentration of ∑PPCPs ranged from 34.98 to 474.00pg/m<sup>3</sup>, with a mean value of 189.88pg/m<sup>3</sup>, among which cotinine (CTN) was the only detected PPCP. The principal component analysis indicated that the atmospheric PFASs in the atmosphere of Chengdu were mainly originated from the surfactants, textile and leather industries. Except for 6:2 Fluorotonous Sulfonic Acid (6:2FTSA) and perfluorobutanoic acid (PFBA), all the other PFASs showed a significant positive correlation with TSP( $P<0.05$ ), which is related to the presence of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxides and organic matter in atmospheric particulate matter discussed.

**Key words:** emerging contaminations; PFASs; PPCPs; atmospheric particulate matter; source analysis

持久性有机污染物(POPs)、内分泌干扰物、抗生素等是目前环境中广受关注的新污染物<sup>[1-2]</sup>.这些新污染物中,全氟及多氟烷基化合物(PFASs)和药物及个人护理品(PPCPs)是在环境中普遍检出的典型新污染物.PFASs是碳链上的氢原子全部或部分被氟原子所取代的一类有机化合物,它具有高表面活性、高热稳定性、高化学稳定性和疏水疏油性,可通过不同途径进入生物体,能沿食物链传递生物富集和放大,对生态环境及人类健康构成潜在威胁<sup>[3-4]</sup>,

依据基团可将其划分为全氟烷基羧酸盐(PFCAs)和全氟烷基磺酸盐(PFSAs)两类.其中,碳链长度 $\geq 7$ 的PFCAs和碳链长度 $\geq 6$ 的PFSAs称为长链PFASs,反之则为短链PFASs<sup>[5]</sup>.PPCPs是指人工合成并使用的化学物质,具有慢性毒性、伪持久性和生物累积

收稿日期: 2024-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21607018);成都市科技局重点支撑研发计划项目(2023-YF09-00013-SN)

\* 责任作者, 副教授, fsh@cuit.edu.cn

性<sup>[6]</sup>,主要包括两类,一类是各种处方药和非处方药,包括抗生素、激素、消炎镇痛药、降压降血脂药和抗精神药等,一类是个人护理产品,如消毒剂和合成麝香等。

国内外学者已对大气颗粒物中的新污染物浓度水平、化学组成、来源解析等开展了一系列研究。研究表明,PFASs 和 PPCPs 在大气中普遍存在<sup>[7-8]</sup>,并随着大气环流传输到人类活动较少的偏远地区,如极地和青藏高原等地<sup>[9-11]</sup>。同时,研究还发现大气中 PFASs 的浓度受温度、颗粒物粒径、人口密度等的影响<sup>[12-13]</sup>。

成都市作为西部地区重要的中心城市,工业农业为主要产业,存在一定的面源污染。且成都位于四川盆地,年平均风速 $<2\text{m/s}$ ,其独特的地理位置和气候条件导致空气流动性弱,大气环境容量相对有限,污染物易于在特定条件下积聚难以扩散,尤其在冬季尤为明显。冬季期间,低温、高空气稳定度以及居民取暖需求的增加等因素共同作用,导致大气污染物浓度显著升高,雾霾天气频发。基于此,本研究通过分析成都冬季大气颗粒物中典型新污染物的浓度水平,揭示其在成都市大气颗粒物中的赋存特征、来源解析以及影响因素,为成都市新污染物的管控提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与保存

成都位于中国西南四川盆地西部,坐落于成都平原的核心地带,其气候类型属于亚热带季风性湿润气候,夏季的相对平均湿度大约为 85%,而冬季则为 80%。年平均风速为  $1.0\text{m/s}$ ,年最大风速可达到  $26\text{m/s}$ 。主导风向为北东北。本研究采样点位于成都市西南郊区成都信息工程大学城市环境气象观测站的楼顶平台。在 2024 年 1 月 5~24 日,采用 KC-6120 型自动采样器配备了 TSP 切割头,流量设置为  $100\text{L/min}$ ,开展了为期 20d 的连续大气样品采集工作,期间该区域经历了重污染天气。采样活动为每日 11:00~次日 10:30 连续不间断采样,并记录采样期间气压、气温、天气状况等基本信息,为深入分析大气颗粒物中新污染物的浓度特征提供基础数据。采样点位周边 500m 范围内有成都绕城高速,西北方向 4.5km 处则是成都双流国际机场。采样点周围分布着

学校、居民区、餐饮和道路等多种功能区。

在进行采样前,滤膜需先在马弗炉中以  $500^\circ\text{C}$  的高温煅烧 6h,以彻底去除所含的有机物杂质。煅烧后,滤膜在恒温恒湿环境下平衡 24h 后称重,称重后用锡箔纸包裹并妥善保存在聚乙烯材质的采样袋中。为了确保样品不被污染,所有可能与样品发生接触的采样器部件和器皿均需使用甲醇彻底清洗。当样品采集完毕后,滤膜再次进行称重,并用铝箔进行包裹,然后放入采样袋中。

### 1.2 实验仪器与材料

仪器:KC-6120 型自动采样器、超高效液相色谱-串联质谱(1290Infinity II-6465B,安捷伦科技有限公司)、电子分析天平(SQP,赛多利斯科学仪器有限公司)、水浴氮吹仪(JHD-006S,上海极恒实业)、低速台式离心机(TDL-5-A,上海安亭科学仪器厂)和水浴恒温振荡器(SHA-B,江苏金坛宏华仪器厂)等。

试剂与材料:甲醇(色谱纯,99.9%,Fisher chemical 公司)、氨水(分析纯,25%,成都市科隆化学制品有限公司)、甲酸(色谱纯,99.9%,上海安谱实验科技股份有限公司)、Milli-Q 超纯水、一次性聚丙烯离心管(PP 管,上海安谱实验科技股份有限公司)、乙腈(色谱纯,99.9%,Fisher chemical 公司)。

实验标准品:PFASs 采用高纯度混合标准品 PFAC-MXB 和高纯度混合碳同位素标记品 PFAC-MXA(Wellington 公司),包括:全氟丁烷羧酸(PFBA)、全氟丁烷磺酸(PFBS)、全氟戊烷羧酸(PFPeA)、全氟己烷羧酸(PFHxA)、全氟己烷磺酸(PFHxS)、全氟庚烷羧酸(PFHpA)、全氟辛烷羧酸(PFOA)、全氟辛烷磺酸(PFOS)、全氟壬烷磺酸(PFNS)、全氟壬烷羧酸(PFNA)、全氟癸烷羧酸(PFDA)、全氟十一烷羧酸(PFUnDA)、全氟十二烷羧酸(PFDoDA)、全氟癸烷磺酸(PFDS)、全氟戊烷磺酸(PFPeS)、全氟庚烷磺酸(PFHpS)、N-甲基全氟-1-辛烷磺酸氨基乙酸(N-MeFOSAA)、N-乙基全氟-1-辛烷磺酸氨基乙酸(N-EtFOSAA)、六氧环氧丙烷二聚酸(HFPO-DA)、6:2 氟调聚磺酸(4:2FTSA)、6:2 氟调聚磺酸(6:2FTSA)、全氟辛基磺酸盐(PFOSA)、11-氯二十氟-3-氧代十一烷-1-磺酸钾( $11\text{Cl-PF}_3\text{OUdS}$ )、全氟十三烷酸(PFTrDA)和全氟十四烷酸(PFTeDA)。碳标记内标物包括: $^{13}\text{C}_2$ -PFDA、 $^{13}\text{C}_2$ -PFUnDA、 $^{13}\text{C}_2$ -PFHxA、 $^{13}\text{C}_2$ -PFDoDA、 $^{13}\text{C}_4$ -PFBA、 $^{13}\text{C}_4$ -

PFOA、 $^{13}\text{C}_4$ -PFOS、 $^{13}\text{C}_5$ -PFNA 和  $^{13}\text{O}_2$ -PFHxS. PPCPs 有 9 种抗生素标准品,包括克拉霉素(CTM)、磺胺嘧啶(SD)、磺胺甲噁唑(SMX)、磺胺对甲氧嘧啶(SME)、磺胺间甲氧嘧啶(SMM)、可替宁(CTN)、氟西汀(FXT)、诺氟沙星(NOR)和氯霉素(CAP).内标物为 SMR- $^{13}\text{C}_6$ 、NOR-D<sub>5</sub>、CAF $^{13}\text{C}_3$ .药品购于 Dr. Ehreastorfer GmbH 公司.

### 1.3 样品前处理

将大气样品剪成 0.5cm 宽的长条状,转移到 50mL PP 离心管中,加入 2ng PFASs 混合内标和 5ng PPCPs 混合内标,涡旋 30s 使其充分混合,静置过夜.加入 15mL 0.1%氨水/甲醇溶液,涡旋 30s 混匀.然后超声萃取 30min,在摇床上于 250r/min 振荡 2h 后,4000r/min 离心 10min 取上清液.将上清液转移到新的 15mL PP 管中.重复超声萃取 30min,然后振荡 1h,离心 8min,将上清液合并到同一 PP 管中.再重复超声萃取一次,转移上清液.将合并的 3 次上清液在温和氮气流下浓缩至 0.5mL 并定容,使用 0.22 $\mu\text{m}$  微孔尼龙滤膜过滤后转入进样小瓶中,于 4 $^{\circ}\text{C}$  保存待 UPLC-MS/MS 分析.

### 1.4 液相色谱/质谱条件

本实验采用超高效液相色谱串联三重四极杆质谱仪(UPLC-MS/MS,1290-6465B,安捷伦)及 C18 色谱柱(Zorbax Eclipse Plus C18,2.1mm $\times$ 50mm,1.8 $\mu\text{m}$ )对大气样品进行定性定量分析.PFASs 的色谱条件:进样量为 5 $\mu\text{L}$ ,柱温 35 $^{\circ}\text{C}$ ,流动相采用 5mmol/L 乙酸铵溶液(A 相)和甲醇(B 相),流速为 0.4mL/min.流动相梯度洗脱程序:0.00~0.10min,A 相比例为 90%;0.10~6.00min,A 相比例由 90%降为 5%;6.00~8.00min,A 相比例为 5%;然后运行 3min.质谱条件:电喷雾离子源;ESI 源负离子模式,采用多反应检测模式(MRM),毛细管电压为 3000V,干燥气温度 250 $^{\circ}\text{C}$ ,雾化器压力为 35psi(240kPa).PPCPs 的色谱条件:进样量为 5 $\mu\text{L}$ ;柱温 40 $^{\circ}\text{C}$ ;无机流动相为 0.1%的甲酸水,有机流动相为乙腈,流速为 0.300mL/min.质谱条件:多反应检测模式(MRM),离子源为 AJSESI,根据化合物的不同性质,分别采用电喷雾正离子源 ESI+和负离子源 ESI-;毛细管电压为 2800V;干燥气温度为 300 $^{\circ}\text{C}$ ,干燥气流速为 7.0L/min;鞘气温度为 300 $^{\circ}\text{C}$ ,鞘气流速为 11.0L/min;雾化器压力为 15psi.

### 1.5 质量保证与质量控制

实验中为了避免出现交叉污染,在实验过程和分析过程中严格控制避免使用可能会影响实验结果的试剂和材料,为了避免聚四氟乙烯材质引入背景干扰,所有实验容器均为聚丙烯材料,所有实验装置和容器在使用前均用甲醇和超纯水进行处理.

表 1 大气中 PFASs 和 PPCPs 的回收率及方法检出限(MDL)  
Table 1 Recoveries and method detection limits (MDL) of PFASs and PPCPs in the atmosphere

化合物名称	回收率(%)	标准偏差(%)	检出限(ng/g)
PFBA	62	7	0.009
PFPeA	63	13	0.002
PFBS	60	3	0.006
4:2FTSA	73	9	0.287
PFHxA	59	8	0.003
PFPeS	67	7	0.008
HFPO-DA	53	17	0.016
PFHpA	68	4	0.01
PFHxS	66	11	0.05
6:2FTSA	104	9	0.123
PFOA	64	3	0.01
PFHpS	68	8	0.011
PFOS	72	9	0.017
PFNA	61	8	0.002
PFNS	62	15	0.029
PFDA	56	3	0.009
N-MeFOSAA	51	5	0.033
PFDS	64	8	0.03
PFUnDA	61	7	0.013
N-EtFOSAA	55	13	0.018
PFOSA	77	6	0.015
11Cl-PF <sub>3</sub> OUdS	86	10	0.012
PFDoDA	64	14	0.007
PFTTrDA	82	17	0.014
PFTeDA	58	15	0.014
SD	52	10	0.033
NOR	63	8	0.098
SMX	73	7	0.057
SME	68	7	0.205
SMM	79	9	0.087
CAP	56	13	0.239
CTM	99	6	0.002
CTN	61	3	0.044
FXT	124	7	0.001

除了 HFPO-DA 和 11Cl-PF<sub>3</sub>OUdS 采用外标法计算回收率,其余 PFASs 和 PPCPs 则是采用内标法计算.采用 9 个 PFASs(0,0.05,0.1,0.5,1,2,5,10,20ng/mL)以及 10 个 PPCPs(0,0.05,0.1,0.5,1,2,5,10,20,50ng/mL)系列浓度梯度的标准曲线,线性系数  $R>0.99$ .每 12 个样品测定 1 次 5ng/mL 的标准品以监

测仪器的稳定性.回收率实验 PFASs 和 PPCPs 的加标含量分别为 2 和 5ng,每组设置了 3 个平行样,相对标准偏差均<15%,PFASs 内标回收率为 51%~104%,PPCPs 的内标回收率为 52%~124%,满足实验要求.本实验的方法检出限(MDL)是实验空白检出的平均值与 3 倍标准偏差的和,若空白中未检出,则取信噪比等于 3 时的含量,方法检出限结果如表 1 所示.实验中每批样品设置 2 个空白样品,空白样品中均未检测出 PFASs 和 PPCPs 目标化合物.

## 1.6 数据处理与分析

本研究采用 IBM SPSS Statistics 25 和 Origin 2018 对数据进行统计分析和作图.

## 2 结果与讨论

### 2.1 PFASs 浓度水平与特征

**2.1.1 PFASs 的浓度水平及特征** 本研究对成都市大气中的 25 种 PFASs 目标化合物进行分析,实验空白均未检出,所有样品中均有 PFASs 的检出,说明 PFASs 在成都地区普遍存在.样品中 PFASs 的浓度水平及检出率见表 2.

在成都市大气中的 25 种 PFASs 目标化合物中,共有 10 种 PFASs 被检出.其中检出率最高的是 PFHpA、PFOA、PFNA、PFDA、PFUnDA 和 PFDoDA(100%),其次是 PFTrDA(95%),PFBA(90%)、6:2FTSA(50%)和 11Cl-PF<sub>3</sub>OUd(50%). $\sum_{10}$ PFASs 的检出范围为 4.58~647.59pg/m<sup>3</sup>,平均值为 140.81pg/m<sup>3</sup>,与浙江(251.93pg/m<sup>3</sup>)<sup>[14]</sup>和北京(157pg/m<sup>3</sup>)<sup>[15]</sup>大气中 $\sum$ PFASs 的浓度处于同一水平.其中,PFBA 的平均浓度最高(133.18pg/m<sup>3</sup>),高于北京市(1.22pg/m<sup>3</sup>)<sup>[15]</sup>和厦门市(2.4pg/m<sup>3</sup>)<sup>[16]</sup>大气中 PFBA 浓度;其次是 PFOA (2.98pg/m<sup>3</sup>),低于浙江省(68.56pg/m<sup>3</sup>)<sup>[14]</sup>和北京市(4.67pg/m<sup>3</sup>)<sup>[15]</sup>大气中 PFOA 浓度;浓度最低的为 PFHpA(1.36pg/m<sup>3</sup>)和 6:2FTSA(1.22pg/m<sup>3</sup>).

在大气中检出的 10 种 PFASs 中,短链 PFASs (C<8)如 PFBA(133.18pg/m<sup>3</sup>)、PFOA(2.98pg/m<sup>3</sup>)、PFHpA(1.36pg/m<sup>3</sup>)和 6:2FTSA(1.22pg/m<sup>3</sup>)相较其它几种长链 PFASs 物质,其浓度比较高.随着碳原子数的增加,长链 PFASs 的检出率和检出浓度明显下降,这可能因为短链 PFASs 的饱和蒸气压较高,比长链 PFASs 更容易从地表水等环境中进入大气环境<sup>[17]</sup>.

表 2 研究区域大气中的 PFASs 含量及检出率

Table 2 Concentrations and detection rate of PFASs in the APM in the present study

日期	PFBA	PFHpA	6:2FTSA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUnDA	11Cl-PF <sub>3</sub> OUdS	PFDoDA	PFTrDA	$\Sigma_{10}$ PFASs
01-05	n.d.	4.64	n.d.	8.87	1.71	2.09	0.71	0.30	0.50	0.31	19.12
01-06	n.d.	1.511	2.07	3.06	0.52	0.61	0.53	0.10	0.45	0.30	9.15
01-07	127.54	0.99	n.d.	3.47	0.74	0.59	0.31	0.13	0.33	0.20	134.29
01-08	96.23	1.80	0.72	4.14	1.46	0.91	0.60	0.06	0.40	0.31	106.63
01-09	11.83	0.78	n.d.	3.61	0.44	0.50	0.34	n.d.	0.34	0.22	18.06
01-10	6.69	2.61	0.74	5.05	1.42	1.89	0.94	0.06	0.71	0.45	20.57
01-11	20.25	3.65	1.17	4.57	1.49	1.43	0.92	0.13	0.79	0.61	35.00
01-12	525.68	2.77	n.d.	4.65	0.89	1.20	0.46	n.d.	0.85	0.60	537.09
01-13	637.14	1.93	1.57	2.55	0.99	1.25	0.79	0.05	0.72	0.60	647.59
01-14	437.70	2.01	0.67	3.62	1.12	0.78	0.76	0.08	0.61	0.48	447.84
01-15	138.33	0.89	0.82	1.68	0.51	0.27	0.27	n.d.	0.20	0.24	143.20
01-16	4.43	0.65	0.72	1.66	0.42	0.29	0.21	0.26	0.28	0.22	9.13
01-17	240.34	0.41	1.67	2.07	0.63	0.43	0.25	0.07	0.42	0.374	246.62
01-18	192.41	0.60	2.08	1.47	0.55	0.32	0.28	n.d.	0.25	0.18	198.15
01-19	3.69	0.70	n.d.	1.55	0.63	0.33	0.45	n.d.	0.33	0.26	7.95
01-20	1.16	0.33	n.d.	1.57	0.49	0.59	0.17	n.d.	0.18	0.10	4.58
01-21	7.61	0.18	n.d.	1.78	0.30	0.24	0.08	n.d.	0.19	n.d.	10.37
01-22	74.09	0.33	n.d.	1.79	0.29	0.28	0.14	n.d.	0.17	0.07	77.15
01-23	5.73	0.26	n.d.	1.05	0.34	0.29	0.30	n.d.	0.26	0.20	8.43
01-24	132.75	0.162	n.d.	1.35	0.24	0.17	0.21	n.d.	0.19	0.21	135.28
平均值	133.18	1.36	1.22	2.98	0.76	0.72	0.44	0.12	0.41	0.31	140.81
含量范围	n.d.~637.14	4.64~0.16	n.d.~2.08	8.87~1.05	0.24~1.71	0.17~2.09	0.08~0.94	n.d.~0.30	0.17~0.88	n.d.~0.61	4.58~647.59
检出率(%)	90	100	50	100	100	100	100	50	100	95	-

注:除检出率外,其余单位均为pg/m<sup>3</sup>,n.d.表示未检出.

大气中 PFBA 和 PFOA 的较高浓度受源排放影响:首要因素为采样点的地理位置,即周围源排放的影响.该点位于成都信息工程大学城市环境气象观测站的楼顶,在距离采样点位 500m 内有一条成都绕城高速,在西北方向 4.5km 范围处是成都双流国际机场,其独特的地理位置使其对周围环境变化具有高度的敏感性.成都绕城高速该路段车流量密集,车辆频繁刹车导致轮胎磨损严重,产生的碎屑中含有橡胶材料,这些材料在摩擦过程中会释放出 PFOA 和 PFBA 等有害化学物质<sup>[18]</sup>,进而对周边大气环境造成污染.其次,成都双流国际机场的地理位置对大气中 PFBA 和 PFOA 的浓度产生了显著影响.机场位于采样点的西北方向,在机场的日常运营过程中, PFOA 作为航空液压油的重要添加剂应用广泛<sup>[19]</sup>.无论是民用还是军用飞机,在飞行和起降过程中都会排放出含有 PFOA 的废气,这导致该区域大气中的 PFOA 浓度相对较高.最后,双流区域周边的工业活动也是导致大气中 PFBA 浓度升高的一个重要因素.该区域内存在多家家具制造企业和大型氟橡胶生产工厂,这些企业在生产过程中所使用的涂料、油漆以及氟橡胶等材料中通常含有 PFBA 成分.在生产和使用过程中,这些有害物质会不断挥发至大气环境中,从而加剧了大气中 PFBA 的浓度.

值得注意的是,虽然 6:2FTSA 在样本中的检出率最低,但是检出浓度( $1.22\text{pg}/\text{m}^3$ )表现出了较高水平.6:2FTSA 作为 PFOS 的替代品,不仅应用于金属和塑料部件的表面处理和氟聚物乳化过程,而且也是水成膜泡沫灭火剂(AFFFs)中新型氟调聚表面活性剂 6:2 氟调聚磺酰胺烷基甜菜碱(6:2FTAB)的降解产物之一<sup>[20]</sup>.因此,导致成都地区大气中 6:2FTSA 浓度如此高的原因可能是双流国际机场以及周边配套消防站因为消防演练使用 AFFFs 而导致其在大气中浓度增加.

由图 1 可看出,除了 1 月 5 日和 6 日外,其余样本中 PFASs 贡献率最大的物质为 PFBA,其平均贡献率为 69%,最高贡献率为 98%.其次为 PFOA(13%)和 PFHpA(5%).PFBA 在大气中 PFASs 占主导地位,这与方淑红等<sup>[21]</sup>对成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征的研究结果一致,这可能是因为它是碳链长度为 4 的短链 PFASs,与碳链长度较长的 PFOA 相比,具有较高的饱和蒸汽压,更容易从土壤和水环境

等介质中迁移至大气环境中<sup>[22]</sup>.而且随着法律法规限制和禁止生产及使用 PFOA 和 PFOS,PFBA 作为 PFOA 的替代品被生产使用,导致 PFBA 具有在大气中含量逐渐升高的趋势<sup>[23]</sup>.其次,PFBA 贡献率差异显著的原因是受气象因素的影响.由于采样天气的不同,例如 1 月 10 日和 1 月 20 日采样是在雨天进行的,雨水冲刷作用导致 PFBA 浓度较低;而其他采样点是在雾霾天气下进行的,PFBA 能够随着大气颗粒物一起发生沉降,因此其贡献率相对较高.

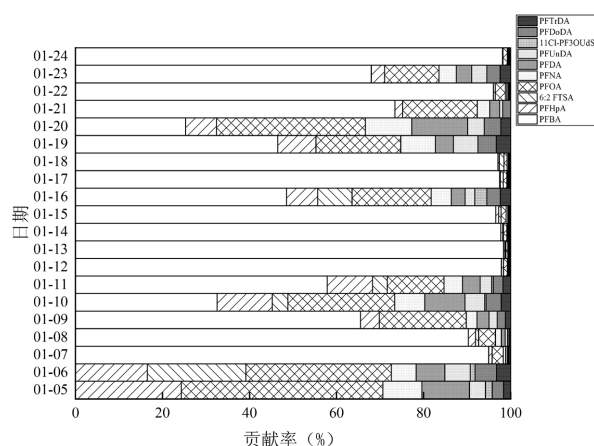


图 1 研究区域大气中 PFASs 组成

Fig.1 Profiles of PFASs in the APM of the study area

2.1.2 PPCPs 的浓度水平及特征 本研究对成都市大气中 9 种 PPCPs 目标化合物进行分析,实验空白均未检出,所有样品中均有 CTN 的检出,说明 CTN 在成都地区普遍存在.样品中 PPCPs 的浓度水平及检出率见表 3.

在研究区域的 9 种 PPCPs 目标化合物中,只检出了可替宁(CTN)且 CTN 检出率为 100%. $\Sigma$ PPCPs 的检出范围为  $34.98\sim 474.00\text{pg}/\text{m}^3$ ,平均值为  $189.88\text{pg}/\text{m}^3$ .CTN 的平均值为  $189.88\text{pg}/\text{m}^3$ ,低于越南河内市( $2186\text{pg}/\text{m}^3$ )<sup>[24]</sup>和马来西亚( $1410\text{pg}/\text{m}^3$ )<sup>[25]</sup>,处于较低水平.大多数 PPCPs 化合物都具有较强的极性和较弱的挥发性,且它们的半衰期都比较短,因此其在大气环境中检出率很低.而 CTN 是唯一被检出且检出率为 100%的 PPCP,造成此结果的原因可能是由于人类大量吸烟导致.CTN 又名烟碱,烟草和电子烟产生的烟雾中含有多种有毒有害物质,其中包括尼古丁.在人体内,大约有 70%~80%的尼古丁会被代谢成左旋可替宁(s-cotinine),左旋可替宁可在体内进一步转化为反式-3'-羟基可替宁(trans-3'-

hydroxy cotinine),约占 33%~40%<sup>[26]</sup>.与其它 PPCPs 物质相比,CTN 的半衰期较长,这意味着它在环境中的持久性更强.在成都市,由于吸烟者众多,这一因素对于大气中 CTN 的高检出率起到了重要作用.彭楠等<sup>[27]</sup>在 2018 年对成都市的吸烟率进行调查,研究结果显示成都市中心城区 15 岁及以上成人的吸烟率为 23.0%,男性吸烟率为 40.6%,女性吸烟率为 3.2%,尽管女性吸烟率相对较低,但整体而言,成都市民具有较高的吸烟率,这直接导致大气中 CTN 的检出率高.其次,位于成都市锦江区的四川中烟工业有限责任公司成都卷烟厂,以及其他烟草工业企业在其生产过程中,存在潜在排放含有尼古丁成分的废气或废水的风险.这些排放物在自然环境中的累积与转化过程,可能进一步对大气中 CTN 的浓度水平产生显著影响.

表 3 研究区域大气中的 PPCPs 含量及检出率

Table 3 Concentrations and detection rate of PPCPs in the APM of the study area

日期	CTN	∑PPCPs
01-05	212.62	212.62
01-06	228.35	228.35
01-07	232.88	232.88
01-08	261.73	261.73
01-09	215.77	215.77
01-10	280.60	280.60
01-11	459.55	459.55
01-12	474.00	474.00
01-13	322.40	322.40
01-14	220.75	220.75
01-15	125.50	125.50
01-16	148.46	148.46
01-17	180.96	180.96
01-18	87.44	87.44
01-19	68.65	68.65
01-20	44.05	44.05
01-21	34.98	34.98
01-22	54.25	54.25
01-23	79.23	79.23
01-24	65.39	65.39
平均值	189.88	189.88
含量范围	34.98~474.00	34.98~474.00
检出率(%)	100	-

注:除检出率外,其余单位均为 $\text{pg}/\text{m}^3$ .

## 2.2 PFASs 的来源解析

本研究对成都市大气中检出率大于 50%的 PFASs 进行主成分分析,其主成分负荷图见图 2.在主成分因子中,第一因子占比 61.1%,第二因子占比

18.0%,第三因子占比 9.4%,可以用于解释成都市大气中 88.5%的 PFASs.

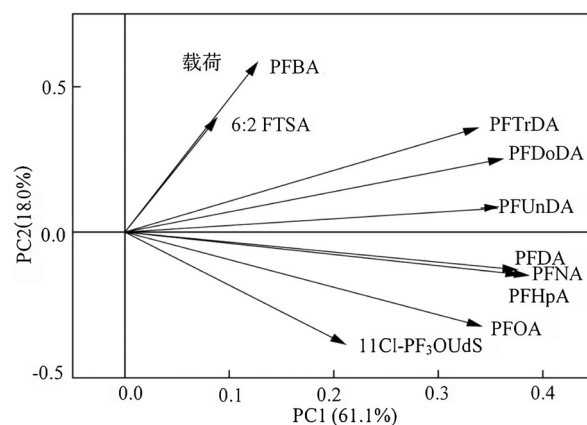


图 2 成都市大气 PFASs 样品的主成分负荷

Fig.2 Principal component loading plots of PFASs samples in the APM of Chengdu city

表 4 PFASs 典型组分的应用<sup>[28-29]</sup>

Table 4 Applications of typical PFASs components

PFASs 名称	应用
PFBA	表面活性剂、润滑剂、助剂等
6:2FTSA	皮革、造纸、消防泡沫、电镀和半导体制造等
PFTTrDA	前体化合物 FTOHs 的降解产物
PFDoDA	前体化合物 FTOHs 的降解产物
PFUnDA	可应用材料中间体的制备
PFNA	合成纺织品等表面活性剂
PFHpA	含氟聚合物的生产以及前体化合物的降解产物
PFDA	前体化合物的降解产物或全氟羧酸生产过程排放
PFOA	纺织品阻燃、橡胶品的乳化、食品包装过程和纸类表面处理、灭火器的使用等
11Cl-PF <sub>3</sub> OUdS	含氟聚合物的生产

表 4 为 PFASs 典型组分的应用.在 PC1 中,PFTrDA、PFDoDA、PFHpA 和 PFDA 具有较高载荷(>0.3),包含 40%的 PFASs 种类.由表 4 可知,这几种物质都是前体物质的降解产物,说明 PC1 所示特征是 PFASs 生产使用后排放至大气中再经过传输后形成的面源污染.PC2 中 PFBA(0.582)和 6:2FTSA (0.390)载荷较高,这可能是由于随着法律法规限制和禁止生产及使用 PFOA 和 PFOS,PFBA 作为 PFOA 的替代品被生产使用<sup>[30]</sup>,6:2FTSA 作为 PFOS 的替代品投入生产使用<sup>[31]</sup>.PFBA 和 6:2FTSA 可用于表面活性剂、纺织业和皮革业等,因此 PC2 可以解释成都市大气中 PFASs 的可能来源为以上行业生产以及使用量增加.综上所述,成都地区大气中 PFASs 主

要来源于有关 PFASs 的表面活性剂、纺织业和皮革业等行业生产使用后排放至大气中形成的面源污染。

### 2.3 PFASs 浓度与 TSP 的相关性分析

对本研究中涉及的 10 种 PFASs 物质与 TSP 做 Spearman 相关性分析。由表 5 可知,成都市大气 PFASs 的物质中除了 6:2FTSA 和 PFBA,其余检出物质均与 TSP 呈显著正相关( $P<0.05$ )。大气中的 PFASs 可分为离子型 PFASs 和挥发性 PFASs,挥发性 PFASs 主要出现在气相中,而离子型 PFASs 常吸附于颗粒物表面<sup>[32]</sup>。有研究表明大气颗粒物在一定程度上对 PFASs 有吸附作用<sup>[13]</sup>,大气颗粒物中含有  $Fe_2O_3$  等对 PFASs 具有较强吸附作用的氧化物<sup>[33]</sup>,而且这些物质能催化 FTOHs 等 PFASs 前体物氧化生成 PFHxA 和 PFHpA 等离子型

PFASs<sup>[34]</sup>。其次,大气颗粒物中含有的有机质具有丰富的官能团和较大的比表面积,可以通过其表面的官能团和比表面积与 PFASs 发生吸附作用,从而影响 PFASs 在大气中的分布和迁移。

值得注意的是,成都市大气中 PFHpA、PFOA、PFNA 和 PFDA 与 TSP 的相关性更显著,这归因于大气颗粒物的酸碱特性以及钙离子( $Ca^{2+}$ )含量的影响。PFHpA、PFOA、PFNA 和 PFDA 均含有羧基( $-COOH$ ),它们容易与碱性物质相互作用。而大气颗粒物中的  $Ca^{2+}$  含量较高<sup>[35-36]</sup>,并且表现出较强的碱性特性<sup>[37]</sup>。这种较高的  $Ca^{2+}$  含量和较强的碱性特性使得 PFHpA、PFOA、PFNA 和 PFDA 更易于通过化学键或吸附作用固着在大气颗粒物上,因此导致了 PFHpA、PFOA、PFNA 和 PFDA 与 TSP 之间存在更为显著的相关性。

表 5 大气中 PFASs 浓度和 TSP 浓度相关系数

Table 5 Correlation coefficient between PFASs concentration and TSP concentration in the atmosphere

物质	TSP	PFBA	PFHpA	6:2FTSA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUnDA	11Cl-PF <sub>3</sub> OUdS	PFDoDA	PFTTrDA
TSP	1.000	0.225	0.739**	0.069	0.773**	0.657**	0.767**	0.693**	0.577**	0.744**	0.647**
PFBA		1.000	0.096	0.273	0.067	0.138	-0.024	0.081	-0.178	0.219	0.308
PFHpA			1.000	0.265	0.859**	0.892**	0.884**	0.877**	0.578**	0.867**	0.804**
6:2FTSA				1.000	0.080	0.324	0.216	0.326	0.331	0.344	0.416
PFOA					1.000	0.764**	0.821**	0.698**	0.547*	0.774**	0.651**
PFNA						1.000	0.894**	0.852**	0.584**	0.810**	0.773**
PFDA							1.000	0.860**	0.556*	0.842**	0.739**
PFUnDA								1.000	0.473*	0.882**	0.827**
11Cl-PF <sub>3</sub> OUdS									1.000	0.531*	0.457*
PFDoDA										1.000	0.925**
PFTTrDA											1.000

注:\*\*表示 $P<0.01$ ; \*表示 $P<0.05$ 。

## 3 结论

3.1 对成都地区大气样品中 25 种 PFASs 目标化合物进行检测分析,共有 10 种 PFASs 被检出,成都地区大气中  $\Sigma_{10}PFASs$  的浓度范围为 4.58~647.56 $\mu g/m^3$ ,平均值为 140.81 $\mu g/m^3$ ,处于较低浓度水平。PFBA 是成都地区主要的 PFASs,平均贡献率为 69%,检出含量也最高(平均值为 133.18 $\mu g/m^3$ )。

3.2 对成都地区大气样品中 9 种 PPCPs 目标化合物进行检测分析,共有 1 种 PPCPs 被检出,成都地区大气中  $\Sigma PPCPs$  的浓度范围为 34.98~474.00 $\mu g/m^3$ ,平均值为 189.88 $\mu g/m^3$ ,处于较低浓度水平。CTN 是成都地区大气样品 PPCPs 目标化合物中唯一被检出

的单体物质。

3.3 主成分分析表明成都地区大气中 PFASs 主要来源于有关 PFASs 的表面活性剂、纺织业和皮革业等行业生产使用后排放至大气中形成的面源污染。

3.4 成都市大气 PFASs 的物质中除了 6:2FTSA 和 PFBA,其余检出物质均与 TSP 呈显著正相关( $P<0.05$ ),这与大气颗粒物中含有  $Fe_2O_3$  氧化物以及有机质有关。

### 参考文献:

- [1] 王菡娟.如何应对新污染物? [N].人民政协报, 2022-04-07(6).  
Wang H J. How to deal with emerging contaminations? [N]. People's Political Consultative Conference Daily, 2022-04-07(6).
- [2] 章 轲.生态环境部:抗生素类物质等多种新污染物将纳入重点管

- 控 [N]. 第一财经日报, 2022-10-13(A02).
- Zhang K. Ministry of Ecology and Environment: Antibiotic substances and other Emerging Contaminations will be included in key control [N]. First Financial Daily, 2022-10-13(A02).
- [3] 刘怡,董文娜,李焯,等.地表水中全氟有机化合物污染现状及其危害研究进展 [J]. 环境工程, 2015,33(2):43-47.
- Liu Y, Dong W N, Li Y, et al. Research progress on pollution status and hazards of perfluorinated organic compounds in surface water [J]. Environmental Engineering, 2015,33(2):43-47.
- [4] 叶露,吴玲玲,蒋雨希,等.PFOS/PFOA 对斑马鱼(*Danio rerio*)胚胎致毒效应研究 [J]. 环境科学, 2009,30(6):1727-1732.
- Ye L, Wu L L, Jiang Y X, et al. Study on the toxic effects of PFOS/PFOA on zebrafish (*Danio rerio*) embryos [J]. Environmental Science, 2009,30(6):1727-1732.
- [5] Unep O. Global PFC Group Synthesis paper on per-and-polyfluorinated-chemicals(PFCs).<https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/synthesis-paper-on-per-and-polyfluorinated-chemicals.htm>,2020-10-10.
- [6] 李雯雯,李高清,范黎明,等.长江口及其毗邻区域中 PPCPs 研究进展 [J]. 环境保护, 2022,50(20):44-50.
- Li W W, Li G Q, Fan L M, et al. Research progress on PPCPs in the Yangtze River Estuary and its adjacent areas [J]. Environmental Protection, 2022,50(20):44-50.
- [7] Smith N P, McEachran D A, Wooten J K, et al. A preliminary evaluation of veterinary antibiotics, estrogens, in vitro estrogenic activity and microbial communities in airborne particulate matter collected near dairy production facilities [J]. Aerobiologia, 2019,35(2): 315-326.
- [8] Xie Z Y, Ebinghaus R, Temme C, et al. Air-sea exchange fluxes of synthetic polycyclic musks in the North sea and the Arctic [J]. Environmental Science & Technology, 2007,41(16):5654.
- [9] Wong F, Shoeib M, Katsoyiannis A, et al. Assessing temporal trends and source regions of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in air under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) [J]. Atmospheric Environment, 2018,172:65-73.
- [10] Vento S D, Halsall C, Gioia R, et al. Volatile per- and polyfluoroalkyl compounds in the remote atmosphere of the western Antarctic Peninsula: an indirect source of perfluoroalkyl acids to Antarctic waters? [J]. Atmospheric Pollution Research, 2012,3(4):450-455.
- [11] Wang X P, Schuster J, Jones K C, et al. Occurrence and spatial distribution of neutral perfluoroalkyl substances and cyclic volatile methylsiloxanes in the atmosphere of the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018,18(12):8745-8755.
- [12] Dreyer A, Matthias V, Temme C, et al. Annual time series of air concentrations of polyfluorinated compounds [J]. Environmental Science and Technology, 2009,43(11):4029-4036.
- [13] Murakami M, Takada H. Perfluorinated surfactants (PFSS) in size-fractionated street dust in Tokyo [J]. Chemosphere, 2008,73(8): 1172-1177.
- [14] 李冰洁,陈金媛,刘铮铮,等.浙江省大气颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 [J]. 环境科学, 2022,43(2):639-648.
- Li B J, Chen J Y, Liu Z Z, et al. Analysis of pollution characteristics and health risk assessment of perfluorinated compounds in PM<sub>2.5</sub> atmospheric particulate matter in Zhejiang Province [J]. Environmental Science, 2022,43(2):639-648.
- [15] 郑宇.典型城市大气中全氟化合物的污染特征 [D]. 青岛:青岛大学, 2020.
- Zheng Y. Pollution characteristics of perfluorinated compounds in typical urban atmosphere [D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.
- [16] 王思权.城市大气中全/多氟化合物的污染特征、气/粒分配及湿沉降研究 [D]. 厦门:厦门大学, 2021.
- Wang S Q. Pollution characteristics, gas/particle partitioning and wet deposition of per-/polyfluorinated compounds in urban atmosphere [D]. Xiamen University, 2021.
- [17] 何鹏飞,张鸿,李静,等.深圳市大气中全氟化合物的残留特征 [J]. 环境科学, 2016,37(4):1240-1247.
- He P F, Zhang H, Li J, et al. Residual characteristics of perfluorinated compounds in the atmosphere of Shenzhen [J]. Environmental Science, 2016,37(4):1240-1247.
- [18] 陈诗艳,仇雁翎,朱志良,等.土壤中全氟和多氟烷基化合物的污染现状及环境行为 [J]. 环境科学研究, 2021,34(2):468-478.
- Chen S Y, Qiu Y L, Zhu Z L, et al. Pollution status and environmental behavior of perfluorinated and polyfluorinated alkyl compounds in soil [J]. Environmental Science Research, 2021,34(2):468-478.
- [19] 夏小雨,吴明红,徐刚,等.上海特征性点源周边环境水体中全氟化合物的环境行为特性 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2019,25(2): 266-274.
- Xia X Y, Wu M H, Xu G, et al. Environmental behavior characteristics of perfluorinated compounds in environmental waters around Shanghai characteristic point sources [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2019,25(2):266-274.
- [20] Urriaga A, Soriano A, Carrillo-Abad J. BDD anodic treatment of 6:2fluorotelomer sulfonate (6:2FTSA). Evaluation of operating variables and by-product formation [J]. Chemosphere, 2018,201:571-577.
- [21] 方淑红,朱和祥,叶芝祥,等.成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 [J]. 环境科学, 2019,40(12):5265-5271.DOI: 10.13227/j.hjcx.201906186.
- Fang S H, Zhu H X, Ye Z X, et al. Pollution characteristics and exposure risk assessment of perfluorinated compounds in road dust in Chengdu [J]. Environmental Science, 2019,40(12):5265-5271.DOI: 10.13227/j.hjcx.201906186.
- [22] 李姝亭,胡冠九,罗小三.大气环境中全(多)氟烷基化合物(PFASs)的来源、分布及健康风险研究进展 [J]. 生态环境学报, 2023,32(12): 2103-2114.
- Li S T, Hu G J, Luo X S. Research progress on sources, distribution, and health risks of per- and polyfluoroalkyl compounds (PFASs) in the atmospheric environment [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023,32(12):2103-2114.
- [23] Ding G, Xue H, Yao Z, et al. Occurrence and distribution of perfluoroalkyl substances (PFASs) in the water dissolved phase and suspended particulate matter of the Dalian Bay, China [J]. Chemosphere, 2018,200:116-123.
- [24] Duong H T, Kadokami K, Nguyen D T, et al. Occurrence, potential sources, and risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in atmospheric particulate matter in Hanoi, Vietnam [J].

- Environmental Science and Pollution Research, 2023,30(12):34814-34826.
- [25] Yang J, Ching Y C, Kadokami K. Occurrence and exposure risk assessment of organic micropollutants in indoor dust from Malaysia [J]. Chemosphere, 2022,287:132340.
- [26] Benowitz N L, Hukkanen J, Jacob III P. Nicotine chemistry, metabolism, kinetics and biomarkers [J]. Nicotine psychopharmacology, 2009:29-60.
- [27] 彭 楠,叶晓舸,马 林,等.成都市成人吸烟率及吸烟者戒烟状况分析 [C]//中国控制吸烟协会.中国控制吸烟协会第 19 届全国控烟学术研讨会论文摘要.成都市疾病预防控制中心, 2018:1.
- Peng N, Ye X G, Ma L, et al. Analysis of smoking rates and smoking cessation conditions among adults in Chengdu [C]//China Association on Tobacco Control. Abstracts of the 19th National Tobacco Control Academic Symposium. Chengdu Center for Disease Control and Prevention, 2018:1.
- [28] 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.
- Li F S, Ni H, Huang H Y, et al. Spatial distribution and source analysis of perfluorinated compounds in soil in some cities of Anhui Province [J]. Environmental Science, 2017,38(1):327-332.
- [29] 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.
- Huang Chushan, Ma Pengcheng, Wang Xiaojiao, et al. Study on pollution characteristics of perfluorinated compounds in farmland soil in Huize County, Yunnan Province [J]. Ecotoxicology, 2017,12(6): 233-241.
- [30] 刘世轲,田浩廷,刘 艳,等.土壤与沉积物中全氟化合物污染现状及来源解析研究进展 [J]. 安徽农学通报, 2023,29(2):122-128.
- Liu S K, Tian H T, Liu Y, et al. Research progress on pollution status and source analysis of perfluorinated compounds in soil and sediments [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2023,29(2):122-128.
- [31] 盛 南,戴家银,郭 勇.新型 6:2 氟调聚磺酸生态毒理研究进展 [J]. 有机氟工业, 2020,(3):45-50,64.
- Sheng N, Dai J Y, Guo Y. Research progress on ecotoxicology of new 6:2 fluorinated polymer sulfonic acid [J]. Organic Fluorine Industry, 2020,(3):45-50,64.
- [32] 刘 云,高晓花,周 原,等.中国全氟和多氟化合物的污染特征及其去除技术评述 [J]. 青海环境, 2023,33(4):196-203.
- Liu Y, Gao X H, Zhou Y, et al. Review of pollution characteristics and removal technologies of perfluorinated and polyfluorinated compounds in China [J]. Qinghai Environment, 2023,33(4):196-203.
- [33] Styler S A, Myers A L, Donaldson D J. Heterogeneous photooxidation of fluorotelomer alcohols: a new source of aerosol-phase perfluorinated carboxylic acids [J]. Environmental science & technology, 2013,47(12):6358-6367.
- [34] 史亚利,蔡亚岐.全氟和多氟化合物环境问题研究 [J]. 化学进展, 2014,26(4):665-681.
- Shi Y L, Cai Y Q. Research on environmental issues of perfluorinated and polyfluorinated compounds [J]. Chemical Progress, 2014,26(4): 665-681.
- [35] 刘永春,贺 泓.大气颗粒物化学组成分析 [J]. 化学进展, 2007, (10):1620-1631.
- Liu Y C, He H. Analysis of chemical composition of atmospheric particulate matter [J]. Chemical Progress, 2007,(10):1620-1631.
- [36] 于艳科,尹丽倩,牛振川,等.中国海峡西岸城市群冬季  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  中水溶性离子的污染特征 [J]. 中国环境科学, 2012,32(9):1546-1553.
- Yu Y K, Yin L Q, Niu Z C, et al. Pollution characteristics of water-soluble ions in  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  in the western coastal cities of China in winter [J]. China Environmental Science, 2012,32(9):1546-1553.
- [37] 孙 韧,张文具,董海燕,等.天津市  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中水溶性离子化学特征及来源分析 [J]. 中国环境监测, 2014,30(2):145-150.
- Sun R, Zhang W J, Dong H Y, et al. Chemical characteristics and source analysis of water-soluble ions in  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  in Tianjin [J]. China Environmental Monitoring, 2014,30(2):145-150.

**作者简介:** 张 芸(2002-),男,四川泸州人,成都信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为新污染物的环境行为.1950460157@qq.com.