

# SCIEX Online SPE-Triple Quad 系统测定水质中75种全氟及多氟烷基化合物

## Determination of Per-and Polyfluoroalkyl Substances in Water matrix by SCIEX Online SPE-Triple Quad

张小刚, 张崇, 郇宇, 杨总, 刘冰洁

Zhang Xiaogang, Zhang Chong, Huan Yu, Yang Zong, Liu Bingjie

SCIEX应用技术中心, 上海

**关键词:** 在线固相萃取 (On-line SPE), 水质, 全氟及多氟烷基化合物

### 前言

全氟及多氟烷基化合物 (PFAS) 是一类人工合成的有机氟化合物, 因其独特的疏水、疏油性和化学稳定性, 被广泛应用于工业生产和消费品中。然而, PFAS具有持久性、生物累积性和毒性, 对环境和人类健康构成严重威胁。它们难以在自然环境中降解, 可在水体、土壤和生物体内长期存在, 并通过食物链累积, 最终影响人类健康。研究表明, PFAS暴露可能导致内分泌紊乱、免疫抑制、肝脏损伤、发育毒性甚至癌症。

在水环境中, PFAS污染尤为突出。由于其在工业生产、消防泡沫、纺织品和食品包装中的广泛使用, PFAS通过废水排放、雨水冲刷等途径进入水体。它们在水中的浓度通常极低 (ng/L级别), 据相关报道对生态系统和人体健康产生显著影响。此外, PFAS具有高度流动性, 可在地下水和地表水中长距离迁移, 导致污染范围扩大。

为了准确监测水中的PFAS污染, 液质联用 (LC-MS) 技术因其高灵敏度和高选择性成为首选分析方法。然而, 水样基质复杂, PFAS浓度极低, 传统的前处理方法 (如离线固相萃取) 步骤繁琐、耗时长且易引入误差。在线固相萃取 (On-line SPE) 结合 LC-MS技术能够实现自动化、高效、精准的分析。On-line SPE可直接处理复杂水样, 减少人为操作误差, 提高分析效率, 同时降低检测限, 适用于痕量PFAS的检测。该技术在水环境监测中具有重要应用价值, 为PFAS污染的控制和治理提供了可靠的技术支持,

有助于更好地评估污染风险并制定有效的管理措施。

基于此, 该实验建立了一种On-line SPE系统和SCIEX Triple Quad系统联用, 分析水质中75种全氟及多氟烷基化合物的分析方法。

### 本方法具有以下特点:

- 1、通量大:** 无需复杂前处理过程, 一针进样分析检测75种全氟及多氟烷基化合物, 种类覆盖广和全;
- 2、灵敏度高:** 75种全氟及多氟烷基化合物采用On-line SPE富集, 可实现ng/L浓度的测定, 具有超高的灵敏度, 完全满足国内外标准的检测需求;
- 3、方法学参数:** 方法经过多次验证, 稳定性好, 线性相关性好, 回收率高, 例如针对饮用水标准中GB/T 5750.8-2023中的全氟化合物回收率在84.9-117.7%间, 精密度小于10%;
- 4、兼容性好:** 设备可以在On-line SPE-MS/MS和常规的UPLC-MS/MS之间快速切换, 操作简单快捷, 满足常规检测和大体积进样的无缝对接的需求;

### 试验方法

#### 1. 样品前处理

移取水样8 mL于50 mL具盖离心管中, 加入浓度为50 µg/L的混合同位素内标工作溶液8 µL及浓度为1mol/L的乙酸铵溶液32 µL, 混匀, 然后8000 r/min 离心5 min, 取上清液供仪器测定。

## 2. 液相条件

色谱柱及流动相条件：分析柱：Poroshell 120 EC-C18 (100×2.1mm, 2.7 μm)；捕集柱：Omega PS C18 (100×3.0 mm, 3 μm)；流速0.4 mL/min；流动相A：水（含4 mM乙酸铵）；B：乙腈，梯度见表1。

SPE柱及流动相条件：EVOLUTE EXPRESS ABN(30×2.1 mm, 20 μm)；A：4mM乙酸铵水溶液（含0.02%甲酸）、B：甲醇，梯度见表2。

阀切换程序见表3。

柱温：40 °C

梯度洗脱条件：

表1. 泵1 流动相洗脱程序

| 时间   | 流速mL/min | A % | B % |
|------|----------|-----|-----|
| 0    | 0.4      | 80  | 20  |
| 2    | 0.4      | 80  | 20  |
| 8    | 0.4      | 5   | 95  |
| 11   | 0.4      | 5   | 95  |
| 11.5 | 0.4      | 80  | 20  |
| 16   | 0.4      | 80  | 20  |

表2 泵2 流动相洗脱程序

| 时间  | 流速mL/min | A % | B % |
|-----|----------|-----|-----|
| 0   | 1        | 100 | 0   |
| 2   | 1        | 100 | 0   |
| 2.2 | 1        | 0   | 100 |
| 7   | 1        | 0   | 100 |
| 7.1 | 2        | 100 | 0   |
| 16  | 2        | 100 | 0   |

表3 阀切换程序

| 时间 | 处理命令 |
|----|------|
| 0  | A    |
| 2  | B    |
| 10 | A    |

## 3. 质谱条件

SCIEX Triple Quad系统

离子源：ESI源，负离子模式

离子源参数：

IS电压：4500 V

气帘气：30 psi

雾化气GS1：50 psi

辅助气GS2：55 psi

源温度TEM：350 °C

碰撞气CAD：9

表4. 75种全氟及多氟烷基化合物的质谱参数

| 化合物名称                  | ID          | 母离子   | 子离子   | 去簇电压 DP(V) | 碰撞能量 CE(eV) |
|------------------------|-------------|-------|-------|------------|-------------|
| 全氟-1-辛烷磺酰胺             | FOSA-1      | 497.8 | 77.9  | -30        | -95         |
|                        | FOSA-2      | 497.8 | 477.8 | -30        | -34         |
| 双[2-(全氟己基)乙基]磷酸        | 6:2diPAP-1  | 789   | 79.1  | -80        | -150        |
|                        | 6:2diPAP-2  | 789   | 96.8  | -80        | -85         |
| 双(2-(全氟辛基))磷酸          | 8:2diPAP-1  | 988.7 | 542.8 | -100       | -34         |
|                        | 8:2diPAP-2  | 988.7 | 79.1  | -100       | -125        |
| 双全氟辛基磷酸                | 8:8 PFPI-1  | 900.7 | 500.8 | -20        | -90         |
|                        | 8:8 PFPI-2  | 900.7 | 63    | -20        | -110        |
| 1H, 1H, 2H, 2H-全氟己烷磺酸  | 4:2 FTS-1   | 326.9 | 306.8 | -50        | -29         |
|                        | 4:2 FTS-2   | 326.9 | 81.1  | -50        | -52         |
| 1H, 1H, 2H, 2H-全氟癸烷磺酸  | 8:2 FTS-1   | 526.9 | 506.8 | -50        | -37         |
|                        | 8:2 FTS-2   | 526.9 | 80.9  | -50        | -84         |
| 1H, 1H, 2H, 2H-全氟十二烷磺酸 | 10:2 FTS-1  | 626.8 | 606.8 | -80        | -44         |
|                        | 10:2 FTS-2  | 626.8 | 80.9  | -80        | -108        |
| 3-全氟戊基丙酸               | 5:3 FTCA-1  | 340.9 | 236.9 | -40        | -17         |
|                        | 5:3 FTCA-2  | 340.9 | 216.9 | -40        | -32         |
| 2-全氟己基乙酸               | 6:2 FTCA-1  | 376.9 | 293   | -30        | -19         |
|                        | 6:2 FTCA-2  | 376.9 | 62.8  | -30        | -9          |
| 3-全氟庚基丙酸               | 7:3 FTCA-1  | 440.9 | 337   | -45        | -16         |
|                        | 7:3 FTCA-2  | 440.9 | 317   | -45        | -28         |
| 全氟辛基乙酸                 | 8:2 FTCA-1  | 476.9 | 393   | -40        | -19         |
|                        | 8:2 FTCA-2  | 476.9 | 62.9  | -40        | -31         |
| 2H-全氟-2-辛烯酸            | 6:2 FTUCA-1 | 356.8 | 292.9 | -40        | -17         |
|                        | 6:2 FTUCA-2 | 356.8 | 243   | -40        | -46         |

表4. 75种全氟及多氟烷基化合物的质谱参数 (续)

| 化合物名称                     | ID             | 母离子   | 子离子   | 去簇电压 DP(V) | 碰撞能量 CE(eV) |
|---------------------------|----------------|-------|-------|------------|-------------|
| 2H-全氟-2-癸烯酸               | 8:2 FTUCA-1    | 456.9 | 393   | -40        | -16         |
|                           | 8:2 FTUCA-2    | 456.9 | 342.9 | -40        | -52         |
| 1H,1H,2H,2H-全氟-1-辛醇       | 6:2 FTOH-1     | 426.9 | 407   | -20        | -34         |
|                           | 6:2 FTOH-2     | 426.9 | 80.9  | -20        | -74         |
| 全氟-3,6-二噁庚酸               | 3,6-OPFHpA-1   | 295   | 201   | -5         | -10         |
|                           | 3,6-OPFHpA-2   | 295   | 85    | -5         | -30         |
| 2H,2H,3H,3H-全氟癸酸          | 4HPFUnA-1      | 490.9 | 387   | -60        | -18         |
|                           | 4HPFUnA-2      | 490.9 | 367   | -60        | -30         |
| 1H,1H,2H,2H-全氟辛基膦酸        | 6:2 PAP-1      | 443   | 97    | -63        | -31         |
|                           | 6:2 PAP-2      | 443   | 79.1  | -63        | -83         |
| 8Cl-全氟辛烷磺酸                | 8Cl-PFOS-1     | 514.8 | 79.9  | -30        | -100        |
|                           | 8Cl-PFOS-2     | 514.8 | 98.9  | -30        | -97         |
| 9-氯全氟-3-壬氧基磺酸             | 9CL-PF3ONS-1   | 530.8 | 350.9 | -40        | -37         |
|                           | 9CL-PF3ONS-2   | 530.8 | 82.9  | -40        | -67         |
| 11氯-3氧杂全氟十一烷磺酸            | 11Cl-PF3OUdS-1 | 630.9 | 450.8 | -50        | -41         |
|                           | 11Cl-PF3OUdS-2 | 630.9 | 83    | -50        | -84         |
| 8-氯-(全氟辛基)膦酸              | Cl-PFOPA       | 515   | 79    | -120       | -91         |
| 2-(N-乙基全氟辛基磺酰胺)乙醇         | EtFOSE-1       | 569.9 | 419   | -40        | -28         |
|                           | EtFOSE-2       | 569.9 | 219   | -40        | -35         |
| 全氟丁基磺酰胺                   | FBSA-1         | 298   | 78    | -55        | -48         |
|                           | FBSA-2         | 298   | 119   | -55        | -25         |
| 全氟正己基磺酰胺                  | FHxSA-1        | 398   | 78    | -20        | -66         |
|                           | FHxSA-2        | 398   | 169   | -20        | -36         |
| 全氟辛烷磺酰氨基乙酸                | FOSAA-1        | 556   | 498   | -19        | -40         |
|                           | FOSAA-2        | 556   | 419   | -19        | -37         |
| 全氟-2-丙氧基丙酸                | HFPO-DA-1      | 328.9 | 185   | -20        | -29         |
|                           | HFPO-DA-2      | 328.9 | 169   | -20        | -15         |
| 7H-十二氟庚酸                  | HPFHpA-1       | 345   | 280.9 | -45        | -14         |
|                           | HPFHpA-2       | 345   | 130.9 | -45        | -31         |
| 九氟-N-(2-羟乙基)-N-甲基丁烷-1-磺酰胺 | MeFBSE-1       | 356.9 | 292.9 | -30        | -16         |
|                           | MeFBSE-2       | 356.9 | 242.9 | -30        | -45         |

| 化合物名称                   | ID            | 母离子   | 子离子   | 去簇电压 DP(V) | 碰撞能量 CE(eV) |
|-------------------------|---------------|-------|-------|------------|-------------|
| N-[3-(二甲基氨基)丙基]十三氟己烷磺酰胺 | N-AP-FHxSA-1  | 482.9 | 168.9 | -160       | -35         |
|                         | N-AP-FHxSA-2  | 482.9 | 318.9 | -160       | -32         |
| N-乙基全氟辛烷磺酰胺             | N-EtFOSA-1    | 526   | 168.9 | -58        | -38         |
|                         | N-EtFOSA-2    | 526   | 218.9 | -58        | -33         |
| N-乙基全氟-1-辛烷磺酰胺乙酸        | N-EtFOSAA-1   | 584   | 419   | -40        | -27         |
|                         | N-EtFOSAA-2   | 584   | 219   | -40        | -35         |
| N-甲基全氟辛烷磺酰胺             | N-MeFOSA-1    | 511.9 | 168.9 | -30        | -36         |
|                         | N-MeFOSA-2    | 511.9 | 218.9 | -30        | -34         |
| N-甲基全氟辛烷磺酰乙酸            | N-MeFOSAA-1   | 570   | 419   | -40        | -27         |
|                         | N-MeFOSAA-2   | 570   | 218.9 | -40        | -34         |
| 2-(N-甲基全氟辛基磺酰胺)乙醇       | N-MeFOSE-1    | 616   | 59    | -20        | -70         |
|                         | N-MeFOSE-2    | 602   | 45    | -20        | -70         |
| 全氟-3,7-二甲基辛酸            | PF-3,7-DMOA-1 | 512.8 | 468.9 | -50        | -12         |
|                         | PF-3,7-DMOA-2 | 512.8 | 218.9 | -50        | -28         |
| 全氟十二烷磺酸                 | PFDoS-1       | 699   | 80    | -80        | -115        |
|                         | PFDoS-2       | 699   | 99    | -80        | -100        |
| 全氟癸基膦酸                  | PFDPA         | 599   | 79.2  | -100       | -102        |
| 全氟对乙基环己基磺酸              | PFecHS-1      | 501   | 81.9  | -120       | -106        |
|                         | PFecHS-2      | 501   | 100.9 | -120       | -95         |
| 全氟(2-乙氧基乙烷)磺酸           | PFEESA-1      | 314.9 | 134.9 | -120       | -30         |
|                         | PFEESA-2      | 314.9 | 83    | -120       | -23         |
| 全氟辛基膦酸                  | PFOPA         | 499   | 78.9  | -75        | -107        |
| 全氟十五烷酸                  | PFPeDA-1      | 762.9 | 719   | -70        | -20         |
|                         | PFPeDA-2      | 762.9 | 168.8 | -70        | -39         |
| 全氟十三烷酸                  | PFTTrDS-1     | 748.9 | 79.8  | -40        | -130        |
|                         | PFTTrDS-2     | 748.9 | 98.9  | -40        | -125        |
| 全氟-1-十一烷磺酸              | PFUnS-1       | 648.9 | 79.8  | -70        | -120        |
|                         | PFUnS-2       | 648.9 | 98.9  | -70        | -115        |
| 全氟己基全氟辛基次膦酸             | 6:8 PFPi-1    | 800.9 | 500.9 | -20        | -78         |
|                         | 6:8 PFPi-2    | 800.9 | 400.9 | -20        | -78         |
| 1H,1H,2H,2H-甲基丙烯酸全氟癸酯   | 8:2 FTMA-1    | 530.9 | 350.8 | -100       | -35         |
|                         | 8:2 FTMA-2    | 530.9 | 82.8  | -100       | -69         |

表4. 75种全氟及多氟烷基化合物的质谱参数（续）

| 化合物名称                   | ID          | 母离子   | 子离子   | 去簇电压 DP(V) | 碰撞能量 CE(eV) | 化合物名称                | ID                                  | 母离子   | 子离子   | 去簇电压 DP(V) | 碰撞能量 CE(eV) |
|-------------------------|-------------|-------|-------|------------|-------------|----------------------|-------------------------------------|-------|-------|------------|-------------|
| 2-(全氟癸基)甲基丙烯酸乙酯         | 10:2 FTMA-1 | 630.9 | 450.9 | -70        | -41         | 全氟十八酸                | PFODA-1                             | 913   | 868.9 | -70        | -22         |
|                         | 10:2 FTMA-2 | 630.9 | 82.9  | -70        | -85         |                      | PFODA-2                             | 913   | 168.9 | -70        | -38         |
| 2H-全氟-2-十二烯酸            | FDUEA-1     | 556.9 | 492.9 | -60        | -18         | 全氟丁基磺酸               | PFBS-1                              | 298.9 | 80    | -70        | -60         |
|                         | FDUEA-2     | 556.9 | 442.9 | -60        | -57         |                      | PFBS-2                              | 298.9 | 99    | -70        | -48         |
| 全氟-3,6,9-三氧杂十一烷-1,11-二酸 | PF8O3A2-1   | 437.1 | 229.1 | -50        | -30         | 全氟戊基磺酸               | PFPeS-1                             | 349   | 80    | -80        | -80         |
|                         | PF8O3A2-2   | 437.1 | 323   | -50        | -20         |                      | PFPeS-2                             | 349   | 99    | -80        | -80         |
| 全氟辛基磺酰氟                 | POSF-1      | 500.9 | 81.8  | -120       | -109        | 全氟己基磺酸               | PFHxS-1                             | 398.9 | 80    | -70        | -80         |
|                         | POSF-2      | 500.9 | 100.8 | -120       | -92         |                      | PFHxS-2                             | 398.9 | 99    | -70        | -80         |
| 全氟丁酸                    | PFBA        | 213   | 168.9 | -30        | -11         | 全氟庚基磺酸               | PFHpS-1                             | 448.7 | 79.9  | -100       | -85         |
| 全氟戊酸                    | PFPeA-1     | 263   | 218.9 | -30        | -11         |                      | PFHpS-2                             | 448.7 | 98.9  | -100       | -80         |
|                         | PFPeA-2     | 263   | 63    | -30        | -29         | 全氟辛基磺酸               | PFOS-1                              | 498.9 | 80    | -60        | -100        |
| 全氟己酸                    | PFHxA-1     | 312.9 | 268.9 | -35        | -13         |                      | PFOS-2                              | 498.9 | 99    | -60        | -95         |
|                         | PFHxA-2     | 312.9 | 119   | -35        | -26         | 全氟壬基磺酸               | PFNS-1                              | 549   | 80    | -80        | -100        |
| 全氟庚酸                    | PFHpA-1     | 362.9 | 318.9 | -35        | -15         |                      | PFNS-2                              | 549   | 99    | -80        | -95         |
|                         | PFHpA-2     | 362.9 | 168.9 | -35        | -21         | 全氟癸基磺酸               | PFDS-1                              | 598.8 | 79.9  | -100       | -100        |
| 全氟辛酸                    | PFOA-1      | 412.9 | 368.9 | -35        | -15         |                      | PFDS-2                              | 598.8 | 98.9  | -100       | -100        |
|                         | PFOA-2      | 412.9 | 168.9 | -35        | -25         | 4,8-二氧-3H-全氟壬酸       | ADONA-1                             | 376.9 | 251   | -10        | -14         |
| 全氟壬酸                    | PFNA-1      | 462.9 | 418.9 | -40        | -14         |                      | ADONA-2                             | 376.9 | 84.9  | -10        | -34         |
|                         | PFNA-2      | 462.9 | 218.9 | -40        | -23         | 9-氯-全氟-3-氧杂九磺酸       | 9Cl-PF3ONS-1                        | 530.9 | 351   | -50        | -36         |
| 全氟癸酸                    | PFDA-1      | 512.9 | 468.9 | -60        | -16         |                      | 9Cl-PF3ONS-2                        | 532.9 | 353   | -50        | -36         |
|                         | PFDA-2      | 512.9 | 218.9 | -60        | -24         | 双1H,1H,2H,2H-全氟癸基磷酸酯 | 8:2diPAP-1                          | 988.7 | 542.8 | -100       | -34         |
| 全氟十一酸                   | PFUdA-1     | 562.9 | 518.9 | -60        | -19         |                      | 8:2diPAP-2                          | 988.7 | 79.1  | -100       | -100        |
|                         | PFUdA-2     | 562.9 | 268.9 | -60        | -26         | 1H,1H,2H,2H-全氟辛基磺酸   | 6:2FTS-1                            | 426.8 | 407   | -20        | -34         |
| 全氟十二酸                   | PFDoA-1     | 612.8 | 568.8 | -60        | -19         |                      | 6:2FTS-2                            | 426.8 | 80.9  | -20        | -74         |
|                         | PFDoA-2     | 612.8 | 168.9 | -60        | -31         | 1H,1H,2H,2H-全氟十二烷基磺酸 | 10:2FTS-1                           | 626.8 | 606.8 | -80        | -44         |
| 全氟十三酸                   | PFTTrDA-1   | 662.8 | 618.8 | -60        | -17         |                      | 10:2FTS-2                           | 626.8 | 80.9  | -80        | -108        |
|                         | PFTTrDA-2   | 662.8 | 168.9 | -60        | -34         | 双全氟己基膦酸              | 6:6 PFPI-1                          | 700.9 | 400.8 | -27        | -72         |
| 全氟十四酸                   | PFTeDA-1    | 712.8 | 668.8 | -30        | -17         |                      | 6:6 PFPI-2                          | 700.9 | 62.9  | -27        | -100        |
|                         | PFTeDA-2    | 712.8 | 168.9 | -30        | -37         | 内标1                  | <sup>13</sup> C <sub>4</sub> -PFBA  | 217   | 172   | -30        | -13         |
| 全氟十六酸                   | PFHxDA-1    | 813   | 768.9 | -70        | -20         | 内标2                  | <sup>13</sup> C <sub>5</sub> -PFPeA | 268   | 223   | -30        | -11         |
|                         | PFHxDA-2    | 813   | 168.9 | -70        | -35         | 内标3                  | <sup>13</sup> C <sub>5</sub> -PFHxA | 318   | 273   | -35        | -11         |
|                         |             |       |       |            |             | 内标4                  | <sup>13</sup> C <sub>4</sub> -PFHpA | 367   | 322   | -35        | -14         |

表4. 75种全氟及多氟烷基化合物的质谱参数（续）

| 化合物名称 | ID                                      | 母离子   | 子离子  | 去簇电压 DP(V) | 碰撞能量 CE(eV) |
|-------|-----------------------------------------|-------|------|------------|-------------|
| 内标5   | <sup>13</sup> C <sub>8</sub> -PFOA      | 421   | 376  | -35        | -15         |
| 内标6   | <sup>13</sup> C <sub>9</sub> -PFNA      | 472   | 427  | -40        | -14         |
| 内标7   | <sup>13</sup> C <sub>6</sub> -PFDA      | 519   | 474  | -60        | -16         |
| 内标8   | <sup>13</sup> C <sub>7</sub> -PFUnDA    | 570   | 525  | -60        | -15         |
| 内标9   | <sup>13</sup> C <sub>2</sub> -PFDoA     | 615   | 570  | -60        | -19         |
| 内标10  | <sup>13</sup> C <sub>2</sub> -PFTeDA    | 715   | 670  | -30        | -17         |
| 内标11  | <sup>13</sup> C <sub>3</sub> -PFBuS     | 302   | 80   | -70        | -65         |
| 内标12  | <sup>13</sup> C <sub>8</sub> -PFOS      | 507   | 80   | -60        | -96         |
| 内标13  | <sup>13</sup> C <sub>3</sub> -PFHxS     | 402   | 80   | -70        | -75         |
| 内标14  | <sup>13</sup> C <sub>8</sub> -FOSA      | 506   | 78   | -30        | -91         |
| 内标15  | D3-N-MePFOSAA                           | 573   | 419  | -30        | -27         |
| 内标16  | D5-N-EtPFOSAA                           | 589   | 419  | -58        | -27         |
| 内标17  | <sup>13</sup> C <sub>2</sub> -4:2 FTS   | 329   | 309  | -50        | -29         |
| 内标18  | <sup>13</sup> C <sub>2</sub> -6:2 FTS   | 429   | 81   | -20        | -74         |
| 内标19  | <sup>13</sup> C <sub>2</sub> -8:2 FTS   | 529   | 509  | -50        | -37         |
| 内标20  | <sup>13</sup> C <sub>4</sub> 8:2 -diPAP | 992.9 | 96.9 | -100       | -98         |

4. 实验结果

4.1 75种全氟及多氟烷基化合物的典型离子提取色谱图（见图1）

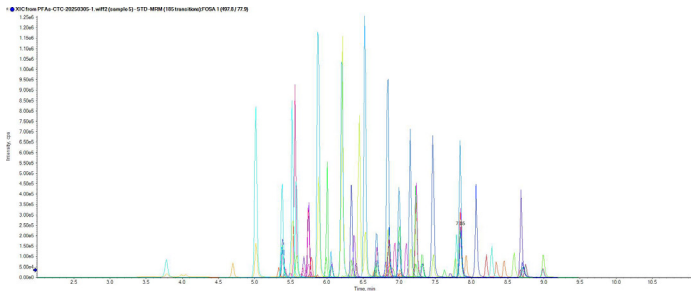


图1. 75种全氟及多氟烷基化合物的典型离子提取色谱图

4.2 线性回归方程

采用水样本加标，配置浓度在1-100 ng/L范围内的系列标准曲线，全部75种化合物线性关系良好，相关系数r均大于0.995，见图2。

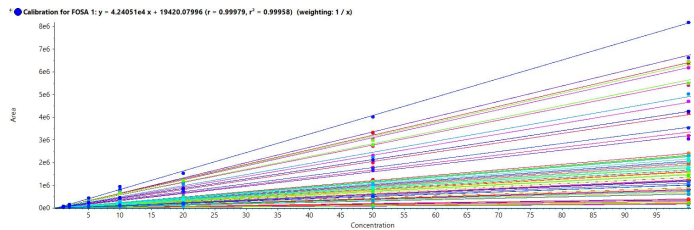


图2. 75种全氟及多氟烷基化合物的线性关系曲线

4.3 回收率与精密度

在水质样本中分别添加浓度为5.0 ng/L、10.0 ng/L、50.0 ng/L的全氟及多氟烷基化合物，每个浓度6个平行，绝大部分化合物的提取回收率在70-130%间，精密度在15%以内；以GB/T 5750.8-2023中测定的11种全氟化合物为例，其回收率及相对标准偏差（RSD）如表5所示。

表5. 11种全氟化合物回收率与精密度

| 化合物   | 添加量(ng/L) | 回收率(%) | RSD(%) |
|-------|-----------|--------|--------|
| PFBA  | 5.0       | 105.4  | 6.6    |
|       | 10.0      | 100.9  | 4.9    |
|       | 50.0      | 104.1  | 1.3    |
| PFPeA | 5.0       | 110.6  | 1.5    |
|       | 10.0      | 109.2  | 1.8    |
|       | 50.0      | 112.0  | 1.8    |
| PFBS  | 5.0       | 111.5  | 6.5    |
|       | 10.0      | 104.3  | 6.8    |
|       | 50.0      | 110.4  | 4.5    |
| PFHxA | 5.0       | 115.5  | 2.6    |
|       | 10.0      | 104.1  | 5.2    |
|       | 50.0      | 117.7  | 8.3    |
| PFHpA | 5.0       | 91.8   | 6.0    |
|       | 10.0      | 84.9   | 7.7    |
|       | 50.0      | 92.0   | 6.7    |

表5. 11种全氟化合物回收率与精密度（续）

| 化合物   | 添加量(ng/L) | 回收率(%) | RSD(%) |
|-------|-----------|--------|--------|
| PFHxS | 5.0       | 105.0  | 6.7    |
|       | 10.0      | 93.2   | 7.9    |
|       | 50.0      | 103.1  | 6.6    |
| PFOA  | 5.0       | 108.8  | 5.3    |
|       | 10.0      | 108.0  | 5.9    |
|       | 50.0      | 102.4  | 4.6    |
| PFHpS | 5.0       | 101.8  | 8.3    |
|       | 10.0      | 104.7  | 7.1    |
|       | 50.0      | 88.3   | 9.0    |
| PFNA  | 5.0       | 97.4   | 4.4    |
|       | 10.0      | 104.5  | 5.9    |
|       | 50.0      | 114.8  | 5.5    |
| PFOS  | 5.0       | 108.1  | 7.3    |
|       | 10.0      | 106.0  | 5.2    |
|       | 50.0      | 108.0  | 6.6    |
| PFDA  | 5.0       | 100.1  | 7.5    |
|       | 10.0      | 105.7  | 7.2    |
|       | 50.0      | 106.9  | 4.7    |

4.4 实际样本测试

取真实环境水质样本进行检测，结果显示诸多阳性检出，例如PFHxA及PFBS两种全氟化合物，测定值分别为27.94 ng/L、6.32 ng/L，结果表明该方法足以满足环境水质样本的检测需求。

总结

本研究开发了一种结合On-line SPE系统与SCIEX Triple Quad系统的分析方法，用于检测水质中的75种全氟及多氟烷基化合物。该方法前处理步骤简便，显著节省了时间和人力成本，提升了工作效率；其灵敏度高、重复性和准确性好，经过多次实际样品测试，结果稳定可靠，在环境水质样本中检测具有重要的参考意义。

SCIEX临床诊断产品线仅用于体外诊断。仅凭处方销售。这些产品并非在所有国家地区都提供销售。获取有关具体可用信息，请联系当地销售代表或查阅<https://sciex.com.cn/diagnostics>。所有其他产品仅用于研究。不用于临床诊断。本文提及的商标和/或注册商标，也包括相关的标识、标志的所有权，归属于AB Sciex Pte. Ltd. 或在美国和/或某些其他国家地区的各权利所有人。

© 2025 DH Tech. Dev. Pte. Ltd. MKT-36605-A



SCIEX中国  
北京分公司  
北京市昌平区生命科学园科学园路  
18号院A座一层  
电话：010-5808-1388  
传真：010-5808-1390  
全国咨询电话：800-820-3488, 400-821-3897

上海公司及中国区应用支持中心  
上海市长宁区福泉北路518号  
1座502室  
电话：021-2419-7201  
传真：021-2419-7333  
官网：[sciex.com.cn](https://sciex.com.cn)

广州办公室  
广州国际生物岛星岛环北路1号  
B2栋501、502单元  
电话：020-8842-4017  
官方微信：[SCIEX-China](#)