

中国核仪器行业协会团体标准

压水堆一回路常规阴阳离子、锌离子
在线监测—离子色谱法编制说明
(征求意见稿)

编制说明

标准起草工作组

2026 年 8 月

《压水堆一回路常规阴阳离子、锌离子在线监测——离子色谱法》

编制说明

（征求意见稿）

一、工作简况

1、任务来源

本标准是根据中国核仪器行业协会团体标准立项安排，针对压水堆核电厂一回路冷却剂中常规阴阳离子及锌离子的在线监测需求展开标准制定。本标准由中国核电工程有限公司牵头起草，青岛盛瀚色谱技术有限公司、三门核电有限公司、江苏核电有限公司、上海核工程研究设计院股份有限公司共同参与编制，标准于2026年3月完成立项，计划编制周期为12个月。

2、主要工作过程

编制组在收集并充分消化吸收国内外相关标准、期刊论文及核电现场运行经验的基础上，结合压水堆一回路冷却剂高硼酸基体的样品特点，开展离子色谱在线监测方法开发和实验数据收集工作，并制定了标准编制原则。编制组根据标准编制原则，完成了标准草案核心章节的编写。随后，编制组内部对草案内容进行了数次校核和修改，并组织开展了核电现场验证试验。2026年7月，编制组根据内部评审意见对草案进行了修改完善，形成了征求意见稿。

3、主要参加单位和工作组成员及其所作的工作等

编制组牵头单位为中国核电工程有限公司，负责标准制定的整体策划、进度管理及标准文本的形式审查，并会同青岛盛瀚色谱技术有限公司、三门核电有限公司、上海核工程研究设计院股份有限公司共同开展离子色谱在线监测分析方法的研究工作。其中，青岛盛瀚色谱技术有限公司负责基体消除技术、预处理技术及色谱条件优化等；三门核电有限公司和江苏核电有限公司共同负责核电厂现场的验证试验与优化完善。中国核仪器行业协会在标准制定过程中全程提供形式审查与技术指导，保障标准文本的规范性与科学性。

二、标准编制原则和主要内容

1、标准编制原则

本标准的编制符合一回路加锌技术在国内核电的发展趋势以及一回路冷却

剂水质在线监测的迫切需求，本着先进性、科学性、合理性和可操作性的原则以及标准的目标、统一性、协调性、实用性、一致性和规范性原则来进行本标准的制定工作。

(1) 科学性

本标准在实施了大量离子色谱仪测量一回路冷却剂中常规阴离子 (F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-})、常规阳离子 (Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+) 及 Zn^{2+} 浓度的方法条件测试和现场实测数据验证的基础上，参考国内外核电水化学检测方法，对团体标准进行编写。

(2) 实用性

本标准规定了使用离子色谱仪在线监测一回路冷却剂中常规阴阳离子及 Zn^{2+} 的全过程，包括标准溶液配制、样品测量、数据处理等环节建立规范，以大量验证数据作为依据，具备科学性、客观性，从而达到准确、实时监测一回路冷却剂中目标离子浓度的目的。

2、标准主要内容的依据

按 GB/T 1.1—2020 的规定，确定本标准总体结构如下：

- 范围；
- 规范性引用文件；
- 术语和定义；
- 方法原理；
- 试剂与材料；
- 仪器和设备；
- 分析步骤；
- 精密度；
- 检测下限；
- 试验报告；
- 附录（参考色谱工作条件）。

2.1 关于第 4 章（方法原理）内容的说明

第 4 章的内容基于离子色谱法的基本原理，结合压水堆一回路冷却剂高硼酸基体的特点，分别阐述了常规阴离子、常规阳离子及 Zn^{2+} 的测定原理。其中，常

规阴离子测定采用四硼酸钠梯度淋洗方式以降低高硼酸基体干扰； Zn^{2+} 测定采用在线富集技术，以克服直接电导法在 $\mu\text{g/L}$ 级别检出限不足的问题。

2.2 关于第 5 章至第 6 章内容的说明

第 5~6 章的内容基于离子色谱仪相关标准方法描述，以及对测量过程的条件选择、参数设置、干扰消除等进行的验证和优化。

2.3 关于第 8 章（精密度）内容的说明

第 8 章的精密度是依据 JJG 823-2014 离子色谱仪检定规程第 5.2.2.8 条规定，选取质控样进行测量，连续进样 6 次，记录色谱峰的保留时间和峰面积或峰高，计算相对标准偏差 RSD_6 。各离子精密度要求均不大于 3%。

2.4 关于第 9 章（检测下限）内容的说明

第 9 章的检测下限是选取线性最低点的检测浓度进行测定，记录色谱图，由色谱峰高和基线噪声计算检出限。

3、解决的主要问题

压水堆核电厂向一回路冷却剂中加锌，在使用合金 690 作为蒸发器传热管材料的电站中能够有效降低堆芯外辐射场，压水堆的加锌技术已在海外众多核电厂得到广泛应用并取得良好成效。美国电力研究院（EPRI）发布的《压水堆一回路锌应用手册》指出：用于降低堆芯外辐射场的冷却剂锌浓度为 $10 \pm 5 \mu\text{g/L}$ 。镍基合金是压水堆核电厂一回路主要结构材料，核电厂通过监测一回路冷却剂中镍含量判断系统腐蚀情况。对于采用加锌技术的压水堆机组而言，为避免锌-镍置换可能导致的燃料包壳积垢以及进而引发的轴向功率迁移（AOA），需要更加密切地监测一回路冷却剂中的镍浓度。EPRI 要求，如果系统中镍的含量超过 $6 \mu\text{g/L}$ 时禁止加锌，监测频率要求为 1 次/周。

压水堆核电厂使用硼酸作为可溶中子吸收剂，因此一回路冷却剂为硼酸基体溶液。硼酸的存在（通常浓度为 mg/L 级）给水中微量锌离子及阴、阳离子的测定带来干扰。反应堆一回路冷却剂中氯离子的存在会破坏系统表面的氧化膜，特别是在系统中有溶解氧的情况下，氯离子的存在会加速系统的应力腐蚀风险。当氯离子进入材料的氧化物保护膜后，会破坏保护膜的完整性，裸露的金属表面与氧化物膜构成电位差，加速腐蚀过程。为此国内压水堆核电厂都将氯离子作为重要控制指标之一，对一回路冷却剂中的氯离子含量作了严格限定。

目前国内大多数核电厂采用人工手动取样，送实验室用离子色谱法、原子吸收光谱法、原子发射光谱法等进行分析，不仅增加人员的劳动强度和辐射受照，而且人工取样分析具有一定的滞后性，不能及时反映系统中离子含量及变化趋势。与常规的取样分析相比，在线分析技术具有无须进行化学处理、连续测量、实时提供测量结果以便于工艺参数调整，并可实现远距离操作等显著优点。离子色谱法作为微量离子分析技术，在分析测定阴、阳离子、离子型化合物方面具有灵敏、快速、准确度高、选择多样等显著优点。因此，建立一套可在核电厂现场长期稳定运行、自动连续监测的标准化在线监测方法，实现对冷却剂中关键离子的实时监控，具有重要的工程意义。

三、主要试验（或验证）情况

本标准方法开发的技术路线如下：



图 1 压水堆一回路冷却剂常规阴阳离子及锌离子在线监测方法的开发技术路线
图

1、色谱柱选型及色谱方法开发优化

离子色谱柱作为离子色谱仪的核心部件，对离子的分离起到了至关重要的作用。色谱柱选型工作主要是根据不同色谱柱的特性，选择常规阴离子、常规阳离

子及 Zn^{2+} 分离度较好且峰型好的色谱柱进行测试, 并根据选出的色谱柱进行色谱方法的开发及优化。

色谱填料的制备是色谱柱性能的基础。针对核反应堆冷却剂高辐照强度、高浓度硼酸共存的具体工况条件, 通过引发剂、单体、交联剂和功能基化试剂的优选, 研究色谱填料制备的最佳配方与合成工艺, 考察色谱填料耐高辐照机制及高选择性原理, 系统研究辐照、硼酸共存以及氧化环境下色谱填料的分离行为, 制备具有耐高辐照及抗强基体干扰的色谱填料, 在应用中实现对核反应堆冷却剂阴、阳离子的高选择性检测。

在阳离子色谱柱方面, 开发了一种高性能的 SH-NC-3L 色谱柱, 用于硼酸基体中常规阳离子 (Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+) 的定性定量分析。通过采用先进的合成与功能化技术, 制备出粒度均匀、含有羧基官能团的阳离子交换树脂, 以优化色谱分离性能。同时, 针对痕量 Zn^{2+} 分析的特殊需求, 开发了一种高性能的强酸性阳离子色谱柱 SH-NC-2, 采用 2.5 mM 甲烷磺酸与 0.8 mM 草酸混合淋洗液, 结合在线富集技术, 满足 $\mu\text{g/L}$ 级别 Zn^{2+} 的检测要求。

在阴离子色谱柱方面, 开发了一种高性能的 SH-NA-1 型阴离子色谱柱, 用于硼酸基体中痕量阴离子 (F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-}) 的定性定量分析。通过采用先进的合成与功能化技术, 制备出粒度均匀、合适容量的阴离子交换树脂, 结合四硼酸钠梯度淋洗方式, 有效克服高浓度硼酸基体的干扰, 实现痕量阴离子的准确测定。

通过对比测试及方案优化, 选择最优的分析方法及测试谱图如下:

表 1 常规阴离子分析方法

色谱柱	SH-NA-1	流量	1.5 mL/min
柱温	35 °C	池温	35 °C
抑制器电流	120 mA	淋洗液浓度	40 mM 四硼酸钠
进样量	2000 μL	检测方式	抑制电导法

淋洗液为二元梯度洗脱, 其中 A 为 40 mM 四硼酸钠溶液, B 为纯水, 梯度见下表:

表 2 梯度洗脱条件

	时间 (min)	A1 (%)	B1 (%)	流量 (mL/min)
1	0	8.0	92.0	1.5

	时间 (min)	A1 (%)	B1 (%)	流量 (mL/min)
2	8.0	8.0	92.0	1.5
3	27.0	35.0	65.0	1.5
4	27.1	8.0	92.0	1.5

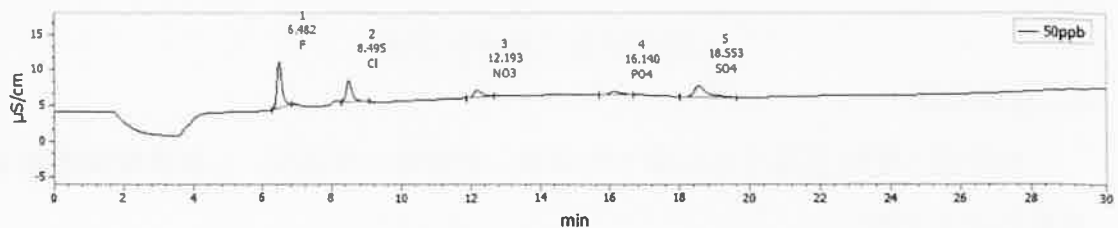


图2 阴离子色谱分离图

阳离子色谱分析方法见表3，阳离子色谱分离图见图3。

表 3 常规阳离子分析方法

色谱柱	SH-NC-3L	流量	1.0 mL/min
柱温	35 °C	池温	35 °C
抑制器电流	20 mA	淋洗液浓度	5 mM 甲烷磺酸
进样量	25 μL	检测方式	抑制电导法

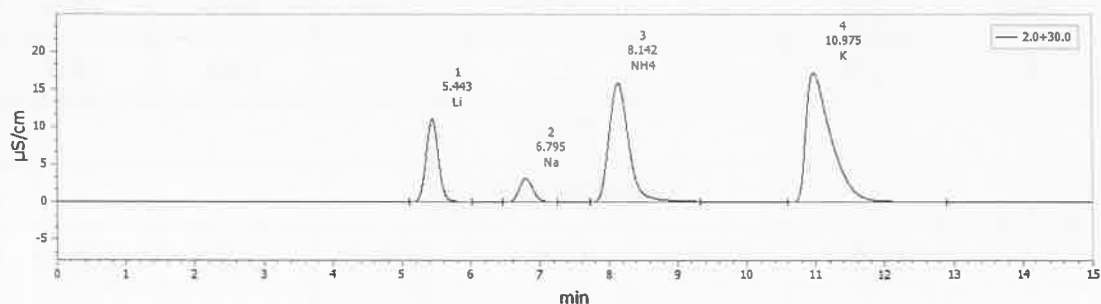


图3 阳离子色谱分离图

阳离子色谱分析方法见表4，阳离子色谱分离图见图4。

表 4 锌离子分析方法

色谱柱	SH-NC-2	流量	1.0 mL/min
柱温	35 °C	池温	35 °C
检测方式	直接电导法	淋洗液浓度	2.5 mM 甲烷磺酸 +0.8 mM 草酸
进样量	20000 μL		

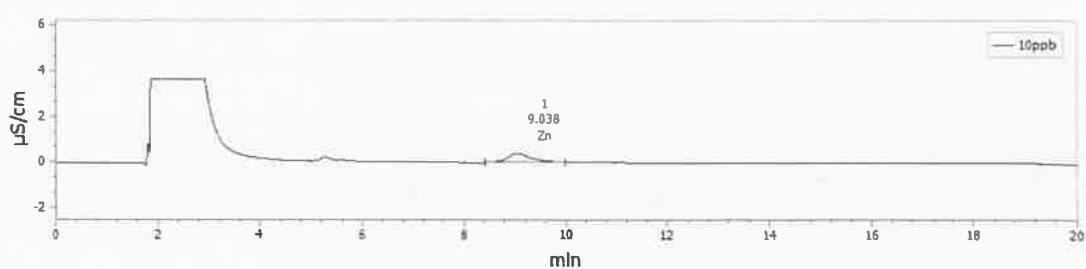


图4 锌离子色谱分离图

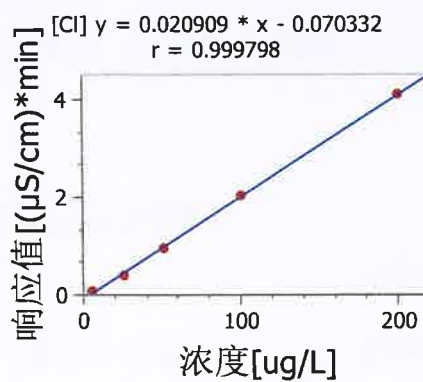
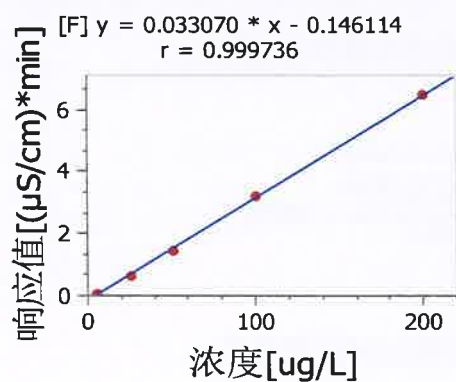
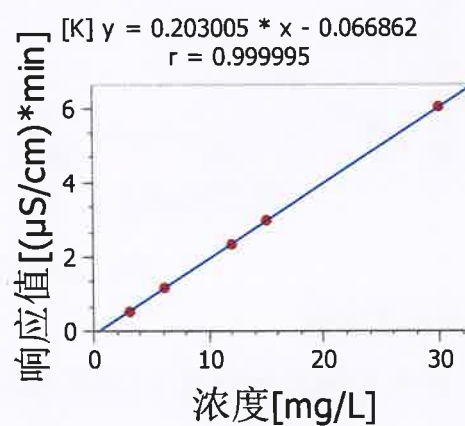
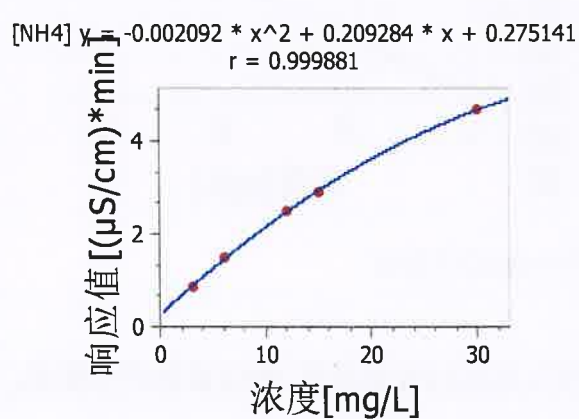
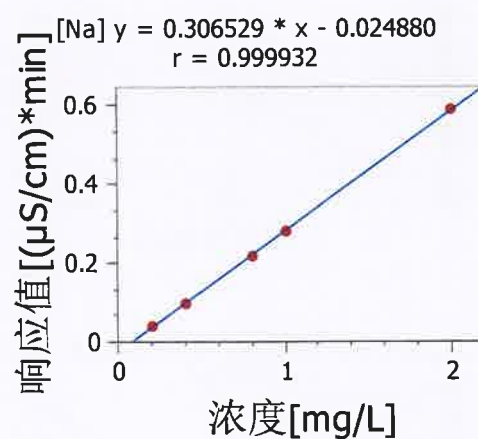
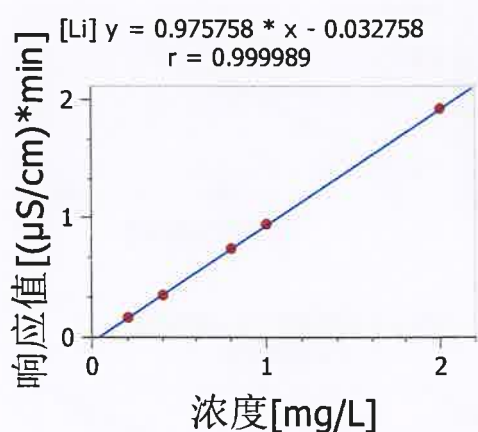
2、线性测试

按照表 5 配制各离子的标准工作溶液，并绘制工作曲线。工作曲线线性相关系数均大于 0.995。

表 5 各离子线性浓度

阳离子						
离子种类	标液线性浓度 mg/L					质控样
	标液 1	标液 2	标液 3	标液 4	标液 5	
Li^+	0.2	0.4	0.8	1.0	2.0	1.2
Na^+	0.2	0.4	0.8	1.0	2.0	1.2
NH_4^+	3.0	6.0	12.0	15.0	30.0	18.0
K^+	3.0	6.0	12.0	15.0	30.0	18.0
阴离子						
离子种类	标液线性浓度 $\mu\text{g}/\text{L}$					质控样
	标液 1	标液 2	标液 3	标液 4	标液 5	
F^-	5	25	50	100	200	75
Cl^-	5	25	50	100	200	75
NO_3^-	5	25	50	100	200	75
PO_4^{3-}	5	25	50	100	200	75
SO_4^{2-}	5	25	50	100	200	75
锌离子						
离子种类	标液线性浓度 $\mu\text{g}/\text{L}$					质控样
	标液 1	标液 2	标液 3	标液 4	标液 5	
Zn^{2+}	3	6	10	20	30	15

各离子线性测试结果见图 5。



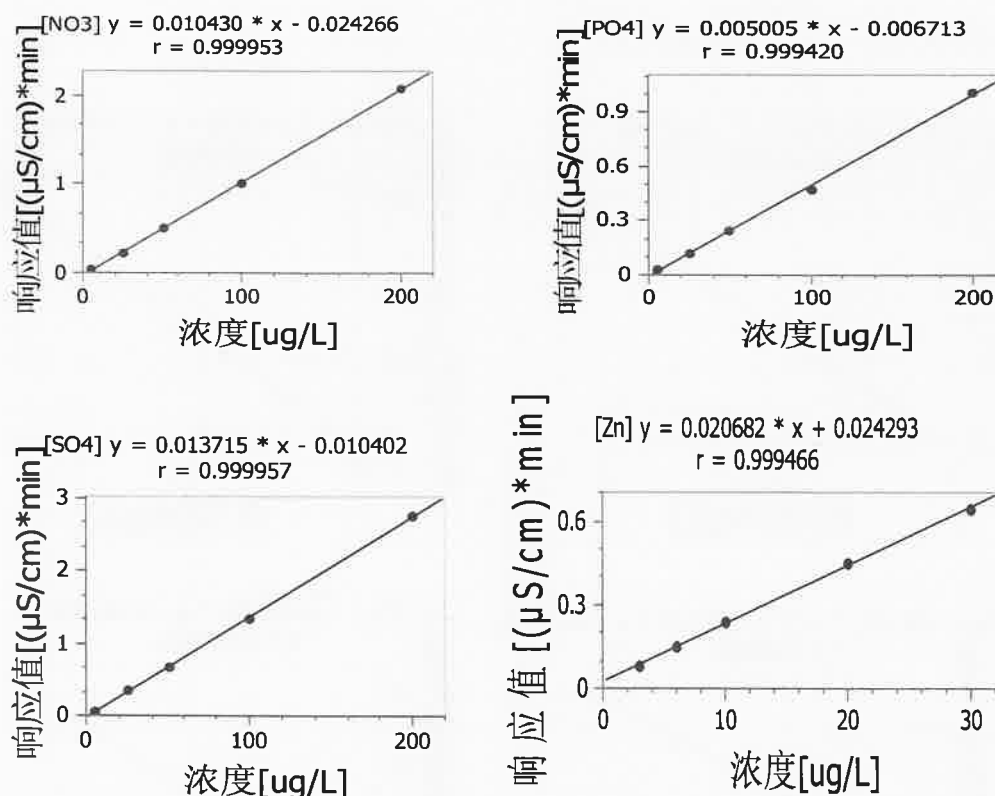


图5 各离子线性测试结果图

3、精密度试验

参考JJG823-2014离子色谱仪检定规程第5.2.2.8条规定:按仪器说明书要求,打开仪器,待仪器稳定后,选取质控样进行测量,连续进样6次,记录色谱峰的保留时间和峰面积或峰高,按式(1)计算相对标准偏差RSD。

$$RSD_{6\text{ 定性(定量)}} = \frac{1}{\bar{X}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (X_i - \bar{X})^2}{6-1}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$RSD_{6\text{ 定性(定量)}}$ ——定性(定量)测量重复性相对标准偏差;

X_i ——第*i*次测得的保留时间和峰面积或峰高;

$\bar{X}$ ——6次测量结果的算术平均值;

i——测量序号。

各离子精密度测试结果见图6。

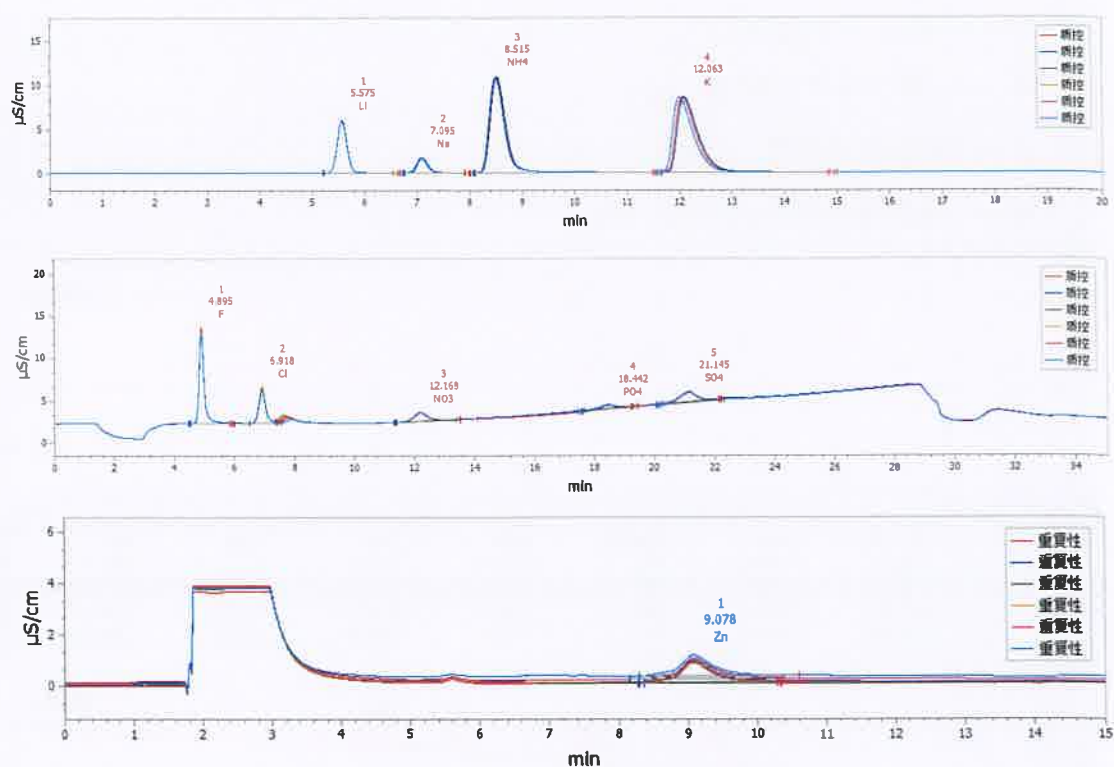


图6 各离子精密度测试谱图

表 6 各离子精密度测试结果表

离子	Li ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	F ⁻	Cl ⁻
保留时间 RSD%	0.03	0.13	0.15	0.33	0.07	0.11
峰面积 RSD%	0.56	0.47	0.50	0.56	1.28	0.71
离子	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	Zn ²⁺		
保留时间 RSD%	0.13	0.04	0.03	0.12		
峰面积 RSD%	1.00	1.03	0.53	0.89		

4、检出限测试

选取线性最低点的检测浓度进行测定, (Li⁺、Na⁺、NH₄⁺、K⁺进样量为 25 μL; F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、PO₄³⁻进样量为 2000 μL; Zn²⁺进样量 20 mL, 记录色谱图, 由色谱峰高和基线噪声, 按式 (2) 计算检出限 C_D。

$$C_D = \frac{2H_{Nc}}{H} \quad (2)$$

式中:

C_D ——检出限, $\mu\text{g/mL}$;
 H_N ——基线噪声峰峰值, μS ;
 c ——标准溶液浓度, $\mu\text{g/mL}$;
 H ——标准溶液的色谱峰高, μS 。

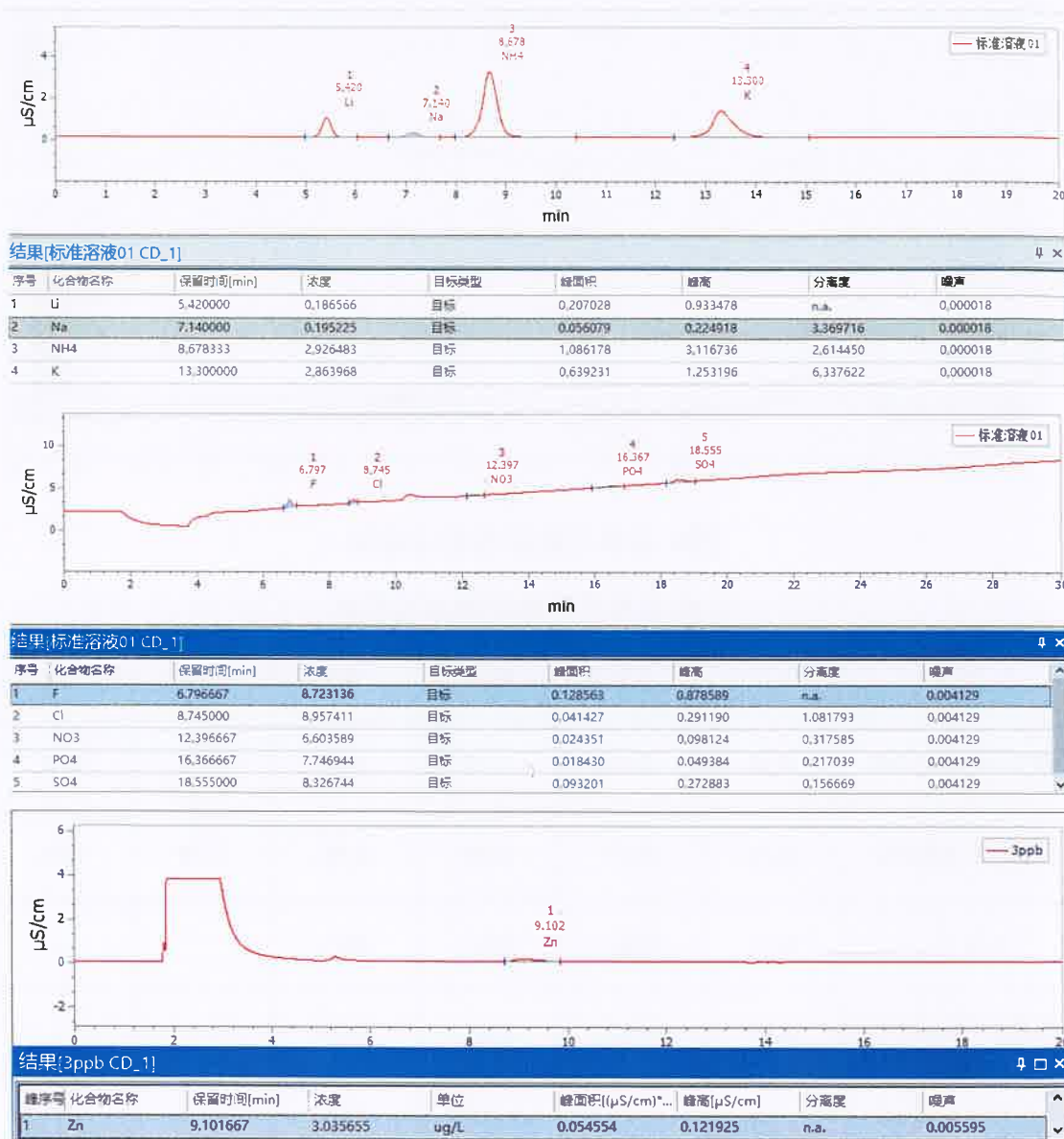


图 7 线性最低点原始数据图

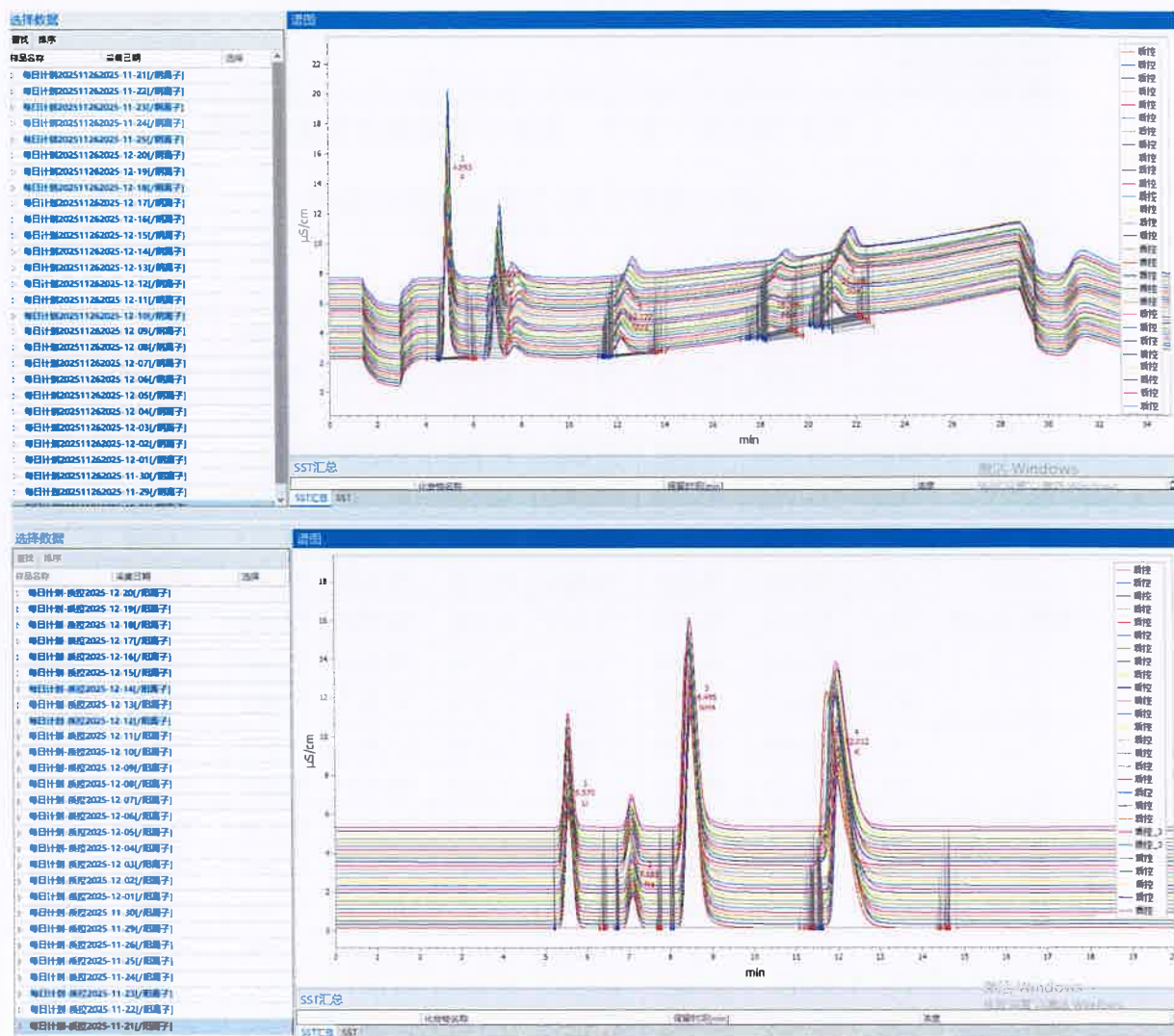
表 7 检出限计算结果表

离子	Li ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	
检出限 $\mu\text{g/L}$	0.01	0.03	0.03	0.09	
离子	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻

检出限 $\mu\text{g/L}$	0.05	0.14	0.42	0.84	0.15
离子	Zn^{2+}				
检出限 $\mu\text{g/L}$	0.28				

5、长期稳定性验证

通过连续一个月长期稳定性运行，验证了方法的准确性、可靠性，技术成果已具备标准化转化的条件。



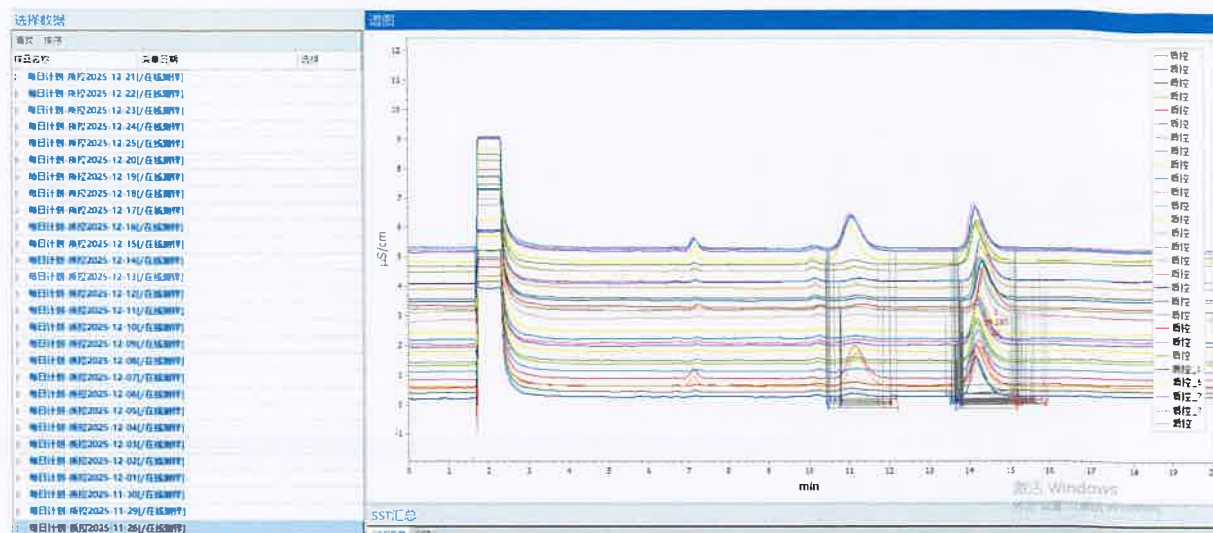


图 8 常规阴阳离子、锌离子长期稳定性叠加谱图

表 8 阴离子 30 天稳定性原始数据

测试日期	阴离子	1	2	3	4	5	6	平均值 μg/L	RSD%
2025.11.21	F ⁻	75.147	73.801	75.486	75.617	75.600	73.363	74.836	1.33
	Cl ⁻	71.075	70.340	70.349	70.009	70.953	70.005	70.455	0.65
	NO ₃ ⁻	70.774	70.656	70.502	70.685	70.816	70.089	70.587	0.38
	PO ₄ ³⁻	75.319	74.280	75.642	75.895	75.219	74.515	75.145	0.84
	SO ₄ ²⁻	71.776	70.358	72.042	72.286	70.177	70.429	71.178	1.34
2025.11.22	F ⁻	75.854	73.425	75.518	74.611	75.763	74.517	74.948	1.26
	Cl ⁻	70.804	70.445	70.338	70.532	70.528	70.493	70.523	0.22
	NO ₃ ⁻	70.354	72.312	70.173	70.183	70.530	70.623	70.696	1.15
	PO ₄ ³⁻	74.465	74.239	75.331	75.316	75.545	75.367	75.044	0.73
	SO ₄ ²⁻	70.007	70.818	70.817	71.616	70.357	70.404	70.670	0.79
2025.11.23	F ⁻	75.406	74.304	75.042	75.349	75.864	74.510	75.079	0.78
	Cl ⁻	71.125	69.861	71.089	71.142	70.629	70.687	70.755	0.70
	NO ₃ ⁻	70.155	70.604	70.086	70.167	70.365	72.122	70.583	1.10
	PO ₄ ³⁻	74.417	74.544	74.886	75.693	75.211	74.087	74.806	0.78
	SO ₄ ²⁻	70.897	70.948	72.452	71.913	70.518	71.708	71.406	1.03
2025.11.24	F ⁻	77.261	74.310	75.886	75.670	75.406	73.590	75.354	1.70
	Cl ⁻	70.071	69.705	70.570	70.555	70.071	71.394	70.394	0.84
	NO ₃ ⁻	70.083	70.279	70.299	71.359	70.027	70.593	70.440	0.70
	PO ₄ ³⁻	75.161	75.407	75.256	74.256	75.623	73.128	74.805	1.26
	SO ₄ ²⁻	71.391	70.731	70.235	70.467	72.111	72.398	71.222	1.25
2025.11.25	F ⁻	75.701	74.407	75.588	75.874	75.753	74.472	75.299	0.89
	Cl ⁻	69.860	69.267	70.879	69.749	72.407	69.796	70.326	1.63
	NO ₃ ⁻	70.097	71.028	70.064	70.100	69.696	70.445	70.238	0.65
	PO ₄ ³⁻	75.089	75.396	74.612	75.528	75.416	73.952	74.999	0.81
	SO ₄ ²⁻	71.948	70.623	72.898	71.776	71.533	70.943	71.620	1.12
2025.11.26	F ⁻	75.641	75.103	75.239	75.403	75.658	74.956	75.333	0.38

	Cl ⁻	72.904	72.353	72.007	73.293	72.883	70.210	72.275	1.53
	NO ₃ ⁻	71.605	70.958	69.710	70.325	68.671	69.968	70.206	1.45
	PO ₄ ³⁻	77.323	76.558	74.992	74.460	71.642	73.605	74.764	2.74
	SO ₄ ²⁻	71.146	73.206	70.977	70.238	70.391	72.223	71.363	1.60
2025.11.27	F ⁻	74.452	74.538	74.027	73.720	74.406	74.754	74.316	0.51
	Cl ⁻	71.597	71.406	70.984	70.962	71.455	71.521	71.321	0.39
	NO ₃ ⁻	70.779	70.908	70.366	70.280	70.803	71.283	70.737	0.52
	PO ₄ ³⁻	76.160	75.495	75.006	75.979	74.574	75.492	75.451	0.79
	SO ₄ ²⁻	70.693	72.830	72.756	71.182	71.471	72.115	71.841	1.21
2025.11.28	F ⁻	75.270	75.154	75.349	74.707	75.126	75.177	75.131	0.30
	Cl ⁻	71.330	71.603	72.108	72.194	72.447	70.370	71.675	1.06
	NO ₃ ⁻	70.962	70.240	70.992	69.319	69.599	69.720	70.139	1.02
	PO ₄ ³⁻	73.760	73.398	73.503	73.711	74.000	73.907	73.713	0.31
	SO ₄ ²⁻	73.732	72.919	72.686	71.148	70.840	72.029	72.226	1.53
2025.11.29	F ⁻	75.439	75.429	75.415	75.119	75.741	75.312	75.409	0.27
	Cl ⁻	71.490	72.014	72.535	72.981	72.091	72.537	72.275	0.72
	NO ₃ ⁻	72.560	72.446	71.819	71.151	71.709	71.079	71.794	0.87
	PO ₄ ³⁻	73.947	75.164	75.933	75.443	74.851	75.381	75.120	0.90
	SO ₄ ²⁻	73.334	72.203	71.153	71.427	71.890	71.692	71.950	1.07
2025.11.30	F ⁻	75.296	75.261	75.402	76.165	75.543	75.152	75.470	0.48
	Cl ⁻	71.638	71.922	71.966	73.480	71.818	72.384	72.201	0.93
	NO ₃ ⁻	70.261	71.359	70.837	71.656	70.992	70.777	70.980	0.68
	PO ₄ ³⁻	71.606	70.989	71.631	72.734	73.982	70.951	71.982	1.63
	SO ₄ ²⁻	70.513	70.940	71.115	72.065	71.945	72.704	71.547	1.15
2025.12.01	F ⁻	75.114	75.104	75.391	75.295	75.547	75.258	75.285	0.22
	Cl ⁻	71.025	70.704	71.290	68.671	71.552	71.677	70.820	1.57
	NO ₃ ⁻	70.887	71.149	71.214	70.381	70.551	71.008	70.865	0.47
	PO ₄ ³⁻	71.192	71.159	70.264	74.349	70.621	72.674	71.710	2.14
	SO ₄ ²⁻	71.466	70.821	72.965	73.549	72.468	73.849	72.520	1.63
2025.12.02	F ⁻	75.456	73.045	75.129	75.106	75.104	75.162	74.834	1.18
	Cl ⁻	70.865	69.245	70.054	69.724	70.168	72.223	70.380	1.49
	NO ₃ ⁻	71.743	70.188	71.400	72.748	71.476	70.734	71.382	1.23
	PO ₄ ³⁻	70.248	74.447	71.134	71.694	72.450	74.491	72.411	2.42
	SO ₄ ²⁻	70.534	70.346	70.399	70.333	71.960	70.446	70.670	0.90
2025.12.03	F ⁻	74.856	75.756	75.004	74.993	75.373	75.158	75.190	0.44
	Cl ⁻	70.665	71.207	70.339	70.759	71.170	72.037	71.029	0.83
	NO ₃ ⁻	72.876	71.369	70.140	72.918	71.000	73.322	71.937	1.78
	PO ₄ ³⁻	73.711	73.126	72.017	71.365	72.934	73.788	72.823	1.32
	SO ₄ ²⁻	71.440	72.801	70.517	70.105	72.168	72.296	71.554	1.49
2025.12.04	F ⁻	74.881	75.428	74.764	74.739	75.040	75.553	75.067	0.46
	Cl ⁻	71.027	71.686	70.763	70.576	70.231	71.742	71.004	0.86
	NO ₃ ⁻	70.265	70.587	70.543	70.481	72.678	71.257	70.968	1.27
	PO ₄ ³⁻	74.164	73.650	74.671	72.056	73.921	73.915	73.729	1.21

	SO ₄ ²⁻	71.401	71.485	71.112	71.956	71.766	70.633	71.392	0.66
2025.12.05	F ⁻	74.652	76.020	75.024	74.923	75.075	75.739	75.239	0.70
	Cl ⁻	70.875	72.134	70.600	70.454	71.049	71.987	71.183	1.00
	NO ₃ ⁻	71.245	70.846	72.676	70.367	70.216	71.533	71.147	1.27
	PO ₄ ³⁻	74.984	74.360	74.875	74.367	73.252	74.199	74.339	0.83
	SO ₄ ²⁻	71.668	74.441	74.381	73.062	74.324	74.201	73.680	1.51
2025.12.06	F ⁻	75.210	74.513	75.008	75.150	75.218	75.414	75.085	0.41
	Cl ⁻	70.674	70.787	70.188	70.562	71.222	72.000	70.905	0.89
	NO ₃ ⁻	70.449	70.044	70.344	70.789	70.494	70.791	70.485	0.40
	PO ₄ ³⁻	75.960	75.088	74.056	74.848	75.469	74.375	74.966	0.93
	SO ₄ ²⁻	71.645	71.769	71.973	72.881	71.314	72.737	72.053	0.87
2025.12.07	F ⁻	75.130	74.865	74.799	74.931	75.039	75.070	74.972	0.17
	Cl ⁻	70.317	70.346	70.556	70.545	70.940	70.918	70.604	0.38
	NO ₃ ⁻	72.191	70.246	72.587	73.241	71.784	70.093	71.690	1.78
	PO ₄ ³⁻	75.703	74.820	75.249	75.725	75.712	73.866	75.179	0.98
	SO ₄ ²⁻	73.229	71.743	70.816	71.558	71.359	70.709	71.569	1.27
2025.12.08	F ⁻	75.239	74.341	75.578	75.439	75.713	74.064	75.062	0.92
	Cl ⁻	70.665	70.059	71.179	70.633	71.098	70.156	70.631	0.66
	NO ₃ ⁻	73.776	72.426	73.710	72.508	72.286	70.551	72.543	1.62
	PO ₄ ³⁻	76.188	75.656	75.650	75.995	74.484	73.956	75.321	1.19
	SO ₄ ²⁻	70.374	73.125	70.624	73.114	71.235	71.520	71.665	1.67
2025.12.09	F ⁻	74.818	74.339	74.835	74.949	75.115	75.218	74.879	0.41
	Cl ⁻	70.052	70.105	70.786	70.319	70.673	71.538	70.579	0.79
	NO ₃ ⁻	71.985	70.972	72.197	72.639	71.487	72.478	71.960	0.88
	PO ₄ ³⁻	74.897	73.929	74.425	75.335	75.645	75.226	74.910	0.85
	SO ₄ ²⁻	72.952	72.061	71.154	72.103	70.780	72.501	71.925	1.14
2025.12.10	F ⁻	74.829	75.733	75.409	75.363	75.464	74.573	75.229	0.58
	Cl ⁻	70.501	70.905	70.809	70.596	71.026	71.074	70.818	0.33
	NO ₃ ⁻	71.629	70.342	72.785	72.230	71.788	71.381	71.692	1.15
	PO ₄ ³⁻	74.252	74.464	74.847	74.383	75.514	73.824	74.547	0.77
	SO ₄ ²⁻	72.180	73.303	74.324	72.776	71.405	72.490	72.746	1.37
2025.12.11	F ⁻	75.017	74.593	76.217	76.245	76.096	73.635	75.301	1.42
	Cl ⁻	70.152	70.115	71.230	70.788	71.714	70.545	70.757	0.89
	NO ₃ ⁻	72.025	69.603	72.453	72.709	71.810	69.747	71.391	1.91
	PO ₄ ³⁻	76.200	74.800	75.879	76.483	75.061	75.531	75.659	0.86
	SO ₄ ²⁻	71.936	70.732	72.503	72.253	72.102	72.324	71.975	0.89
2025.12.12	F ⁻	76.337	74.120	78.813	78.386	75.046	75.944	76.441	2.41
	Cl ⁻	70.148	69.715	70.080	70.309	70.247	71.657	70.359	0.95
	NO ₃ ⁻	71.868	70.438	70.872	70.774	70.533	70.863	70.891	0.72
	PO ₄ ³⁻	76.204	75.660	75.711	74.964	74.523	75.089	75.358	0.81
	SO ₄ ²⁻	73.668	70.771	72.882	71.010	72.022	72.168	72.087	1.52
2025.12.13	F ⁻	75.165	74.613	75.200	75.178	75.438	74.299	74.982	0.58
	Cl ⁻	68.938	69.222	69.158	70.301	70.276	69.616	69.585	0.84

	NO ₃ ⁻	71.438	65.760	71.056	70.295	70.409	69.698	69.776	2.95
	PO ₄ ³⁻	76.265	75.512	75.546	74.143	74.608	74.759	75.139	1.03
	SO ₄ ²⁻	71.544	70.001	71.808	73.299	71.175	71.853	71.613	1.50
2025.12.14	F ⁻	74.986	75.618	74.845	75.094	75.316	75.314	75.195	0.37
	Cl ⁻	69.847	70.341	70.167	70.113	70.013	69.623	70.017	0.36
	NO ₃ ⁻	70.600	70.070	70.633	70.512	70.694	70.239	70.458	0.35
	PO ₄ ³⁻	75.685	73.421	76.159	75.861	75.191	74.391	75.118	1.38
	SO ₄ ²⁻	71.858	70.451	70.732	70.517	72.712	71.632	71.317	1.27
2025.12.15	F ⁻	75.698	73.914	75.126	75.213	75.787	74.022	74.960	1.08
	Cl ⁻	71.014	69.849	70.840	70.564	72.856	70.334	70.909	1.46
	NO ₃ ⁻	71.241	71.056	70.831	70.768	70.758	71.834	71.081	0.58
	PO ₄ ³⁻	75.835	74.573	76.320	75.064	75.376	75.302	75.412	0.80
	SO ₄ ²⁻	72.518	70.499	72.141	70.730	70.439	70.972	71.217	1.25
2025.12.16	F ⁻	75.138	75.429	75.623	75.957	75.863	74.171	75.364	0.87
	Cl ⁻	70.515	70.698	70.905	71.411	71.252	70.074	70.809	0.69
	NO ₃ ⁻	70.515	70.107	71.141	71.055	70.692	72.401	70.985	1.11
	PO ₄ ³⁻	75.586	73.188	76.218	74.865	74.104	75.125	74.848	1.44
	SO ₄ ²⁻	72.328	71.804	72.563	71.321	72.530	72.396	72.157	0.68
2025.12.17	F ⁻	75.873	73.422	74.581	74.643	75.514	75.877	74.985	1.28
	Cl ⁻	70.756	69.567	71.428	70.152	70.718	71.605	70.704	1.08
	NO ₃ ⁻	70.607	72.495	71.656	71.465	70.422	70.212	71.143	1.24
	PO ₄ ³⁻	75.564	74.125	76.771	73.761	76.641	74.611	75.246	1.71
	SO ₄ ²⁻	71.395	70.900	70.912	71.751	73.682	70.360	71.500	1.64
2025.12.18	F ⁻	75.353	75.599	75.180	75.310	75.128	75.297	75.311	0.22
	Cl ⁻	70.762	71.017	70.624	70.866	70.280	71.339	70.815	0.51
	NO ₃ ⁻	69.978	70.921	69.940	70.294	70.478	70.253	70.311	0.51
	PO ₄ ³⁻	75.254	74.218	76.888	75.514	74.855	73.480	75.035	1.56
	SO ₄ ²⁻	72.856	70.540	71.155	72.181	73.060	71.334	71.854	1.40
2025.12.19	F ⁻	75.226	74.711	74.728	74.743	74.913	73.687	74.668	0.69
	Cl ⁻	70.510	70.201	70.163	71.382	70.414	72.626	70.882	1.36
	NO ₃ ⁻	70.697	69.899	71.893	70.820	71.045	70.165	70.753	0.99
	PO ₄ ³⁻	75.770	74.231	75.328	76.534	75.214	74.491	75.261	1.12
	SO ₄ ²⁻	70.403	70.469	70.598	70.373	72.620	72.043	71.084	1.39
2025.12.20	F ⁻	76.126	73.384	75.114	75.120	74.859	74.196	74.800	1.24
	Cl ⁻	71.425	70.113	70.329	70.317	70.637	70.507	70.555	0.66
	NO ₃ ⁻	71.785	70.692	70.174	69.969	70.717	71.164	70.750	0.93
	PO ₄ ³⁻	75.865	75.476	74.813	74.665	75.596	73.955	75.062	0.95
	SO ₄ ²⁻	71.558	71.000	71.252	72.066	71.600	71.310	71.464	0.51

表 9 阳离子 30 天稳定性原始数据

测试日期	阳离子	1	2	3	4	5	6	平均值 mg/L	RSD%
2025.11.21	Li ⁺	1.212	1.212	1.205	1.202	1.205	1.209	1.208	0.32

	Na ⁺	1.212	1.210	1.206	1.201	1.204	1.206	1.206	0.32
	NH ₄ ⁺	17.744	17.745	17.656	17.629	17.647	17.719	17.690	0.29
	K ⁺	18.181	18.189	18.088	18.055	18.083	18.173	18.128	0.33
2025.11.22	Li ⁺	1.208	1.212	1.208	1.207	1.206	1.206	1.208	0.18
	Na ⁺	1.206	1.208	1.205	1.205	1.203	1.201	1.205	0.21
	NH ₄ ⁺	17.697	17.761	17.682	17.697	17.677	17.703	17.703	0.17
	K ⁺	18.124	18.194	18.124	18.128	18.120	18.157	18.141	0.16
2025.11.23	Li ⁺	1.208	1.202	1.208	1.207	1.208	1.207	1.207	0.19
	Na ⁺	1.207	1.199	1.206	1.203	1.204	1.201	1.203	0.24
	NH ₄ ⁺	17.696	17.645	17.705	17.674	17.694	17.714	17.688	0.14
	K ⁺	18.131	18.073	18.135	18.117	18.143	18.162	18.127	0.17
2025.11.24	Li ⁺	1.208	1.213	1.210	1.209	1.208	1.205	1.209	0.23
	Na ⁺	1.210	1.213	1.211	1.208	1.209	1.204	1.209	0.26
	NH ₄ ⁺	17.693	17.768	17.695	17.706	17.687	17.666	17.02	0.20
	K ⁺	18.135	18.215	18.154	18.148	18.116	18.146	18.152	0.19
2025.11.25	Li ⁺	1.212	1.214	1.211	1.210	1.210	1.211	1.211	0.12
	Na ⁺	1.212	1.213	1.211	1.210	1.209	1.208	1.210	0.15
	NH ₄ ⁺	17.753	17.786	17.731	17.722	17.726	17.760	17.746	0.14
	K ⁺	18.201	18.236	18.180	18.176	18.181	18.213	18.198	0.13
2025.11.26	Li ⁺	1.194	1.200	1.192	1.192	1.197	1.192	1.194	0.27
	Na ⁺	1.180	1.183	1.178	1.177	1.183	1.175	1.179	0.26
	NH ₄ ⁺	17.479	17.559	17.453	17.448	17.497	17.453	17.481	0.24
	K ⁺	17.918	18.025	17.922	17.905	17.988	17.916	17.946	0.27
2025.11.27	Li ⁺	1.193	1.187	1.196	1.190	1.194	1.199	1.193	0.35
	Na ⁺	1.186	1.180	1.189	1.183	1.186	1.191	1.186	0.34
	NH ₄ ⁺	17.639	17.539	17.670	17.545	17.634	17.688	17.619	0.36
	K ⁺	17.969	17.876	18.007	17.918	17.963	18.034	17.961	0.32
2025.11.28	Li ⁺	1.216	1.217	1.220	1.222	1.218	1.216	1.218	0.21
	Na ⁺	1.232	1.234	1.236	1.237	1.232	1.231	1.234	0.19
	NH ₄ ⁺	17.726	17.742	17.753	17.819	17.706	17.681	17.738	0.27
	K ⁺	18.164	18.180	18.196	18.250	18.172	18.160	18.187	0.18
2025.11.29	Li ⁺	1.199	1.202	1.201	1.211	1.200	1.206	1.203	0.38
	Na ⁺	1.188	1.190	1.189	1.200	1.193	1.199	1.193	0.44
	NH ₄ ⁺	17.612	17.587	17.624	17.795	17.575	17.661	17.642	0.46
	K ⁺	18.045	18.056	18.054	18.207	18.041	18.099	18.084	0.35
2025.11.30	Li ⁺	1.212	1.212	1.213	1.213	1.210	1.208	1.211	0.16
	Na ⁺	1.203	1.203	1.204	1.202	1.198	1.202	1.202	0.16
	NH ₄ ⁺	17.750	17.766	17.796	17.803	17.688	17.727	17.755	0.25
	K ⁺	18.158	18.200	18.252	18.232	18.169	18.172	18.197	0.21
2025.12.01	Li ⁺	1.206	1.205	1.209	1.214	1.208	1.206	1.208	0.28
	Na ⁺	1.199	1.197	1.200	1.203	1.198	1.197	1.199	0.18
	NH ₄ ⁺	17.702	17.671	17.674	17.792	17.705	17.683	17.705	0.25
	K ⁺	18.111	18.103	18.158	18.231	18.147	18.143	18.149	0.25

2025.12.02	Li ⁺	1.216	1.214	1.216	1.216	1.213	1.212	1.214	0.16
	Na ⁺	1.213	1.211	1.212	1.211	1.208	1.208	1.211	0.17
	NH ₄ ⁺	17.801	17.780	17.806	17.828	17.758	17.742	17.786	0.18
	K ⁺	18.247	18.227	18.256	18.271	18.211	18.193	18.234	0.16
2025.12.03	Li ⁺	1.216	1.224	1.213	1.210	1.214	1.217	1.216	0.40
	Na ⁺	1.212	1.218	1.208	1.205	1.207	1.215	1.211	0.42
	NH ₄ ⁺	17.811	17.943	17.781	17.749	17.782	17.788	17.809	0.39
	K ⁺	18.245	18.385	18.212	18.175	18.219	18.302	18.256	0.42
2025.12.04	Li ⁺	1.221	1.210	1.198	1.194	1.203	1.217	1.207	0.87
	Na ⁺	1.224	1.212	1.199	1.194	1.199	1.213	1.207	0.94
	NH ₄ ⁺	17.815	17.683	17.559	17.533	17.663	17.863	17.686	0.75
	K ⁺	18.321	18.174	18.012	17.975	18.091	18.315	18.148	0.82
2025.12.05	Li ⁺	1.215	1.225	1.213	1.213	1.213	1.220	1.217	0.39
	Na ⁺	1.215	1.225	1.217	1.215	1.213	1.221	1.218	0.37
	NH ₄ ⁺	17.766	17.916	17.744	17.713	17.723	17.878	17.790	0.48
	K ⁺	18.208	18.391	18.227	18.225	18.213	18.366	18.272	0.46
2025.12.06	Li ⁺	1.209	1.216	1.206	1.205	1.209	1.215	1.210	0.39
	Na ⁺	1.209	1.215	1.206	1.205	1.207	1.213	1.209	0.32
	NH ₄ ⁺	17.707	17.811	17.660	17.668	17.710	17.798	17.726	0.36
	K ⁺	18.173	18.307	18.171	18.132	18.181	18.367	18.222	0.51
2025.12.07	Li ⁺	1.204	1.206	1.214	1.202	1.205	1.212	1.207	0.39
	Na ⁺	1.196	1.197	1.204	1.195	1.200	1.208	1.200	0.40
	NH ₄ ⁺	17.700	17.666	17.805	17.646	17.685	17.775	17.713	0.36
	K ⁺	18.123	18.148	18.273	18.097	18.124	18.213	18.163	0.37
2025.12.08	Li ⁺	1.217	1.220	1.216	1.213	1.214	1.219	1.216	0.22
	Na ⁺	1.214	1.215	1.211	1.208	1.209	1.212	1.211	0.22
	NH ₄ ⁺	17.826	17.899	17.826	17.786	17.812	17.905	17.842	0.27
	K ⁺	18.245	18.314	18.230	18.212	18.227	18.343	18.262	0.29
2025.12.09	Li ⁺	1.212	1.218	1.212	1.211	1.210	1.211	1.212	0.25
	Na ⁺	1.208	1.212	1.207	1.205	1.205	1.204	1.207	0.23
	NH ₄ ⁺	17.799	17.874	17.763	17.700	17.757	17.778	17.779	0.32
	K ⁺	18.217	18.321	18.216	18.206	18.211	18.240	18.235	0.24
2025.12.10	Li ⁺	1.212	1.216	1.214	1.211	1.212	1.218	1.214	0.23
	Na ⁺	1.206	1.209	1.207	1.205	1.205	1.209	1.207	0.15
	NH ₄ ⁺	17.790	17.860	17.806	17.773	17.774	17.877	17.813	0.25
	K ⁺	18.208	18.282	18.235	18.209	18.222	18.336	18.249	0.28
2025.12.11	Li ⁺	1.215	1.220	1.216	1.214	1.211	1.212	1.215	0.28
	Na ⁺	1.210	1.213	1.210	1.207	1.203	1.202	1.207	0.35
	NH ₄ ⁺	17.825	17.894	17.813	17.798	17.764	17.805	17.817	0.24
	K ⁺	18.249	18.349	18.270	18.247	18.222	18.265	18.267	0.24
2025.12.12	Li ⁺	1.214	1.216	1.213	1.211	1.212	1.219	1.214	0.24
	Na ⁺	1.210	1.211	1.211	1.207	1.208	1.213	1.210	0.18
	NH ₄ ⁺	17.772	17.819	17.778	17.739	17.757	17.871	17.789	0.27

	K ⁺	18.212	18.258	18.212	18.187	18.205	18.334	18.235	0.30
2025.12.13	Li ⁺	1.213	1.219	1.211	1.208	1.210	1.204	1.211	0.42
	Na ⁺	1.208	1.213	1.206	1.203	1.204	1.195	1.205	0.50
	NH ₄ ⁺	17.784	17.874	17.746	17.729	17.730	17.691	17.759	0.36
	K ⁺	18.211	18.318	18.186	18.157	18.183	18.152	18.201	0.34
2025.12.14	Li ⁺	1.194	1.194	1.195	1.191	1.193	1.196	1.194	0.14
	Na ⁺	1.190	1.189	1.190	1.186	1.187	1.187	1.188	0.15
	NH ₄ ⁺	17.510	17.540	17.527	17.480	17.497	17.560	17.519	0.17
	K ⁺	17.920	17.941	17.938	17.901	17.927	17.981	17.935	0.15
2025.12.15	Li ⁺	1.186	1.199	1.191	1.189	1.192	1.192	1.192	0.37
	Na ⁺	1.177	1.193	1.188	1.185	1.186	1.186	1.186	0.43
	NH ₄ ⁺	17.415	17.600	17.486	17.448	17.478	17.526	17.492	0.37
	K ⁺	17.870	18.017	17.894	17.873	17.896	17.965	17.919	0.33
2025.12.16	Li ⁺	1.193	1.197	1.197	1.194	1.196	1.200	1.196	0.21
	Na ⁺	1.187	1.191	1.192	1.189	1.190	1.193	1.190	0.18
	NH ₄ ⁺	17.530	17.560	17.539	17.514	17.554	17.611	17.551	0.19
	K ⁺	17.933	17.968	17.969	17.947	17.975	18.057	17.975	0.24
2025.12.17	Li ⁺	1.191	1.198	1.206	1.191	1.194	1.199	1.196	0.50
	Na ⁺	1.183	1.191	1.198	1.185	1.187	1.189	1.189	0.48
	NH ₄ ⁺	17.454	17.531	17.673	17.470	17.507	17.595	17.538	0.47
	K ⁺	17.934	17.981	18.121	17.913	17.937	18.030	17.986	0.44
2025.12.18	Li ⁺	1.205	1.204	1.197	1.195	1.200	1.202	1.201	0.31
	Na ⁺	1.197	1.197	1.192	1.191	1.194	1.193	1.194	0.22
	NH ₄ ⁺	17.663	17.654	17.556	17.553	17.583	17.601	17.602	0.27
	K ⁺	18.065	18.066	17.991	17.956	18.020	18.056	18.026	0.25
2025.12.19	Li ⁺	1.206	1.205	1.198	1.197	1.198	1.206	1.202	0.36
	Na ⁺	1.200	1.196	1.193	1.191	1.190	1.198	1.195	0.33
	NH ₄ ⁺	17.673	17.662	17.569	17.571	17.567	17.670	17.619	0.31
	K ⁺	18.109	18.086	18.018	17.994	18.012	18.110	18.055	0.29
2025.12.20	Li ⁺	1.211	1.209	1.202	1.201	1.202	1.211	1.206	0.39
	Na ⁺	1.207	1.204	1.199	1.199	1.198	1.204	1.202	0.31
	NH ₄ ⁺	17.723	17.707	17.623	17.629	17.637	17.762	17.680	0.33
	K ⁺	18.146	18.133	18.034	18.063	18.070	18.205	18.109	0.35

表 10 锌离子 30 天稳定性原始数据

测试日期	1	2	3	4	5	6	平均值 μg/L	RSD%
2025.11.21	14.23	14.10	14.23	13.95	13.98	14.09	14.10	0.86
2025.11.22	13.99	14.00	14.30	14.32	14.10	14.31	14.17	1.11
2025.11.23	13.84	13.68	14.04	13.90	14.60	14.12	14.03	2.28
2025.11.24	14.82	15.01	15.12	15.36	14.92	15.03	15.04	1.24
2025.11.25	14.93	14.91	14.88	14.94	14.87	15.19	14.95	0.81
2025.11.26	14.83	14.90	15.24	15.55	14.75	14.72	15.00	2.21

2025.11.27	14.30	14.48	14.37	14.55	14.57	14.46	14.45	0.73
2025.11.28	14.65	14.98	14.60	15.64	15.05	15.27	15.03	2.60
2025.11.29	15.30	15.60	15.61	15.57	15.57	15.45	15.52	0.77
2025.11.30	15.48	15.55	15.53	15.59	15.57	15.37	15.52	0.53
2025.12.01	15.21	15.31	15.10	15.54	15.36	15.69	15.37	1.39
2025.12.02	14.12	14.50	14.58	14.68	14.63	14.97	14.58	1.90
2025.12.03	14.76	14.23	14.38	14.45	14.73	14.70	14.55	1.51
2025.12.04	14.47	14.35	15.21	14.26	14.17	14.53	14.50	2.56
2025.12.05	14.30	14.11	14.29	14.21	14.31	14.36	14.26	0.64
2025.12.06	14.50	14.39	14.47	14.43	14.32	14.39	14.42	0.45
2025.12.07	14.43	14.52	14.28	14.17	14.27	14.29	14.33	0.90
2025.12.08	13.96	13.91	14.51	14.10	14.45	14.36	14.21	1.81
2025.12.09	14.18	14.13	14.31	14.18	14.68	14.69	14.36	1.80
2025.12.10	14.82	14.68	14.61	14.61	14.73	14.84	14.71	0.69
2025.12.11	14.83	15.25	14.52	14.77	14.50	15.34	14.87	2.40
2025.12.12	14.58	14.62	14.58	15.08	15.33	15.05	14.87	2.17
2025.12.13	13.92	14.24	14.83	14.90	14.87	14.88	14.60	2.88
2025.12.14	14.21	14.29	14.00	14.62	14.57	14.72	14.40	1.93
2025.12.15	14.98	14.89	14.80	15.16	14.59	14.44	14.81	1.77
2025.12.16	14.24	14.18	13.96	14.09	14.38	14.39	14.21	1.16
2025.12.17	14.05	13.94	14.37	14.08	13.87	14.64	14.16	2.06
2025.12.18	14.38	14.22	14.14	14.48	14.43	14.62	14.38	1.22
2025.12.19	14.02	14.07	14.20	14.16	14.38	14.41	14.21	1.14
2025.12.20	14.05	14.08	14.14	14.15	14.46	14.36	14.21	1.15

6、核电厂现场验证

三门核电有限公司、江苏核电有限公司两家单位进行了方法的现场试验和优化工作。

在同一实验室，同一实验者以同一台仪器分析质控样6次，计算方法精密度。

试验结果如下：

表11 三门核电实验室精密度试验结果

	Li ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	
质控1 (mg/L)	1.20	1.19	17.69	18.03	
质控2 (mg/L)	1.19	1.19	17.63	17.96	
质控3 (mg/L)	1.19	1.18	17.55	17.92	
质控4 (mg/L)	1.20	1.90	17.67	18.01	
质控5 (mg/L)	1.19	1.18	17.54	17.88	
质控6 (mg/L)	1.19	1.19	17.64	17.97	

平均值 (mg/L)	1.19	1.19	17.62	17.96	
保留时间					
RSD%	0.01	0.03	0.03	0.06	
峰面积RSD%	0.36	0.36	0.26	0.33	
	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
质控1 (μg/L)	74.45	71.60	70.78	76.16	70.69
质控2 (μg/L)	74.54	71.41	70.91	75.49	72.83
质控3 (μg/L)	74.03	70.98	70.37	75.01	72.76
质控4 (μg/L)	73.72	70.96	70.28	75.98	71.18
质控5 (μg/L)	74.41	71.46	70.80	74.57	71.47
质控6 (μg/L)	74.75	71.52	71.28	75.49	72.11
平均值 (μg/L)	74.32	71.32	70.74	75.45	71.84
保留时间					
RSD%	0.03	0.05	0.05	0.04	0.03
峰面积RSD%	0.52	0.42	0.56	0.85	1.24
	Zn ²⁺				
质控1 (μg/L)	14.46				
质控2 (μg/L)	14.57				
质控3 (μg/L)	14.55				
质控4 (μg/L)	14.37				
质控5 (μg/L)	14.48				
质控6 (μg/L)	14.30				
平均值 (μg/L)	14.45				
保留时间					
RSD%	0.09				
峰面积RSD%	0.59				

表12 田湾核电实验室精密度试验结果

	Li ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	
质控1 (mg/L)	1.21	1.19	18.63	18.04	

质控2 (mg/L)	1.21	1.19	18.59	17.88	
质控3 (mg/L)	1.20	1.18	18.46	17.77	
质控4 (mg/L)	1.20	1.21	18.35	18.17	
质控5 (mg/L)	1.20	1.21	18.23	18.29	
质控6 (mg/L)	1.21	1.19	18.64	18.06	
平均值 (mg/L)	1.21	1.19	18.49	18.04	
保留时间 RSD%	0.02	0.08	0.08	0.19	
峰面积RSD%	0.39	1.16	0.91	1.06	
	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
质控1 (μg/L)	76.13	73.40	77.78	72.63	77.99
质控2 (μg/L)	73.38	75.29	75.01	75.10	74.86
质控3 (μg/L)	75.11	77.29	75.42	76.68	75.35
质控4 (μg/L)	75.12	75.00	77.08	75.15	77.24
质控5 (μg/L)	74.86	75.85	75.38	73.97	75.30
质控6 (μg/L)	74.20	76.31	78.11	73.07	78.33
平均值 (μg/L)	74.80	75.52	76.46	74.43	76.51
保留时间 RSD%	0.07	0.05	0.06	0.05	0.05
峰面积RSD%	1.24	1.87	1.86	2.22	2.05
	Zn ²⁺				
质控1 (μg/L)	16.12				
质控2 (μg/L)	15.83				
质控3 (μg/L)	15.67				
质控4 (μg/L)	15.83				
质控5 (μg/L)	15.82				
质控6 (μg/L)	15.94				
平均值 (μg/L)	15.87				
保留时间	0.12				

RSD%					
峰面积RSD%	0.89				

结论可得：

在同一实验室，由同一操作者使用相同设备，按相同的测试方法，测量结果的精密度均小于3%，表明此分析方法具有良好的重复性。

四、标准中涉及专利的情况

本标准所涉及的离子色谱在线监测技术相关专利均由牵头单位及参与单位自主研发，无专利侵权风险，相关专利持有人同意将相关技术纳入标准并推广应用。本标准编制过程中未使用任何第三方专利技术，标准发布后可无障碍推广实施。

五、预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况

通过本标准的制定，可以实现压水堆一回路冷却剂中常规阴离子（ F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} ）、常规阳离子（ Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ ）及 Zn^{2+} 的在线精准测定，为核电一回路水质的实时监控提供重要技术保证。该标准的实施将有助于减少人工取样分析带来的劳动强度和辐射受照风险，提高监测的实时性和准确性。同时，本标准将推动离子色谱在线监测技术在核电厂的应用推广，促进核电水化学监测从离线取样向在线监测、从分项测定向一体化集成的转型升级。

六、与国际、国外对比情况

国际原子能机构(IAEA)于 2025 年正式出版并发布了《压水堆水化学创新、进步与发展》技术导则，汇聚了中、德、法、美、韩等多国顶尖技术力量与实践经验。该导则收录了三门核电自主开发的一回路在线锌离子测量仪器等先进检测技术方向。日本原子能学会(AESJ)发布了水化学指南和化学分析标准，采用离子色谱(IC)、电感耦合等离子体发射光谱(ICP)和原子吸收光谱(AAS)等多种方法。国外核电已有使用离子色谱法在线监测一回路冷却剂中阴、阳离子的应用，但尚未形成针对核反应堆冷却剂中常规阴阳离子、 Zn^{2+} 一体化在线监测的离子色谱法专用标准。

七、在标准体系中的位置，与现行相关法律、法规、规章及标准，特别是强制性标准的协调性

本标准与现行相关法律、法规、规章及相关标准协调一致。本标准与 NB/T

20436-2017《压水堆核电厂水化学控制》中规定的一回路冷却剂水质控制指标相衔接，与 T/CNEA 079-2023《核电厂含硼水中锌和镍浓度的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》等核电专用标准互为补充。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

九、标准性质的建议说明

建议本标准的性质为团体标准。

十、贯彻标准的要求和措施建议

标准发布后，中国核电工程有限公司将配合中国核仪器行业协会组织行业召开标准宣贯会，开展培训活动，促进该标准更好地贯彻实施。

十一、废止现行相关标准的建议

无。

十二、其他应予说明的事项

无。

ICS

CCS

团 体 标 准

T/CNI XXXX-XXXX

压水堆一回路常规阴阳离子、锌离子在线监测
——离子色谱法

Online Monitoring of Conventional Anions, Cations and Zinc Ions in
the Primary Circuit of Pressurized Water Reactor
——Ion Chromatography Method

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请您将知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX发布

XXXX-XX-XX 实施

中国核仪器行业协会 发 布

目 次

前 言.....	III
引 言.....	IV
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 方法原理.....	2
5 试剂与材料.....	2
6 仪器和设备.....	3
7 分析步骤.....	3
8 精密度.....	5
9 检测下限.....	5
10 试验报告.....	6
附 录 A.....	7

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国核仪器行业协会提出并归口。

本文件起草单位：中国核电工程有限公司、青岛盛瀚色谱技术有限公司、三门核电有限公司、江苏核电有限公司、上海核工程研究设计院股份有限公司。

本文件主要起草人：李力、刘权卫、丁春铖、徐名兰、侯涛、陈靖、孙阳阳、王旭初、谭东斌、黎良斌、陈虎威、桂璐廷、鄢诚、顾钰

本文件为首次发布。



引 言

本文件旨在为压水堆核电站一回路冷却剂中常规阴阳离子及锌离子的在线监测提供统一、规范的技术依据。

压水堆一回路冷却剂的水化学状态直接关系到反应堆的安全运行与设备服役寿命。其中， F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 等阴离子以及 Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 等阳离子的浓度需严格受控，以防范腐蚀、结垢及辐解产物带来的风险；同时， Zn^{2+} 作为应力腐蚀开裂抑制因子，其加锌工艺的精准执行依赖于可靠、连续的浓度数据。传统离线取样分析存在滞后性，难以满足核电站对冷却剂质量实时监控的要求。离子色谱法凭借其多组分同时分离、高灵敏度和良好选择性等优势，结合在线取样与前处理技术，能够实现上述离子的自动、连续、稳定测定，为运行人员提供即时决策依据。

本标准在充分调研国内外相关技术文献、仪器发展现状及核电站实际运行经验基础上，参考GB/T 6682和JJG 823-2014等现行有效文件，对方法原理、仪器配置、试剂要求、分析流程及数据处理等关键环节作出明确规定。期望本标准的实施有助于提高各核电站之间监测数据的可比性，促进在线离子色谱技术在核能行业的规范化应用，并为其他堆型反应堆冷却剂的类似监测提供参照。鉴于本标准为首次制定，欢迎各单位在使用过程中积累经验，提出改进建议，以推动后续版本的不断完善。

压水堆一回路常规阴阳离子、锌离子在线监测——离子色谱法

1 范围

本标准规定了采用离子色谱法对压水堆核电站一回路冷却剂中常规阴阳离子及 Zn^{2+} 进行在线监测的术语和定义、方法原理、仪器设备要求、试剂与材料、分析步骤及数据处理等内容。

本标准适用于压水堆核电站一回路冷却剂中常规阴离子（包括但不限于 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} ）、常规阳离子（包括但不限于 Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ ）以及 Zn^{2+} 的在线测定。其他堆型核反应堆冷却剂在上述离子监测中可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 6682 分析实验室用水规格和试验方法

JJG 823-2014 离子色谱仪检定规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 压水堆一回路冷却剂 pressurized water reactor primary coolant

在压水堆核电站一回路系统中，流经反应堆堆芯吸收核裂变产生的热量，并将热量传递至蒸汽发生器的工作介质。

3.2 常规阴阳离子 conventional anions and cations

压水堆一回路冷却剂中常见的、对反应堆水化学控制和设备腐蚀有重要影响的阴离子和阳离子，主要包括 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 等阴离子，以及 Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 等阳离子。

3.3 锌离子 zinc ion

指溶解于压水堆一回路冷却剂中的 Zn^{2+} ，其浓度通过加锌工艺进行控制，以减缓一回路由奥氏体不锈钢及镍基合金等材料构成的设备与管道的应力腐蚀开裂。

3.4 在线监测 online monitoring

通过在线采样与前处理系统，将样品连续引入离子色谱仪，自动完成分离、检测、数据分析和传输，实现目标离子浓度实时监控的监测方式。

3.5 富集柱 enrichment column

亦称浓缩柱或预浓缩柱，安装在进样阀与分离柱之间，用于从大体积样品溶液中吸附并富集痕量目标离子的小型离子交换柱。

4 方法原理

4.1 常规阴离子测定原理

采用阴离子交换色谱法测定压水堆一回路冷却剂中的常规阴离子（ F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 等），目标离子依据其在离子交换树脂固定相上离子交换能力的差异实现色谱分离。针对压水堆一回路冷却剂中高浓度硼酸基体干扰，以四硼酸钠溶液为淋洗液，采用二元高压梯度淋洗方式，能够有效将目标离子从高浓度的硼酸背景中分离出来，改善峰分离效果。分离后的阴离子经抑制器将流动相背景电导降低至较低水平，以电导检测器检测，根据色谱峰的保留时间进行定性，峰面积或峰高进行定量。

4.2 常规阳离子测定原理

采用阳离子交换色谱法测定压水堆一回路冷却剂中的常规阳离子（ Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 等）。以甲烷磺酸为淋洗液，采用等度洗脱方式注入阳离子分离柱。目标阳离子在离子交换树脂固定相上依据离子半径和电荷差异实现色谱分离。分离后的阳离子经抑制器将流动相背景电导降低至较低水平，以电导检测器检测，根据色谱峰的保留时间进行定性，峰面积或峰高进行定量。

4.3 锌离子测定原理

采用直接电导法结合在线富集技术测定压水堆一回路冷却剂中的 Zn^{2+} 。鉴于一回路冷却剂中 Zn^{2+} 浓度通常处于 $\mu\text{g/L}$ 级别（一般控制在 $5\ \mu\text{g/L} \sim 15\ \mu\text{g/L}$ ），直接进样难以满足电导检测器的灵敏度要求，因此在进样前设置在线富集步骤：将定量体积（如 $20\ \text{mL}$ ）样品通过阳离子富集柱，使 Zn^{2+} 在富集柱上充分吸附，再以 $2.5\ \text{mmol/L}$ 甲烷磺酸和 $0.8\ \text{mmol/L}$ 草酸混合溶液为淋洗液将富集柱中的 Zn^{2+} 反冲进入阳离子分离柱进行分离。分离后的 Zn^{2+} 经抑制器降低流动相背景电导后，以电导检测器检测，根据色谱峰的保留时间进行定性，峰面积或峰高进行定量。通过在线富集技术， Zn^{2+} 的检出限可降低至亚 $\mu\text{g/L}$ 级别，满足压水堆一回路冷却剂中痕量 Zn^{2+} 在线监测的要求。

5 试剂与材料

5.1 试剂与试剂水

5.1.1 除特殊说明，本标准所用试剂应为优级纯试剂。

5.1.2 试剂水应符合GB/T 6682规定的一级水。

5.1.3 四硼酸钠十水合物（ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ）：纯度 $\geq 99.5\%$ 。

5.1.4 甲烷磺酸：纯度 $\geq 99.5\%$ 。

5.1.5 二水合草酸（ $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）：纯度 $\geq 99.5\%$ 。

5.2 淋洗液

阴离子流动相试剂（ $40\ \text{mM}$ 四硼酸钠淋洗液）：称取 $15.25\ \text{g}$ 四硼酸钠十水合物置于烧杯中，加入约 $800\ \text{mL}$ 新鲜制备并经脱气处理的超纯水，适当搅拌或超声至完全溶解，转移至 $1\ \text{L}$ 容量瓶中并用超纯水定容至刻度，充分摇匀。随后，立即用 $0.22\ \mu\text{m}$ 滤膜进行真空抽滤以去除微粒，再超声脱气 $15\ \text{分钟}$ ，

最后转移至淋洗液瓶中备用。

阳离子流动相试剂（5 mM甲烷磺酸淋洗液）：使用微量移液器准确移取约0.328 mL市售甲烷磺酸，缓慢加入约800 mL新鲜制备的高纯水，边加边搅拌以确保充分混匀并散热，待冷却至室温后转移至1 L容量瓶中定容至刻度并摇匀。最后，将溶液过滤并脱气使用。也可采用甲烷磺酸阳离子淋洗液发生器在线自动生成高纯度流动相以避免人工配制误差和基体干扰。

锌离子流动相试剂（2.5 mM甲烷磺酸与0.8 mM草酸混合淋洗液）：采用先配制高浓度储备液，再由仪器在线稀释的方式，以保证浓度准确性和操作便捷性。该储备液为1 L含250 mM甲烷磺酸和80 mM草酸的混合溶液，具体配制方法如下：在1 L容量瓶中加入约600~700 mL新鲜制备的超纯水，准确移取约16.4 mL甲烷磺酸，缓慢加入容量瓶中并轻轻摇动，因溶解放热需待溶液冷却至室温，再加入10.09 g二水合草酸，超声或搅拌至完全溶解，随后用超纯水定容至刻度，充分摇匀。所得混合液立即用0.22 μm 滤膜真空抽滤以去除微粒，再超声脱气15分钟消除溶解气体，转移至洁净的储备液瓶中密封保存。该储备液用于锌离子分析时，可直接连接至仪器的淋洗液位，由淋洗液自动配制模块按设定比例自动稀释至目标浓度，这样既减少了人工操作误差，也保证了每次分析淋洗液的新鲜度和一致性。

5.3 标准样品储备液

常规阴离子标准储备液：5种阴离子 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 标准储备液浓度为1000 $\mu\text{g/mL}$ ，采用国家有证标准物质，或用基准试剂配制。

常规阳离子标准储备液： Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 标准储备液浓度分别为120 mg/L、120 mg/L、1800 mg/L、1800 mg/L，采用国家有证标准物质，或用基准试剂配制。

锌离子标准储备液：浓度为1000 $\mu\text{g/mL}$ ，采用国家有证标准物质。

6 仪器和设备

6.1 离子色谱仪

系统应具备在线连续监测功能，其核心构成包括高压输液泵、进样阀、色谱分离柱、抑制器、检测器及数据处理系统或工作站等模块。根据实际分析需求，可选择性配置富集柱或阴离子捕获柱，以提升痕量组分的富集效率或有效去除基体中的干扰离子。

6.2 辅助设备

超纯水机：产出水电阻率 $\geq 18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ （25 $^{\circ}\text{C}$ ），符合GB/T 6682中一级水要求，用于流动相配制、试剂稀释和仪器清洗，避免水中杂质干扰检测。

标准溶液配制设备：包括移液枪、容量瓶、电子天平（精度0.1 mg）、超声波清洗器等，用于标准溶液的准确配制，确保校准结果的可靠性。

7 分析步骤

7.1 仪器调试

开启离子色谱仪后，依次启动各模块并检查流路密封性，确认系统压力正常；根据分析目标选择分离柱、抑制器及色谱条件，可选配富集柱或阴离子捕获柱；持续输送淋洗液平衡系统，待基线噪声和漂移满足离子色谱仪检定规程（JJG 823-2014）要求（噪声 $\leq 0.005 \mu\text{S}$ ，漂移 $\leq 0.1 \mu\text{S}/30 \text{ min}$ ）后，可

进行线性相关系数 (≥ 0.995)、重复性 ($RSD \leq 3\%$)、最小检出浓度验证, 记录验证结果。附录的条件被证明是可行的, 如使用其他条件需进行适当的方法学验证。

7.2 标准溶液的制备

7.2.1 中间混合标准溶液的配制

F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、PO₄³⁻、SO₄²⁻的5种阴离子中间混合溶液: 采用称重法, 将标准储备液稀释1000倍, 制备成浓度为1000 μg/L的中间混合标准溶液, 储于聚丙烯或高密度聚乙烯瓶中, 4℃冷藏存放。此中间混合标准溶液可存放一个月。

锌离子的中间混合溶液: 采用称重法, 将标准储备液稀释1000倍, 制备成浓度为1000 μg/L的中间混合标准溶液, 储于聚丙烯或高密度聚乙烯瓶中, 4℃冷藏存放。此中间混合标准溶液可存放一个月。

7.2.2 标准系列溶液的配制

F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、PO₄³⁻、SO₄²⁻的5种阴离子混合标准溶液: 以中间混合标准溶液为母液, 分别按200、40、20、10、5倍进行逐级稀释, 制备成浓度依次为5 μg/L、25 μg/L、50 μg/L、100 μg/L和200 μg/L的混合标准工作溶液。配制过程使用在线离子色谱仪的自动稀释校准曲线样品配制模块, 该模块可按照预设浓度自动完成各浓度点的配制操作。

Li⁺、Na⁺、NH₄⁺、K⁺的4种阳离子混合标准溶液: 以标准样品储备液为母液, 按照600、300、150、120、60倍进行逐级稀释, 制备成浓度依次为0.2 mg/L、0.4 mg/L、0.8 mg/L、1.0 mg/L和2.0 mg/L (以Li⁺计) 的混合标准工作溶液。配制过程使用在线离子色谱仪的自动稀释校准曲线样品配制模块, 该模块可按照预设浓度自动完成各浓度点的配制操作。

Zn²⁺的标准溶液: 以锌离子中间标准溶液为母液, 按照333.3、166.7、100、50、33.3倍进行逐级稀释, 制备成浓度依次为3 μg/L、6 μg/L、10 μg/L、20 μg/L和30 μg/L的标准工作溶液。配制过程使用在线离子色谱仪的自动稀释校准曲线样品配制模块, 该模块可按照预设浓度自动完成各浓度点的配制操作。

7.3 标准工作曲线的绘制

在仪器系统达到平衡状态后, 开始进行标准工作曲线的测定。测定时, 需按照以下顺序依次进样: 首先测定空白溶液, 以确认系统本底; 随后分别测定常规阴离子混合标准系列溶液、常规阳离子混合标准系列溶液及锌离子标准系列溶液。仪器数据处理系统以目标离子的浓度 (mg/L或μg/L) 为横坐标, 以对应的色谱峰高或峰面积为纵坐标, 自动绘制各离子的标准工作曲线。铵根离子应采用非线性回归方式, 其他离子宜采用线性回归方式, 线性相关系数应大于0.995。注: 铵是弱碱, 在抑制电导检测方式下, 铵根离子的响应为二次线性状态。

7.4 样品分析

按标准溶液的测试条件和进样体积, 将水样注入离子色谱仪, 对样品进行两次平行测定。根据被测离子的峰高或峰面积, 由相应的工作标准曲线计算各离子的浓度。

7.5 干扰与消除

7.5.1 在进行痕量分析时, 应避免在采样、存储和分析环节中的污染, 以免干扰测定结果。

7.5.2 当样品中某种离子浓度过高, 影响待测离子定量时, 可适当稀释样品, 或采用梯度淋洗的方法减少干扰。

7.6 试验数据处理

由仪器数据处理系统得出样品测定值，取两次平行测定的算术平均值作为测定结果，结果保留小数点后两位有效数字。

8 精密度

参考JJG 823-2014离子色谱仪检定规程第5.2.2.8条规定：按仪器说明书要求，打开仪器，待仪器稳定后，选取质控样进行测量，连续进样6次，记录色谱峰的保留时间和峰面积或峰高，计算相对标准偏差RSD₆。

各离子精密度应不低于表1要求的范围：

表1 各离子精密度

离子	浓度 (μg/L)	精密度 (%)
氟离子	75	≤3
氯离子	75	≤3
硝酸根	75	≤3
磷酸根	75	≤3
硫酸根	75	≤3
锂离子	1200	≤3
钠离子	1200	≤3
铵根离子	18000	≤3
钾离子	18000	≤3
锌离子	15	≤3

9 检测下限

选取线性最低点的检测浓度进行测定，(Li⁺、Na⁺、NH₄⁺、K⁺进样量为25 μL；F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、PO₄³⁻、SO₄²⁻进样量为2000 μL；Zn²⁺进样量20 mL)，记录色谱图，由色谱峰高和基线噪声，按下式(1)计算检出限CD。

$$C_D = \frac{2H_N c}{H} \quad (1)$$

式中：

C_D ——检出限，μg/mL；

H_N ——基线噪声峰峰值，μS；

c ——标准溶液浓度，μg/mL；

H ——标准溶液的色谱峰高，μS。

各离子检测下限要求见表2：

表2 各离子检测下限

离子	检测下限 (μg/L)
氟离子	1.0
氯离子	1.0
硝酸根	1.0
磷酸根	1.0
硫酸根	1.0
锂离子	0.1
钠离子	0.1
铵根离子	0.1
钾离子	0.1
锌离子	0.1

10 试验报告

试验报告应至少包含以下信息：

- 注明引用本文件；
- 受检样品的完整标识，包括水样名称、编号、采样日期等；
- 水样中各种离子测定结果，如有未检出应注明低于仪器检出限；
- 试验人员和试验日期。

附录 A

(资料性)

参考色谱工作条件

阴离子色谱工作条件见表A.1、A.2，阴离子色谱分离图见图A.1。

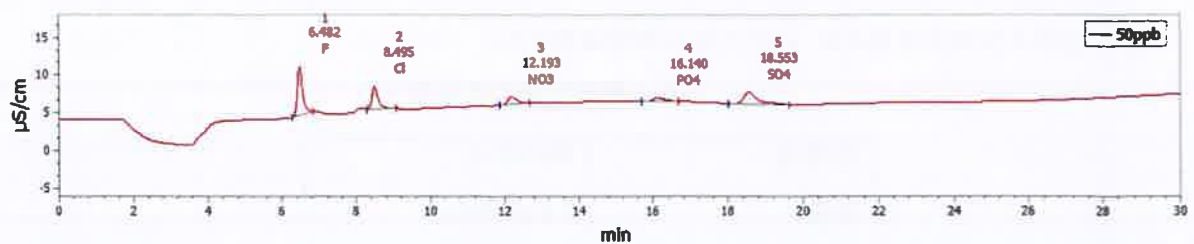
表A.1 参考色谱工作条件

色谱柱	SH-NA-1
流量	1.5 mL/min
柱温	35 °C
池温	35 °C
抑制器电流	120 mA
进样量	2000 μ L
淋洗液浓度	40 mM四硼酸钠
检测方式	抑制电导法

表A.2 梯度洗脱条件

淋洗液为二元梯度洗脱，其中 A 为 40 mM 四硼酸钠溶液，B 为纯水，梯度见下表。

	时间 (min)	A1 (%)	B1 (%)	流量 (mL/min)
1	0	8.0	92.0	1.5
2	8.0	8.0	92.0	1.5
3	27.0	35.0	65.0	1.5
4	27.1	8.0	92.0	1.5



图A.1 阴离子色谱分离图

说明： 1——F⁻；

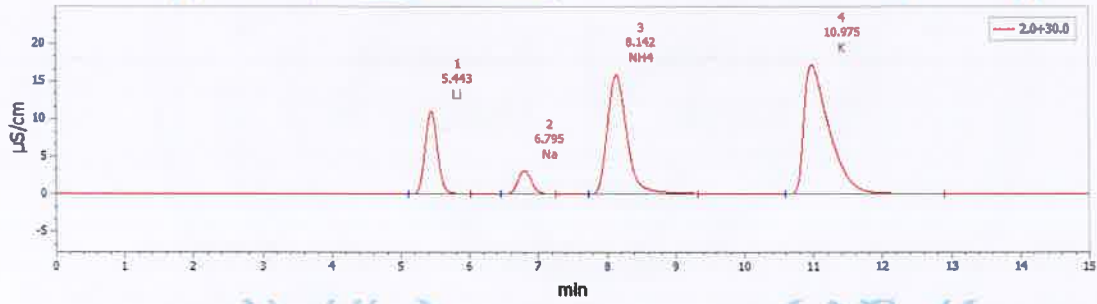
T/CNI XXXX-XXXX

- 2—Cl⁻;
- 3—NO₃⁻;
- 4—PO₄³⁻;
- 5—SO₄²⁻;

阳离子色谱工作条件见表A.3，阳离子色谱分离图见图A.2。

表A.3 参考色谱工作条件

色谱柱	SH-NC-3L
流量	1.0 mL/min
柱温	35 °C
池温	35 °C
抑制器电流	20 mA
进样量	25 μL
淋洗液浓度	5 mM甲烷磺酸
检测方式	抑制电导法



图A.2 阳离子色谱分离图

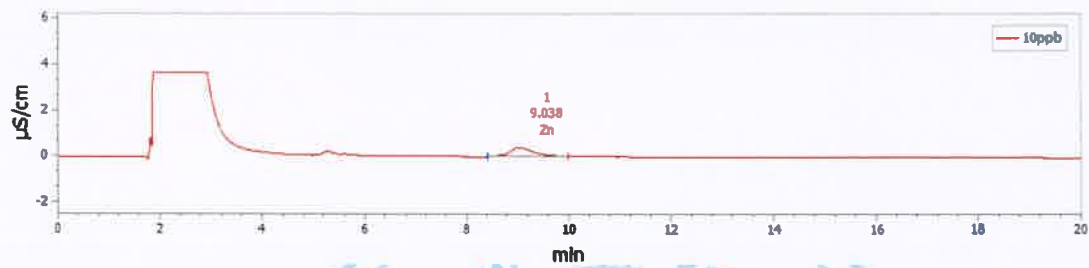
- 说明：
- 1—Li⁺;
 - 2—Na⁺;
 - 3—NH₄⁺;
 - 4—K⁺;

Zn²⁺色谱工作条件见表A.4，Zn²⁺色谱分离图见图A.3。

表A.4 参考色谱工作条件

色谱柱	SH-NC-2
流量	1.0 mL/min
柱温	35 °C

池温	35 °C
进样量	20 mL
淋洗液浓度	2.5 mM甲烷磺酸 +0.8mM草酸
检测方式	富集+直接电导法

图A.3 Zn²⁺ 色谱分离图说明： 1——Zn²⁺。