

ICP-MS/MS 基体匹配法结合全基体进样测定注射液中的铝

许慧^{1,2}, 李耕^{1,2}, 吴秋云^{*1,2}

(1. 江苏省药品监督检验研究院, 江苏 南京 210019; 2. 国家药品监督管理局监管科学创新研究基地, 江苏 南京 210019)

摘要: 建立一种基体匹配法结合全基体进样系统的电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 方法, 用于测定复方醋酸钠林格注射液中的铝元素含量。改善高盐高糖基体引起的基体干扰, 实现样品直接进样, 降低污染风险, 并提高检测效率。采用全基体进样系统, 在样品气溶胶进入等离子体前引入稀释气进行在线气体稀释。经过优化设置, 雾化气流量为 0.79 L/min, 稀释气流量为 0.2 L/min, 选用⁴⁵Sc 作为内标元素。采用 0.2% 的无水葡萄糖基体匹配以进一步降低基体干扰。同时采用串联四极杆 (MS/MS) 结合 He 碰撞模式, 消除多原子离子的质谱型干扰。铝元素的质量浓度在 5~50 µg/L 范围内与响应强度线性关系良好, 相关系数大于 0.999。在 3 种不同加标浓度下, 加标回收率为 97%~104%, 重复性试验的相对标准偏差为 2.5%, 表明该方法准确度和精密度良好。对样品中的铝元素进行定量分析, 6 批样品含铝量均较低, 安全风险较小。本方法结合全基体进样与基体匹配法, 实现了对高盐高糖基体注射液样品中铝元素的直接进样测定, 有效控制了基体干扰与质谱干扰, 操作简便, 结果准确可靠, 适用于复方醋酸钠林格注射液中铝元素的含量测定, 并为同类型复杂基体注射液的大批量快速检测提供了参考。

关键词: 基体匹配; 全基体进样系统; 电感耦合等离子体质谱法; 复方醋酸钠林格注射液; 铝元素

中图分类号: 文献标识码: A

文章编号: 0258-3283 (2026)

DOI: 10.13822/j.cnki.hxsj.2026.0176

Determination of Aluminum in Injections by ICP-MS/MS with Matrix Matching Method Combined with Total Matrix Introduction XU Hui^{1,2}, LI Geng^{1,2}, WU Qiu-yun^{*1,2} (1. Jiangsu Institute for Drug Control, Nanjing 210019, China; 2. Innovation and Research Base for Regulatory Science, National Medical Products Administration, Nanjing 210019, China)

Abstract: An inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) method based on matrix matching combined with a total matrix introduction system was established for the determination of aluminum content in compound sodium acetate Ringer's injection. This method was developed primarily to mitigate severe matrix interference arising from the high salt and sugar content of pharmaceutical formulations while enabling direct sample introduction without complex pretreatment, thereby reducing the risk of external contamination and improving detection efficiency. In this system, a total matrix introduction device was employed to introduce a dilution gas for online gas dilution before the sample aerosol entered the plasma. This approach effectively reduced the matrix load on the plasma and stabilized the ionization conditions. The instrumental parameters were systematically optimized to achieve robust performance with a nebulizer gas flow rate of 0.79 L/min and a dilution gas flow rate of 0.20 L/min. To correct for non-spectral matrix effects caused by variations in sample viscosity and transport efficiency, ⁴⁵Sc was selected as the internal standard element. To further reduce residual matrix interference, 0.2% anhydrous glucose was used for matrix matching in both the calibration standards and sample solutions. Additionally, tandem quadrupole (ICP-MS/MS) technology combined with helium (He) collision mode was adopted to effectively eliminate polyatomic ion interference, particularly from chloride- and carbon-containing species. Methodological validation demonstrated a good linear relationship between the mass concentration of aluminum and response intensity within the range of 5 to 50 µg/L, with a correlation coefficient greater than 0.999. The average recoveries of spiked samples at three different spiking levels ranged from 97% to 104%, and the relative standard deviation for repeatability was 2.5%, indicating satisfactory accuracy and precision of the proposed method. Quantitative analysis of six batches of samples revealed relatively low aluminum content, suggesting a negligible safety risk for clinical applications. In summary, the established method, which integrates total matrix introduction with matrix matching, enables direct sample introduction for the determination of aluminum in high-salt and high-sugar matrix injections, effectively controlling both matrix and spectral interference. The method is simple, accurate, and reliable, making it suitable for routine determination of aluminum content in compound sodium acetate Ringer's injection and providing a valuable methodological reference.

收稿日期: 2026-07-18; **修回日期:** 2026-09-02; **接受日期:** 2026-09-08

基金项目: 江苏省科技资源统筹服务中心项目 (TC2024A073); 江苏省食品药品监督检验研究院科研项目 (JSIFDC202404)

作者简介: 许慧 (1995-), 女, 江苏泰州人, 硕士, 主管药师, 主要研究方向为药品质量研究。

通讯作者: 吴秋云, E-mail: 723144678@qq.com。

for rapid batch analysis of other complex matrix injections in pharmaceutical quality control laboratories.

Keywords: matrix matching; total matrix introduction system; inductively coupled plasma mass spectrometry; compound sodium acetate Ringer's injection; aluminum

复方醋酸钠林格注射液是一种大容量注射液,常用规格为 250 mL 和 500 mL,临床用于循环血容量及组织液减少时细胞外液的补充及代谢性酸中毒的纠正,长期使用使用有铝积蓄中毒的风险^[1],因此控制其中的铝元素含量极为必要。《美国联邦法规》

(Code of Federal Regulations, CFR) 21 CFR 201.323 明确规定用,于全胃肠外营养(TPN)治疗的大容量胃肠外(LVP)药物产品的铝含量不得超过每升 25 微克。日本药典附录收录了 TPN 微量铝的检测方法,同样要求其铝含量低于每升 25 微克。该严苛的限度给此类产品铝(Al)元素含量的准确测定带来极大挑战。同时,铝元素在自然界中广泛存在,极易从检测环境中迁移进入待测溶液,对样品造成污染,导致检测结果偏差。因此,检验方法应尽量减少消解、转移、稀释等操作步骤,以降低样品被污染的可能。稀释样品可以降低基体效应,但同时也会成倍降低标准曲线浓度,对方法灵敏度造成挑战^[2]。因此,直接进样是规避上述问题、实现一步到位的最优选择。

电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)是被中国药典、美国药典、欧洲药典共同收录的元素检测方法^[3-6],其良好的检测限非常适合测定铝元素。但基体耐受性较差是其一大缺陷^[7,8],通常情况下 ICP-MS 的最大固溶量小于 0.1%,而复方醋酸钠林格注射液固溶量大于 2%,如直接进样测定会造成强烈的基体效应,导致测定结果不准确,并且样品会在锥上形成沉积,干扰仪器状态和后续测定。

全基体进样系统作为一种在线稀释技术,能够与 ICP-MS 配合使用。在雾化室和炬管之间(即在雾化室出口处)加入第二路气流(稀释气体),并通过调节雾化气和稀释气的比例更改稀释倍数^[9]。在线气体稀释技术可用于未稀释以及高基体样品,直接进样至系统,省去前处理中的手动稀释步骤,从而节省操作时间、减少试剂使用、防止样品污染并避免人为错误。由于环境监测、地质冶金、半导体研究等领域对基体耐受性有很高要求,全基体进样系统在这些领域早已得到广泛应用^[10,11],而药品元素杂质控制技术起步较晚,该技术在药品检测应用领域尚未普及。

本文使用 NexION 5000G 选配的耐高盐全基体进样系统,结合无水葡萄糖基体匹配,开发了一种

测定复方醋酸钠林格注射液中铝元素的方法,实现直接进样的同时,大幅降低注射液中高盐高糖基体的影响。该方法适用于快速、准确测定大批量注射液中的铝元素。

1 实验部分

1.1 主要仪器与试剂

NexION 5000G 型电感耦合等离子体质谱仪(美国珀金埃尔默仪器有限公司); Milli-Q 型超纯水处理系统(美国密理博公司)。

硝酸(UP 级,苏州晶锐化学有限公司); D-无水葡萄糖(GC 级,上海麦克林生化科技股份有限公司); 铝(Al)、铍(Be)、钪(Sc)、锆(Ge)单元素标准溶液(1000 mg/L,国家有色金属及电子材料分析测试中心)。

复方醋酸钠林格注射液(实验室自制)。

1.2 实验方法

1.2.1 溶液制备

稀释液: 2%硝酸(含 0.2%的无水葡萄糖)

Al 标准储备溶液: 精密移取 Al 单元素标准溶液,用 2%硝酸溶液稀释,制备成 Al 质量浓度为 6.25 mg/L 的 Al 标准储备溶液。

系列标准工作溶液: 精密移取适量的 Al 标准储备溶液,用稀释液稀释,制备成 Al 质量浓度分别为 0、5、12.5、25、37.5、50 $\mu\text{g/L}$ 的 Al 标准溶液系列。

混合内标溶液: 精密移取 Be、Sc、Ge 单元素标准溶液,用 2%硝酸溶液稀释,制备成质量浓度均为 200 $\mu\text{g/L}$ 的混合内标溶液。

供试品溶液: 取本品为供试品溶液。

加标样品溶液: 精密移取适量的 Al 标准储备溶液,用样品稀释,配制成含 Al 质量浓度为 12.5、25、37.5 $\mu\text{g/L}$ 的溶液,分别对应 50%、100%、150% 3 个浓度水平。

1.2.2 仪器工作条件

等离子体功率 1600 W; 等离子气体流量: 16 L/min; 雾化气流量 0.79 L/min; 稀释气流量 0.2 L/min; 蠕动泵速 35 r/min; MS/MS 模式, Q1 和 Q3 均设定为 m/z 27; He 碰撞模式; 重复次数 3 次,积分时间 1s。目标元素 ^{27}Al , 内标元素 ^{45}Sc , 通过在线引入混合内标。

1.2.3 样品测定

在 1.2.2 仪器工作条件下,以标准曲线法分别测定 1.2.1 制备的溶液。

2 结果与讨论

2.1 基体匹配法与干扰消除

复方醋酸钠林格注射液成分组成复杂,处方中无水葡萄糖含量最高,同时含有大量无机盐,这些均可导致严重的基体效应,对电离能较低的 Al 元素测定造成干扰。为抑制干扰,首先采用全基体进样在线稀释技术,有效减少实际抵达等离子体的固体总量,从源头降低基体效应。另外采用基体匹配法,在系列标准工作溶液中添加 0.2%的无水葡萄糖,缩小标准曲线和样品的基体差异。复方醋酸钠林格注射液组分复杂,各辅料本身即可能存在铝残留,难以制备不含铝的真实空白基质。因此仅通过添加 0.2%无水葡萄糖进行基体匹配,结合在线稀释技术和内标⁴⁵Sc 实时校正,基本消除了基体效应影响。

基体匹配法在冶金分析、地质分析、催化剂分析等化工领域早已广泛应用^[12,13],但近年来才在药品领域有为数不多的相关应用^[14,15]。该方法与标准加入法原理相似,较标准加入法其优点在于无需为每批样品专门制备标准曲线,适用于大批量样品的检测。

为进一步消除无机盐组分可能引入的质谱型干扰,本方法采用串联四极杆 (MS/MS) 技术并结合氦气 (He) 碰撞模式。MS/MS 模式下, Q1 和 Q3 均设定为 m/z 27,对离子进行双重质量筛选,在反应池前即排除了绝大多数非目标质量的干扰,同时, He 碰撞模式利用动能歧视 (KED) 效应,二者协同作用,确保了 Al 元素测定结果的准确性。

2.2 稀释气流量和内标元素的选择

设定 3 组在线稀释流量参数,第 1 组:雾化气流量 0.89 L/min,稀释气流量 0.1 L/min;第 2 组:雾化气流量 0.79 L/min,稀释气流量 0.2 L/min;第 3 组:雾化气流量 0.69 L/min,稀释气流量 0.3 L/min。

表 3 稀释气流量 0.1 L/min 时各元素作为内标的回收率

Tab.3 Recovery rates using different elements as internal standards at a dilution gas flow rate of 0.1 L/min

内标元素	本底浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	加入浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	测定浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收率/%			回收率	
							平均值/ %	RSD/%
⁹ Be	0.381	12.5	13.102	12.952	13.028	102	101	101
		25.0	24.752	25.078	25.024	97	99	99
		37.5	36.370	16.506	20.685	96	43	54

设定 3 种内标元素,分别为 ⁹Be、⁴⁵Sc、⁷²Ge。在 3 组气体参数下分别用 3 种内标元素测定 Al 系列标准工作溶液,以元素的质量浓度为横坐标,以经内标校正的响应强度为纵坐标,采用强制过原点拟合标准曲线。线性范围为 5~50 $\mu\text{g}/\text{L}$,线性回归方程见表 1,相关系数见表 2。

表 1 不同内标的线性回归方程表

Tab.1 Linear equations for different internal standards

内标 元素	线性回归方程		
	稀释气流量 (0.1 L/min)	稀释气流量 (0.2 L/min)	稀释气流量 (0.3 L/min)
⁹ Be	$y=0.420x$	$y=0.610x$	$y=0.576x$
⁴⁵ Sc	$y=0.042x$	$y=0.035x$	$y=0.032x$
⁷² Ge	$y=0.278x$	$y=0.234x$	$y=0.192x$

表 2 不同内标的相关系数结果表

Tab.2 Results of correlation coefficient for different internal standards

内标 元素	相关系数 r		
	稀释气流量 (0.1 L/min)	稀释气流量 (0.2 L/min)	稀释气流量 (0.3 L/min)
⁹ Be	0.9997	0.9990	0.9999
⁴⁵ Sc	0.9998	0.9994	0.9999
⁷² Ge	0.9998	0.9991	0.9998

结果显示,在 3 组在线稀释流量参数条件下,以 ⁹Be、⁴⁵Sc、⁷²Ge 为内标元素测定铝元素的标准曲线,相关系数均大于 0.999,均符合测定要求。

2.2.1 回收率考察

取 1.2.1 制备的供试品溶液,并按照 1.2.1 加标样品溶液的制备方法制备 50%、100%、150% 3 个浓度水平的加标样品溶液,每个浓度水平平行制备 3 份。分别改变在线稀释气流量 (0.1、0.2、0.3 L/min) 及内标元素 (⁹Be、⁴⁵Sc、⁷²Ge),测定各条件下本底浓度及 9 份加标样品中的铝含量,计算加标回收率,以考察不同条件对方法准确度的影响。回收率结果见表 3~5。

		12.5	10.466	10.251	10.326	82	80	81		
⁴⁵ Sc	0.205	25.0	19.721	19.799	19.823	78	78	78	70	25.8
		37.5	28.583	13.278	16.015	76	35	42		
		12.5	12.903	12.853	12.925	100	100	100		
⁷² Ge	0.398	25.0	24.586	24.669	24.663	97	97	97	86	28.9
		37.5	35.665	14.293	18.270	94	37	48		

表 4 稀释气流量 0.2 L/min 时各元素作为内标的回收率

Tab.4 Recovery rates using different elements as internal standards at a dilution gas flow rate of 0.2 L/min

内标元素	本底浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	加入浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	测定浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)			回收率/%			回收率 平均值/ %	回收率 RSD/%
^9Be	0.239	12.5	11.546	11.590	11.075	90	91	87	89	3.1
		25.0	21.949	21.332	23.282	87	84	92		
		37.5	34.541	33.772	32.550	91	89	86		
^{45}Sc	0.353	12.5	13.103	13.087	12.570	102	102	98	100	2.8
		25.0	24.948	24.544	26.337	98	97	104		
		37.5	39.249	38.409	36.965	104	101	98		
^{72}Ge	0.400	12.5	13.941	14.005	13.583	108	109	105	107	2.6
		25.0	26.510	26.098	28.043	104	103	111		
		37.5	41.711	40.862	39.486	110	108	104		

表 5 稀释气流量 0.3 L/min 时各元素作为内标的回收率

Tab.5 Recovery rates using different elements as internal standards at a dilution gas flow rate of 0.3 L/min

内标元素	本底浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	加入浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	测定浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)			回收率/%			回收率 平均值/ %	回收率 RSD/%
^9Be	0.277	12.5	13.310	12.335	12.894	104	96	101	100	3.4
		25.0	24.215	24.101	26.070	96	95	103		
		37.5	39.023	37.853	37.369	103	100	99		
^{45}Sc	0.279	12.5	13.368	12.711	13.467	105	99	106	103	3.4
		25.0	24.883	25.124	27.262	98	99	108		
		37.5	40.392	39.125	38.992	107	104	103		
^{72}Ge	0.200	12.5	12.739	12.222	12.898	100	96	102	101	3.1
		25.0	24.709	24.759	26.463	98	98	105		
		37.5	39.668	38.932	38.343	105	103	102		

由表 3 可知, 稀释气流量 0.1 L/min 时, 以 ⁹Be 为内标元素, 回收率在 43%~102%之间, 其中 3 份 150%浓度水平的回收率分别为 96%、43%、54%, 数据波动较大; 以 ⁴⁵Sc 为内标元素, 回收率在 42%~82%之间, 其中 3 份 150%浓度水平的回收率分别为 76%、35%、42%, 整体偏低; 以 ⁷²Ge 为内

标元素, 回收率在 37%~100%之间, 其中 3 份 150%浓度水平的回收率分别为 94%、37%、48%, 数据稳定性较差。以上数据总体呈“先正常后异常”的规律特征, 这可能是因为稀释气流量过低, 不足以消除基体干扰, 导致样品在采样锥口逐渐沉积。综上, 稀释气流量 0.1 L/min 时, 以 ⁹Be、⁴⁵Sc、⁷²Ge 为内标

元素，回收率均不能达到常规可接受的范围，该条件下的方法准确度不能满足测定要求。

由表 4 可知，稀释气流量 0.2 L/min 时，以 ^9Be 为内标元素，回收率在 84%~92%之间，平均值为 89%；以 ^{45}Sc 为内标元素，回收率在 97%~104%之间，平均值为 100%；以 ^{72}Ge 为内标元素，回收率在 103%~111%之间，平均值为 107%。该稀释气流量参数下，使用 3 种内标时铝元素的回收率均符合测定要求，其中 ^{45}Sc 作为内标元素时回收率最优。

由表 5 可知，稀释气流量 0.3 L/min 时，以 ^9Be 为内标元素，回收率在 95%~104%之间，平均值为 100%；以 ^{45}Sc 为内标元素，回收率在 98%~108%之间，平均值为 103%；以 ^{72}Ge 为内标元素，回收率在 96%~105%之间，平均值为 101%。该稀释气流量参数下，3 种内标的回收率均符合测定要求。

综上，稀释气流量对方法的准确度具有显著影响，且不同内标元素在各流量条件下的表现存在差异。在 0.2 L/min 和 0.3 L/min 的稀释气流量下，方法准确度均可接受，其中以 ^{45}Sc 为内标元素在 0.2 L/min 稀释气流量条件下回收率范围窄、数据离散程度小。

2.2.2 重复性考察

按照 1.2.1 条件下加标样品溶液的制备方法制备 100%浓度水平的加标样品溶液，平行制备 6 份，分别在不同在线稀释气流量参数（稀释气流量 0.2 L/min 和 0.3 L/min）和不同内标元素（ ^9Be 、 ^{45}Sc 、 ^{72}Ge ）下测定，考察各方法的重复性，结果的相对平均偏差见表 6。

表 6 重复性结果

Tab.6 Results of repeatability

内标元素	RSD/%	
	稀释气流量	稀释气流量
	(0.2 L/min)	(0.3 L/min)
^9Be	3.0	3.7
^{45}Sc	2.5	3.9
^{72}Ge	2.5	3.1

使用相同内标元素时，稀释气流量 0.2 L/min 条件下测定结果的 RSD 值均小于稀释气流量 0.3 L/min 条件下测定结果的 RSD 值，说明稀释气流量 0.2 L/min 时方法的重复性更好。在 0.2 L/min 流量下， ^{45}Sc 和 ^{72}Ge 作为内标元素的 RSD 均为 2.5%，均优于 ^9Be 的 3.0%。综合考虑准确度与重复性，稀释气流量设为 0.2 L/min，内标选择 ^{45}Sc 。

2.3 检测限和定量限

在 1.2.2 仪器工作条件下，取 11 份稀释液测定，测定得到标准偏差（SD）为 0.07，取 3 倍 SD 为检测限，10 倍 SD 为定量限，计算得到检测限和定量限分别为 0.2 $\mu\text{g/L}$ 和 0.7 $\mu\text{g/L}$ 。本检出限和定量限基于稀释液计算得到，稀释液与实际样品基质存在差异。由于复方醋酸钠林格注射液组分复杂，各组分本身即可能存在铝残留，难以获得不含铝的真实空白基质，因此采用稀释液进行计算是当前现实条件下的可行方案。结合本方法采用的基质匹配校准和内标校正策略，该检测限和定量限仍可作为方法灵敏度的重要参考。

2.4 线性与范围、回收率

线性范围为 5~50 $\mu\text{g/L}$ ，采用强制过原点拟合，线性回归方程为 $y=0.035x$ ，相关系数为 0.9994。在线性范围内线性关系良好。回收率均在 97%~104%之间，平均值为 100%，RSD 为 2.8%。方法准确度良好。

2.5 精密度试验

按 1.2.1 条件下加标样品溶液的配制方法制备 100%浓度水平的加标样品溶液，平行配制 6 份，在 1.3 仪器工作条件下测定。6 份含量 RSD 为 2.5%。表明该方法的精密度良好，可满足铝元素的测定需求。

2.6 样品测定结果

取收集到的复方醋酸钠林格注射液，照 2.2 下仪器条件直接测定。6 批铝元素含量见表 7。

表 7 样品测定结果

Tab.7 Results of sample determination

元素	样品编号	含量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 1)	是否低于 25 $\mu\text{g/L}$
Al	1	0.5	是
	2	0.6	是
	3	0.5	是
	4	0.3	是
	5	0.3	是
	6	0.4	是

值得注意的是，以上 6 批样品均来源于同一生产企业，样品批次覆盖范围有限，所得结果仅能反映该企业特定批次产品的铝含量水平。

3 结论

本研究针对复方醋酸钠林格注射液高盐高糖的基体特征，采用基体匹配法结合全基体进样，建立了直接测定其中铝元素含量的方法。通过对稀释气

流量及内标元素进行系统优化与方法学验证, 确定了最佳测定条件, 方法表现出良好的准确度和精密度。

使用该方法测定样品无需任何前处理, 可直接由原包装引入检测系统, 有效避免外界污染, 显著简化分析流程, 同时减少了稀释试剂和耗材的使用, 响应绿色分析理念, 降低检验成本。基体匹配法和全基体进样的联合应用将基体效应控制在可接受水平, 结合串联四极杆 (MS/MS) 和 He 碰撞模式, 保证检测结果的准确性。该方法可为复杂基体注射液的元素杂质检测提供参考。

参考文献:

- [1] Li E A, Ding J W, Lu R Z, Su L P, Shang D S, Wang H F, Han Y X, Ding Y. *Shandong Chem. Ind.*, 2024, **53(20)**: 40.
李恩澳, 丁极武, 陆荣政, 苏琳萍, 尚东升, 王洪福, 韩业祥, 丁悦. 山东化工, 2024, **53(20)**: 40.
- [2] Fu Y, Wang Y. *Phys. Test. Chem. Anal. Part B*, 2023, **59(1)**: 110-112.
傅玉, 王勇. 理化检验 (化学分册), 2023, **59(1)**: 110-112.
- [3] Feng X J, Zheng G J. *Chin. J. Inorg. Anal. Chem.*, 2025, **15(3)**: 353.
冯先进, 郑国经. 中国无机分析化学, 2025, **15(3)**: 353.
- [4] Gong Z S, Jiang X H, Yang Y, Tian Y Z, Li Y B, Zhang X X, Liu J, Zhang C, Xu Y, Yao H C. *J. Instrum. Anal.*, 2020, **39(8)**: 1058.
龚子珊, 蒋学慧, 杨雨, 田永志, 李一博, 张潇潇, 刘佳, 张辰, 徐洋, 姚宏程. 分析测试学报, 2020, **39(8)**: 1058.
- [5] Acker T, Theiner S, Bolea-fernandez E, Vanhaecke F, Koellensperger G. *Nat. Rev. Meth. Primers*, 2023, **3(1)**: 52.
- [6] Borah A, Ramchiary B, Basak S. *J. Prev. Diagn. Treat. Strategies Med.*, 2025, **4(4)**: 259-269.
- [7] Hu F F, Liu P Y, Yu L, Wang C H, Chen X F. *Chem. Reag.*, 2022, **44(2)**: 306-309.
胡芳菲, 刘鹏宇, 于磊, 王长华, 陈雄飞. 化学试剂, 2022, **44(2)**: 306-309.
- [8] Yang D S, Zhai C F, Liu N, Wang Y C, Wang Y L, Huang S Y, Cao K. *J. Chin. Pharm. Sci.*, 2026, **35(1)**: 80.
杨东升, 翟晨飞, 刘念, 王颖晨, 王雅丽, 黄思远, 曹凯. 中国药理学杂志 (英文版), 2026, **35(1)**: 80.
- [9] Duyck C, Alves P R R, Rocha A A, Oliveira D, Carvalho C M, Lopes G S. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2022, **37(3)**: 474.
- [10] Ma X Z, Liu X, Ma Z, Li D Z, Li L, Sun Y D, Zhang L Q, Wang Y J, Chen J, Zhao F C. *Sci. Rep.*, 2025, **15(1)**: 30457.
- [11] Zhang W, Xu Y B, Gao M, Zhang X P, Wang Y. *Chin. J. Inorg. Anal. Chem.*, 2024, **9**: 1242.
张吴, 徐义邦, 高明, 张晓萍, 王瑶. 中国无机分析化学, 2024, **9**: 1242.
- [12] Qiao N, Bao Y H, Yang L, Zuo Z Y, Tong J H, Dong J S. *Metall. Anal.*, 2019, **39(11)**: 9-15.
乔娜, 包毓含, 杨丽, 左兆宇, 童建华, 董佳姝. 冶金分析, 2019, **39(11)**: 9-15.
- [13] Liao Y O, Liu C, Zhao S Y. *Spectrosc. Spectral Anal.*, 2020, **40(S1)**: 295-296.
廖奕鸥, 刘聪, 赵素云. 光谱学与光谱分析, 2020, **40(S1)**: 295-296.
- [14] Li Z, Wu Y, Nie J J, Xu Q, Huang Y W. *Chin. J. Pharm.*, 2022, **53(9)**: 1311.
李忠, 吴杨, 聂金菊, 许奇, 黄逸文. 中国医药工业杂志, 2022, **53(9)**: 1311.
- [15] Shen T T, Zhang B, Li Y, Du R X, Zhang Y L. *Chin. J. Pharm. Anal.*, 2024, **44(2)**: 316-323.
沈湉湉, 张兵, 李烨, 都若曦, 张毅兰. 药物分析杂志, 2024, **44(2)**: 316-323.