



# 如何正确选用 原子光谱技术？

满足您实验室当前和未来的需求



# 目录

<b>原子光谱的工作原理</b>	<b>3</b>
原子光谱	3
原子吸收光谱 (AA)	3
原子发射光谱	4
微波等离子体原子发射光谱 (MP-AES)	4
电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-OES)	4
原子质谱	5
电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS)	5
串联四极杆电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS/MS)	7
<b>如何选择合适的技术?</b>	<b>8</b>
并列比较	8
您需要检测哪些元素?	10
您需要检测多少元素和样品?	12
线性范围	13
检测限	13
干扰	14
成本	17
日常维护	17
易用性和分析人员技能要求	18
方法 — 法规方法和可用的预开发方法	18
<b>样品前处理</b>	<b>19</b>
液体样品	19
固体样品	19
消解、稀释和过滤	20
有机样品前处理	20
溶剂专用仪器组件	21
<b>校准</b>	<b>22</b>
<b>应用</b>	<b>24</b>
各种应用的常用技术	24
针对常见检测场景的建议	26
<b>可能需要的其他组件</b>	<b>37</b>
<b>安捷伦原子光谱仪</b>	<b>39</b>
了解的价值	39

# 原子光谱的工作原理

## 原子光谱

原子光谱是指通过观察样品的电磁光谱或质谱来测定元素组成的多种分析技术。

原子光谱技术可以划分为两大类，一类通过电磁光谱鉴定分析物元素，另一类通过质谱鉴定元素。在环境实验室中，最常用的电磁光谱技术是原子吸收和原子发射光谱。从技术角度来讲，基于 X 射线的技术（如 X 射线荧光 (XRF) 和 X 射线衍射 (XRD)）也属于电磁光谱技术。

## 原子吸收光谱 (AA)

原子吸收光谱技术的理论依据为每种元素会吸收具有特征波长的光，使电子由基态跃迁至激发态。吸收的光能量与光路中的分析物原子数量成正比。

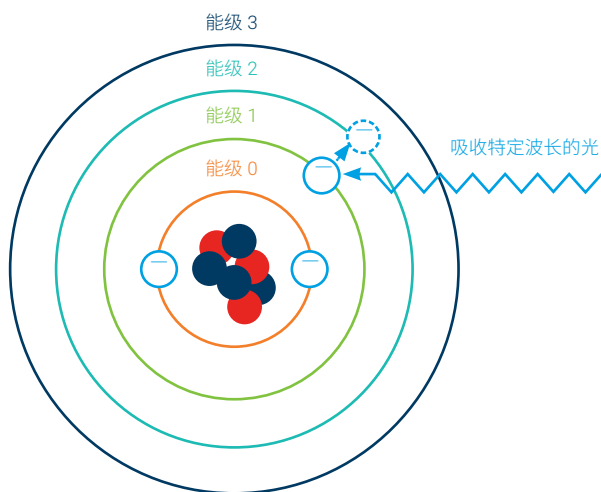


图 1. 通过吸收特定波长的能量（光），电子从基态激发到更高的能级。在原子吸收光谱中，所吸收光的波长是由原子的类型（属于哪种元素）和电子移动的能级决定。吸收的光能量由样品中元素的浓度决定

通过将已知浓度分析物原子引入光路并以吸收量对浓度绘制曲线的方法对此项技术进行校准。每种分析物元素所用的特征光源为空心阴极灯 (HCL) 或无极放电灯 (EDL)。通常，每种灯专用于分析一种元素，但在某些情况下，可以将几种元素的分析结合到一种灯中。由于存在这一限制，尽管原子吸收光谱能够对 67 种元素进行测量（并非同时测量），但其通常仅限于分析每个样品中的少数几种分析物元素。

在原子吸收光谱分析过程中，必须采用高温使分析物元素原子化（转化为原子态）。将液体样品经由雾化器引入火焰原子吸收光谱仪 (FAAS) 的高温乙炔火焰中，使元素原子化。或者，将干燥样品置于小直径石墨管中进行电阻加热（石墨炉原子吸收光谱仪，GFAAS），也可使元素原子化（图 2）。

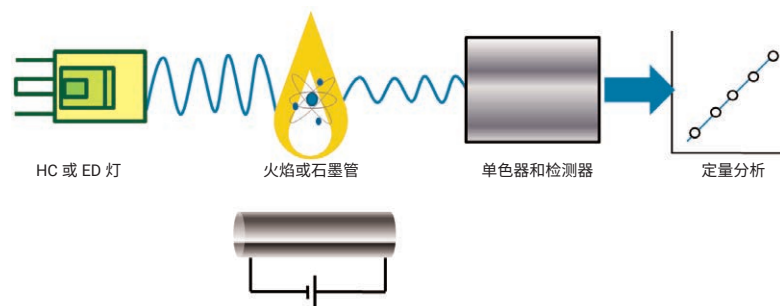


图 2. 火焰或石墨炉原子吸收光谱仪系统示意图

FAAS 虽简单经济，但存在火焰中原子密度瞬变和相对分散的限制，因此相比于其他技术其灵敏度较差。典型检测限为高 ppb 至 ppm 范围。GFAAS 的优点包括可编程温度控制。基于这种温度控制，可以利用沸点的不同使溶剂和基质（除要测量的元素之外，样品中的其他成分）与分析物分离。此外，分析物在 GFAAS 中原子化后将保留在小体积石墨管中，可实现更长时间的测量。因此，使用 GFAAS 获得的检测限远低于 FAAS，通常处于亚 ppb 范围内。然而，与 FAAS 相比，GFAAS 可以测量的分析物更少，并且分析速度要慢得多。

## 原子发射光谱

由于每种元素都需要专用的 HCL 光源，因此 AAS 在单个样品中可检测的元素数量有限。同时，FAAS 的灵敏度相对较差，而 GFAAS 的分析速度较慢。原子发射光谱技术克服了这些限制，得到了广泛的应用。原子发射光谱技术的理论依据是一旦特定元素的原子被激发（与原子吸收光谱一样），它在返回基态时将发射出具有特征波长的光（发射谱图）（见图 3）。

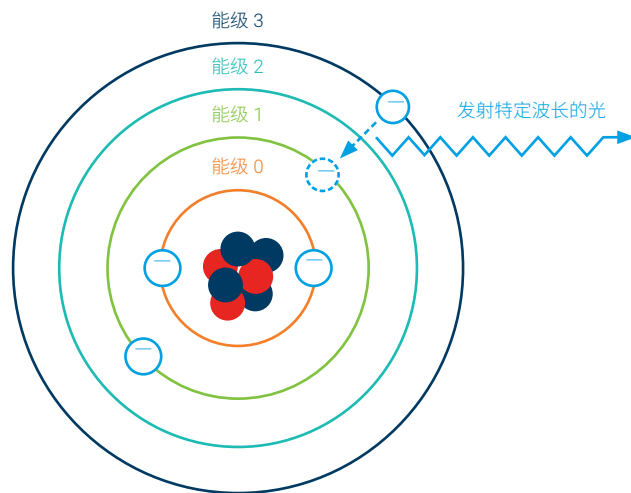


图 3. 电子从高能级返回基态时，发射出特定波长的光。原子或离子的类型（即它是哪种元素的原子或离子）及电子跃迁的能级共同决定了所发射光的波长

尽管可以采用类似于 FAAS 仪器的火焰型仪器进行原子发射光谱分析，但火焰并非原子发射的理想激发源。AA 中所用空气-乙炔火焰的典型温度为 2000 K 左右，一氧化二氮-乙炔火焰为 3000 K 左右。替代的原子发射源包括微波等离子体 (MP) 和电感耦合等离子体 (ICP)。两者的温度均远高于火焰。与 FAAS 相比，更高的温度提供了更广泛的元素覆盖范围和更高的灵敏度。

## 微波等离子体原子发射光谱 (MP-AES)

氮气 MP 的温度明显高于乙炔火焰，温度可达近 5000 K。在这样的温度下，大多数元素的原子发射强度较高，与火焰 AA 相比，可改善对大多数元素的检测能力和线性动态范围。由于 MP 采用氮气运行，与火焰 AA 相比，持续运行的成本显著降低。采用氮气发生器作为等离子体的氮气源可进一步节省成本。这项技术比火焰 AA 的安全性更高，因为它采用惰性氮气而非可燃气体乙炔。使用惰性氮气还可进行无人值守的过夜样品分析，而 FAAS 则不建议在无人值守的情况下过夜运行。

MP-AES 使用扫描单色器和固态检测器，无需使用多种灯。与 FAAS 相比，该技术还提供了更快的样品分析周转时间，在元素（分析物）数量较多时尤其实用。在采用合适的进样配置时，MP-AES 能够运行总溶解固体 (TDS) 含量约 3% 的样品。

由于 MP-AES 是一种相对较新的技术，在一些法规方法中可能不被认可，在这些情况下，实验室必须采用特定的技术进行分析。如果可以证明 MP-AES 等新技术与成熟技术等效，其他行业和监管机构将认可这种基于性能的验证。

## 电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-OES)

氩气 ICP 的温度高于氮气 MP 且远高于乙炔火焰。ICP 的温度高达近 10000 K，能够使样品完全原子化并大量离子化，减少分子干扰并尽可能增加可供检测的原子和离子发射。与 MP-AES 类似，ICP-OES 使用惰性气体（氩气）而非可燃气体（例如 FAAS 所用的乙炔），支持无人值守的过夜样品分析，并提高了安全性。除无需每种元素各使用一种灯以外，ICP-OES 相比 FAAS 还具有许多优势。ICP-OES 是一种真正的多元素分析技术，能够同时或几乎同时测量多达 74 种元素，并获得低至 ppb 级的检测限。因此，ICP-OES（也称作 ICP-AES，电感耦合等离子体原子发射光谱）已成为包括环境监测在内的许多行业进行元素测定的主流仪器。

氦等离子体的高温还意味着 ICP-OES 可耐受最高含有约 25% 总溶解固体 (TDS) 的复杂基质 (取决于具体配置)。此外, ICP-OES 的灵敏度介于 FAAS/MP-AES 和 GFAAS 之间 (低 ppb 级至百分级)。因此, ICP-OES 能够测量之前使用 FAAS 测定的所有元素。ICP-OES 还可以测量因需要更低报告限而需要使用 GFAAS 进行测定的一些元素。

然而, ICP-OES 无法实现 GFAAS 的亚 ppb 和 ppt 级检测限范围。因此, 使用 ICP-OES 作为主要元素分析技术的实验室仍需要借助高灵敏度技术 (例如 GFAAS 或 ICP-MS, 请参阅下一节) 对 As、Se、Cd 和 Pb 等元素进行痕量分析。随着样品数量的增加, GFAAS 会成为实验室分析效率的限制因素。因此, 样品数量较多的实验室通常会选择可提供多元素分析并具有较低检测限的 ICP-MS。

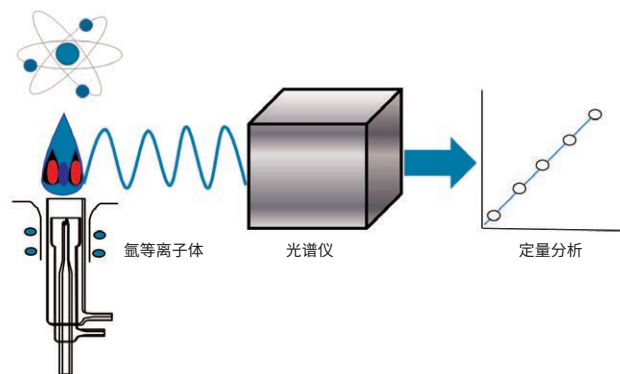


图 4. ICP-OES 光谱仪系统的简化示意图

## 原子质谱

原子质谱 (MS) (也称为无机质谱) 是指使用质谱仪分离和检测原子或元素的技术。原子质谱不同于“有机”质谱技术 (例如 LC/MS 和 GC/MS), 后者用于检测有机分子或化合物。

为了能够通过 MS 测量样品的元素组成, 将元素的原子转化为带电离子, 从而实现它们的聚焦和分离。离子源可以采用辉光放电 (GD)、火花、灯丝、离子枪、激光或等离子体 (如 ICP-MS 中所用)。一些离子源 (GD、火花、激光) 用于测量固体样品, 而等离子体可以处理液体样品 (例如水溶液和酸消解液)。

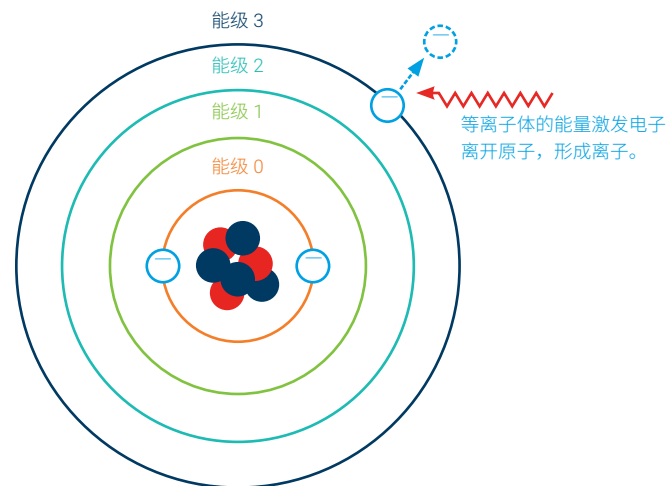


图 5. 氦等离子体提供的能量使元素原子丢失一个电子, 形成单电荷阳离子

用于分离离子的质谱仪可以是扇形磁场、飞行时间、离子阱或四极杆质谱仪。四极杆质谱仪能够在高传输效率、小于 1 个质量单位 (u) 的分辨率和相对较低的成本之间实现良好的平衡。大多数 ICP-MS 系统使用四极杆质量过滤器, 无论是单四极杆配置还是串联四极杆 (例如 ICP-MS/MS)。

为了提供高传输效率和分辨率, 将质谱仪和检测器置于真空中。测量的离子在真空室内形成 (例如在辉光放电的情况下) 或从外部离子源 (例如等离子体) 转移到高真空区域。不同的元素离子在质谱仪中得到分离后, 通常使用电子倍增器对它们进行计数。将在每个质量数处测得的离子数与已知标准品的信号进行比较, 并转换为分析材料中每种元素的浓度。

## 电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS)

在 20 世纪 80 年代中期, 人们将氦气 ICP 与四极杆质谱仪联用, 开发出第一批商业化 ICP-MS 仪器。这些仪器利用氦气 ICP 作为高效离子源, 并结合四极杆质谱仪的高灵敏度、简单的谱图和快速扫描功能。最终, 得到的仪器兼具 ICP-OES 的快速、同步、多元素分析能力与 GFAAS 的高灵敏度。在 ICP-MS 仪器中, 氦等离子体用作离子源。离子经由一组接口锥和离子透镜进入包含四极杆质量分析器的高真空区。离子被四极杆分离并传输到电子倍增器中进行检测 (图 6)。

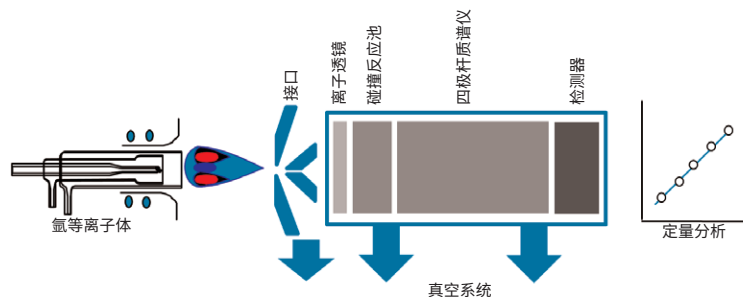


图 6. 四极杆 ICP-MS 系统主要元件的简化示意图

尽管 ICP-MS 中的氩等离子体与 ICP-OES 中的等离子体相似，但二者的用途不同。ICP-MS 中仅测量离子，因此等离子体经优化后用于电离元素原子。氩等离子体非常适合此用途，因为氩的电离势（IP，中性原子失去第一个电子所需的能量）为 15.76 电子伏特（eV）。这一电离势几乎高于任何其他元素的第一电离势，但低于它们的第二电离势，意味着可以将大多数元素的原子有效地转化为单电荷阳离子。

如果等离子体中心通道的温度较高，那么电离效率以及灵敏度也更高。通过使用高效固态发生器、宽内径炬管中心管和优化的操作条件，能够获得较高的等离子体温度。最终可以获得“稳定”等离子体，使大多数元素获得 95% 以上的电离效率。即使 Be、As、Se、Cd 和 Hg 等难电离元素也可大部分电离，因此能够在痕量（ppt）水平检测这些元素。等离子体稳定性是一种性能特征，常通过测量  $CeO^+/Ce^+$  之比进行监测。 $CeO^+$  是一种强结合的分子离子。如果 ICP-MS 等离子体具有解离  $CeO^+$  所需的足够能量，使  $CeO^+/Ce^+$  之比约为 1.5% 或更低，则认为该等离子体是稳定的。在较高的等离子体温度下运行 ICP-MS 能够使基质获得更充分的分解，从而减少基质沉积，提高稳定性并减少维护需求。较高的等离子体温度可提供更多的能量来解离其他分子离子，从而降低可能形成潜在光谱干扰的其他离子的浓度。

从等离子体中提取离子，然后这些离子通过高真空区进行分离和检测。使用离轴离子透镜组剔除光子和中性物质，并在碰撞/反应池（CRC）中使用氦气（He）池气体利用动能歧视（KED）去除剩余的分子（多原子）离子。He KED 模式可以过滤掉多原子离子，因为与受到重叠干扰的原子离子相比，多原子离子的体积较大，与池气体发生碰撞的频率更高。因此，与体积较小的分析物离子相比，多原子离子损失更多的能量，在池出口处使用偏压即可剔除这些多原子离子。He KED 模式改善了 ICP-MS 分析的准确度和可靠性，对于环境和食品实验室中样品的多元素分析而言更是如此。



图 7. 这段短视频介绍了氦气模式如何消除 ICP-MS 多原子干扰

四极杆质谱仪根据离子的质荷比（ $m/z$ ）对离子进行分离。对于单电荷离子， $m/z$  等于质量数，因此 ICP-MS 将  ${}^6Li$  到  ${}^{238}U$  的元素作为简单的特征原子（同位素）质谱图进行测量。许多元素具有质量数不同的多种同位素，对于这些元素，ICP-MS 还可提供同位素比和丰度信息。

四极杆是一种扫描质谱仪，但其扫描速度非常快（每秒超过 10 次全质量扫描）。这种高速扫描能力可实现所有元素的同时高效测量。在质量过滤器中分离后，离子将进入电子倍增检测器，每个到达该检测器的离子将产生一个脉冲信号。通过将信号与测量已知浓度标准品创建的校准曲线进行比较，将脉冲或“计数”转化为浓度。

ICP-MS 具有广泛的元素覆盖范围（日常可测量多达 70 种元素）以及从 1 ppt 以下至数千 ppm 的宽线性动态范围，兼具 ICP-OES 和 GFAAS 仪器的性能。

技术的不断进步已经克服了早期 ICP-MS 仪器对高浓度总溶解固体 (TDS) 耐受性差的情况。但多数现代 ICP-MS 仪器耐受的 TDS 浓度最高也仅 0.2% (2000 ppm) 左右，仅为相应 OES 技术的 1/100。为提高 ICP-MS 的基质耐受性，使其能够直接进样分析高 TDS 样品，通常会采用气溶胶稀释。安捷伦 ICP-MS 仪器具有超高基质进样 (UHMI) 系统。该技术在雾化室和 ICP 炬管之间加入自动校准的氦气，以稀释样品气溶胶。这样一来，到达等离子体的气溶胶量减少，可以分析高基质水平的样品，而不会引起信号抑制、基质沉积和漂移。UHMI 避免了与传统液体样品稀释相关的时间成本和潜在错误，并避免了使用自动稀释器的成本和复杂性。由于稀释发生在气相中，因此不会出现水溶液稀释剂的潜在污染，同时通过减少等离子体上的溶剂（水）载量提高了等离子体稳定性。UHMI 是安捷伦 ICP-MS 系统的标配，使仪器能够直接测量基质 TDS 含量高达 25% 的样品，与 ICP-OES 的分析能力接近。

### 串联四极杆电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS/MS)

原子光谱领域的最新进展是开发了基于串联质谱仪的 ICP-MS (ICP-MS/MS)，该系统通常采用串联四极杆 (MS/MS) 配置。术语“串联四极杆质谱仪”是指使用两个串联的传输四极杆质谱仪的仪器。两个质谱仪由包含多极杆离子导杆的碰撞/反应池分开（见 IUPAC 定义术语 528）。

Agilent 8900 ICP-MS/MS 采用了两个高频双曲面四极杆质量分析器，这两个质量分析器由八极杆反应池系统 (ORS) 碰撞/反应池分开。ORS 与安捷伦单四极杆 ICP-MS 系统中使用的反应池类似，但 MS/MS 配置允许反应池使用高反应性池气体。在反应气体模式下使用 ICP-MS/MS 是解决使用 He 模式和 KED 时无法解决的棘手干扰问题的实用且有效的方法。

ICP-MS/MS 的第一个四极杆 (Q1) 用于控制进入碰撞/反应池的离子。池中的碰撞或反应可以消除干扰，然后使用分析器四极杆 (Q2) 将分离的分析物离子传输至检测器。ICP-MS/MS 配置的简化示意图如图 8 所示。

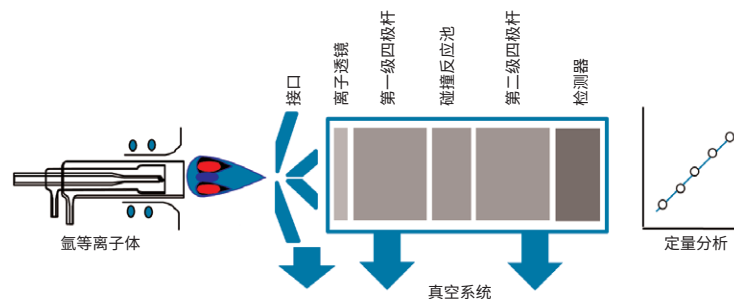


图 8. 串联四极杆 ICP-MS 的简化示意图

### 为何选择 ICP-MS/MS?

ICP-MS/MS 与单四极杆 ICP-MS 的主要区别在于 ICP-MS/MS 支持 MS/MS 运行，其中 Q1 和 Q2 均作为单位质量过滤器运行。Q1 选择进入反应池的分析物离子质量数，剔除所有其他质量数。这一选择过程确保了反应池中的离子一致且与样品组成无关，因此能够可靠地应用反应池气体方法。这种对反应化学过程的控制使 ICP-MS/MS 解决了采用传统四极杆 ICP-MS 无法解决的干扰问题。它能够分离直接重叠的同质异位素（例如  $^{204}\text{Hg}$  与  $^{204}\text{Pb}$  的重叠）、分离双电荷离子重叠（例如  $\text{REE}^{2+}$  与 As 和 Se 的重叠），并去除高强度背景干扰（ $\text{N}_2$  对  $^{28}\text{Si}$  的干扰、 $\text{O}_2$  对  $^{32}\text{S}$  的干扰等）。

与典型的单四极杆 ICP-MS 系统相比，8900 ICP-MS/MS 大大提高了灵敏度并降低了背景。同时，由于采用双重质量过滤步骤，8900 ICP-MS/MS 可提供更高的丰度灵敏度 (AS)（衡量相邻峰之间重叠程度的指标）。MS/MS 模式使 8900 能够从相邻质量数处的主峰中分离出痕量峰（例如，从 Fe-56 中分离 Mn-55）。

# 如何选择合适的技术？

无论是现在还是将来，选择适合您实验室的原子光谱技术时需要考虑多种因素。您需要测量哪些样品类型中的哪些元素？您的预算是多少？您实验室技术人员的技能水平如何？我们在下面介绍了您在选择技术时需要考虑的主要方面。

## 并列比较

我们首先对不同的原子光谱技术进行了大致比较（表 1）。

表 1. 原子光谱技术的并列比较

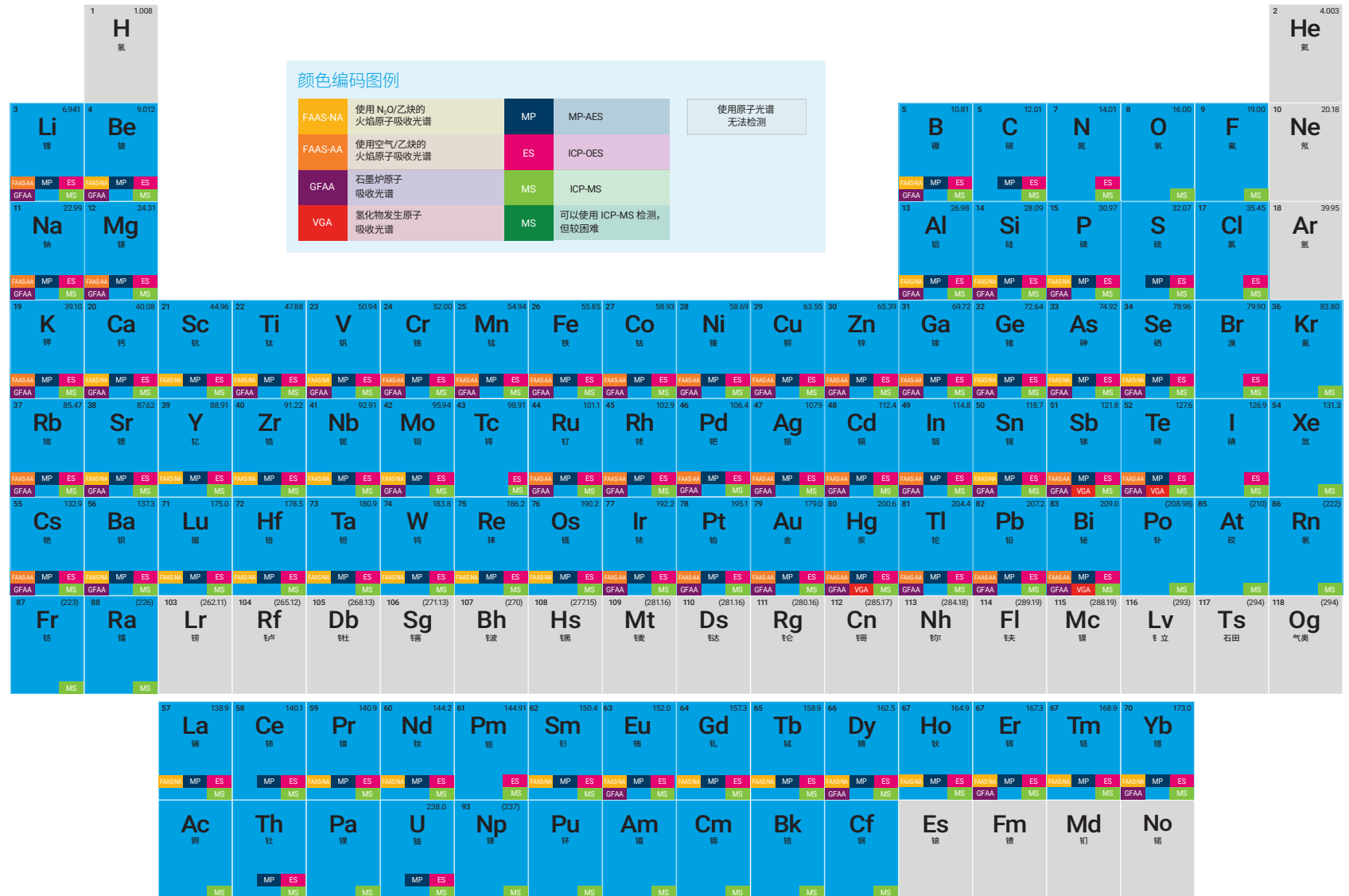
	FAAS <a href="#">查看产品</a>	GFAAS <a href="#">查看产品</a>	MP-AES <a href="#">查看产品</a>	ICP-OES <a href="#">查看产品</a>	ICP-MS <a href="#">查看产品</a>	ICP-MS/MS <a href="#">查看产品</a>
价格	Ⓢ	Ⓢ Ⓢ	Ⓢ Ⓢ	Ⓢ Ⓢ Ⓢ	Ⓢ Ⓢ Ⓢ Ⓢ	Ⓢ Ⓢ Ⓢ Ⓢ Ⓢ
单个样品的成本	Ⓢ Ⓢ	Ⓢ Ⓢ	Ⓢ	Ⓢ Ⓢ	Ⓢ Ⓢ Ⓢ	Ⓢ Ⓢ Ⓢ
灵敏度	🔍🔍	🔍🔍🔍🔍	🔍🔍	🔍🔍🔍	🔍🔍🔍🔍🔍	🔍🔍🔍🔍🔍🔍
评论	<a href="#">SelectScience</a>	<a href="#">SelectScience</a>	<a href="#">SelectScience</a>	<a href="#">SelectScience</a>	<a href="#">SelectScience</a>	<a href="#">SelectScience</a>
单日最大样品数量 <sup>1</sup>	100–200 (6 种元素)	60 (4 种元素)	300–400 (10 种元素)	2000–2500 (50 种元素以上)	1200 (50 种元素以上)	1200 (50 种元素以上)
检测的动态范围 <sup>2</sup>	100 ppb 至 1000 ppm	10 ppt 至 1000 ppb	100 ppb 至 1000 ppm	10 ppb 至 10000 ppm	<1 ppt 至 1000 ppm	<1 ppt 至 1000 ppm
样品用量	👉👉👉	👉	👉👉👉	👉👉	👉👉	👉👉
样品中固体的耐受能力	👉👉	👉👉👉	👉	👉👉👉👉	👉👉👉	👉👉👉
元素检测	顺序	顺序	顺序	同步	同步	同步
可检测多少种元素？	67	48	70	74	86	87
日常维护要求	🔧	🔧🔧	🔧	🔧🔧🔧	🔧🔧🔧🔧	🔧🔧🔧🔧
操作人员技能要求	🎓	🎓🎓🎓	🎓	🎓🎓	🎓🎓🎓	🎓🎓🎓🎓
是否支持无人值守运行	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Part 11/附录 11 GMP 合规性	✓ (配备可选的软件)	✓ (配备可选的软件)	✗	✓ (配备可选的软件)	✓ (配备可选的软件)	✓ (配备可选的软件)

	FAAS <a href="#">查看产品</a>	GFAAS <a href="#">查看产品</a>	MP-AES <a href="#">查看产品</a>	ICP-OES <a href="#">查看产品</a>	ICP-MS <a href="#">查看产品</a>	ICP-MS/MS <a href="#">查看产品</a>
规格						
运行能耗	⚡	⚡⚡	⚡⚡	⚡⚡	⚡⚡⚡	⚡⚡⚡
尺寸 (mm – 宽 × 深 × 高)	790 × 580 × 590 <sup>3</sup>	1030 × 600 × 590 <sup>3</sup>	960 × 660 × 660	625 × 740 × 887	730 × 600 × 595	1060 × 600 × 595
重量	75 kg	119 kg	73 kg	90 kg	100 kg	139 kg
气体要求	压缩空气和 99.0% 纯度的乙炔和/或 99.5% 纯度的 N <sub>2</sub> O (取决于测量的元素), 排气流速为 2.5 m <sup>3</sup> /min	99.99% 氩气或 99.99% 氮气, 排气流速为 3 m <sup>3</sup> /min	99.5% 纯度的氮气 <sup>4</sup> , 排气流速为 2.5 m <sup>3</sup> /min	99.95% 纯度的氩气 可选: 氮气、氧气, 排气流速为 2.5 m <sup>3</sup> /min	99.99% <sup>5</sup> 氩气, 排气流速为 5–7 m <sup>3</sup> /min	99.99% <sup>5</sup> 氩气, 排气流速为 5–7 m <sup>3</sup> /min
保修期 <sup>6</sup>	12 个月	12 个月	12 个月	12 个月	12 个月	12 个月
附件						
自动进样器	可选	包含	可选	可选	可选	可选
水冷系统	不需要	需要供应冷却水	不需要	需要, 但未包含	需要, 但未包含	需要, 但未包含

1. ICP-OES 和 ICP-MS 仪器必须安装切换阀, 方能达到该样品检测数量
2. 仅仪器的动态范围, 不使用任何可提高灵敏度的进样装置
3. 高度取决于所选的型号
4. MP-AES 只需要氮气, 可以通过氮气发生器从空气中提取。或者, 也可以使用氮气杜瓦瓶
5. 对于必须控制污染的应用场景, 比如检测半导体化学品中的杂质, 可能需要使用纯度至少为 99.999% 的氩气
6. 安捷伦提供多种等同保修期服务与支持选项

## 您需要检测哪些元素？

要考虑的第一个问题是您需要检测哪些元素？因为每种技术可以检测一系列不同的元素。以下带有彩色标记的元素周期表提供了不同的技术可以检测的元素类型的指南。但每种技术可以检测的浓度因元素而异。



## 原子光谱难以检测的元素

一些元素无法使用任何原子光谱技术进行检测，或需要采用专用方法。这些元素包括：

### N、O、Kr 和 Xe

实验室环境空气中含有丰富的氮和氧，通常用硝酸 (HNO<sub>3</sub>) 进行稳定的水溶液中也存在氮和氧。由此产生的高背景水平使得在没有专用方法的情况下很难检测低浓度下的这些元素。ICP-MS 可为 N 和 O 提供出色的检测限，但需要使用其他“干燥”样品引入方法，例如气体采样接口或 GC-ICP-MS。建议使用原子光谱的替代技术对这些元素进行常规分析。

Kr 和 Xe 是气体，因此校准并不容易。同时，它们难以电离，并且在用于支持 ICP 等离子体的高纯度氩气中存在痕量的 Kr 和 Xe。如果使用合适的进样系统，则可以使用 ICP-MS 检测这些元素。例如，Xe（氩气中 100 ppm Xe 气体标准品）通常用于调谐，以及作为 GC-ICP-MS 应用的内标。

### F 和 Cl

串联四极杆 ICP-MS 可以通过反应化学过程将 F 或 Cl 离子转化为可测量的产物离子，从而在相对较低的浓度下检测这些元素。可以使用单四极杆 ICP-MS 检测 Cl，但背景信号较高，检测限较差。

### H、He 和 Ne

任何原子光谱技术均无法检测这些元素。因为这些元素发射或吸收的光不在任何光学技术的可测量范围内。ICP-MS 无法提供解决方案，因为 H 和 He 不在 ICP-MS 的测量质量数范围内，而 Ne 在氩等离子体中不发生电离。

## Ar

ICP-OES 和 ICP-MS 均采用氩气作为等离子体源气体。这意味着 Ar 的背景水平非常高，因此难以使用这些技术进行检测。

## 短寿命元素

At、Fr、Rn 以及原子序数大于 99 的元素具有较高的放射性，意味着它们会迅速衰变为另一种元素或同位素。其中一些元素是天然存在的，如氡 (Rn)，但这些放射性元素大多寿命太短，无法使用原子光谱技术进行检测。辐射测量技术（放射性衰变计数）是用于测定这些元素的常用方法。

## 测量同位素比

质谱测量 (ICP-MS) 支持的高级应用之一是能够分离和测量元素的各个同位素。该功能可以确定两种或更多同位素的比值，这对于同位素丰度存在自然变化的应用非常有用。例如在地质年代学中，某些元素（如 Pb、Hf 和 Sr）的天然同位素丰度会随着岩石的年龄而变化。气候科学也可以利用海洋沉积物或珊瑚中矿物质的同位素和元素比值来重建海洋温度历史。

同位素分析还可用于核燃料生产、元素分馏研究、考古学和生物示踪研究等应用。同位素比值测量还是同位素稀释质谱法 (IDMS) 校准技术的基础。IDMS 通常用于计量机构等实验室以及标准物质认证，这些应用均要求可追溯性，以及良好的准确度和精密度。

## 您需要检测多少元素和样品？

在选择元素分析技术时，需要检测的元素数量和样品数量同样是重要的考虑因素。ICP-OES 和 ICP-MS 均可在一次采集中测量所有需要检测的元素（同步分析）。火焰和石墨炉 AAS 以及 MP-AES 依次对元素进行测量（顺序分析）。同步检测比顺序检测快得多，因为前者只需一次样品瓶进样即可完成所有分析物的测量。如果您必须检测大量样品（超过 50 个）中的多种元素（超过 10 种），使用顺序检测技术会非常慢。

例如，使用 GFAAS 时每种元素单次测定需要约 2-3 分钟（具体取决于所检测的元素）。这意味着测量每个样品中的 5 种元素，每种元素重复测定 3 次时，大约需要 30-45 分钟（5 种元素 × 3 次重复测定 × 每次测定需要

2-3 分钟）。因此，一台 GFAAS 仪器 24 小时内能完成大概 240 次检测（每次检测重复进样 3 次），可以是检测 240 个样品中的 1 种元素，60 个样品中的 4 种元素或 24 个样品中的 10 种元素。

相比之下，如果配置切换阀，ICP 技术可以在约 30 秒（对于 ICP-OES）或 1 分钟（对于 ICP-MS）的样品分析周期内完成 50 多种元素的 3 次重复测定。这意味着 ICP-MS 每天可完成约 60000 个三次重复测定，而 ICP-OES 每天可完成多达 125000 个。

上述所有技术（火焰 AAS 除外）均可实现无人值守运行，因此您可以将样品放入自动进样器并让仪器每天自行运行 24 小时。出于安全原因，火焰 AAS 必须人员在场时运行。因此其只能在工作时间运行。



图 9. 使用自动进样器可以提高效率并允许仪器无人值守运行

## 线性范围

各种原子光谱技术可以测量不同浓度的元素。这些技术可分为可以检测痕量（低于 10 ppb）元素的 GFAAS 和 ICP-MS，以及检测更高浓度（高于 10 ppb）元素的火焰 AAS、MP-AES 和 ICP-OES。

但这并不是全部。样品中可能含有从痕量级到百分级的不同浓度的元素。例如，您的样品中可能同时含有 100 ppm Na 和 10 ppb Mo。

您可以稀释或浓缩样品，但这需要时间并可能引入误差。为了获得理想的分析效率和准确度，ICP-OES 和 ICP-MS 等多元素技术需要能够在同一次分析中检测这些不同浓度水平的元素。此外，一些元素在不同样品之间可能会存在较大的浓度差异，因此各种技术可以测量的每种元素的浓度范围同样十分重要。分析技术的浓度范围通常用其线性动态范围来描述，即检测器针对浓度变化的线性响应范围。



图 10. 土壤、污泥和水等环境样品中某些元素的含量通常较高，而其他元素的含量则较低。因此，ICP-OES 或 ICP-MS 等多元素技术在一次测量中应对这些浓度差异的能力非常重要，否则就必须对同一样品进行多次测量，同时也意味着会增加额外的样品前处理任务

您应该选择一种能够应对样品中可能存在的每种元素的浓度范围的技术。如果您的实验室将接收很大程度上浓度未知的样品，则需要选择一种线性范围宽的技术（例如 ICP-MS），确保可以顺利进行检测。相反，如果您正在监测一种或两种元素的浓度，并且已知其浓度约为 100 ppm，则适合选择简单且价格更低的火焰 AAS 系统。请参见表 2，了解各种技术的检测范围。

表 2. 各种原子光谱技术可测量的浓度范围。对于每种技术，绿色框显示了仪器基本配置（未对进样系统进行任何优化）的典型检测限和检测上限之间的范围

	< ppq				ppt				ppb				ppm				%
	1	10	100	1000	1	10	100	1000	1	10	100	1000	1	10	100	1000	
火焰 AAS																	
MP-AES																	
ICP-OES																	
GFAAS																	
ICP-MS																	
ICP-MS/MS																	

## 检测限

每种分析技术所能达到的检测限 (DL) 是决定该技术是否适用于相应分析用途的主要因素。许多法规方法包含目标样品类型的最大允许浓度，所选技术必须能够可靠地测量方法规定的这些浓度。方法可定义用于确定可实现可靠分析的最低浓度的方法，有时也称为定量限 (LOQ)。LOQ 通常是“仪器检测限” (IDL) 的 3-10 倍。另一个常用的参数是“方法”检测限 (MDL)，它包括样品稀释倍数和样品前处理过程中的任何影响因素（例如污染）。



一般情况下，GFAAS 和 ICP-MS 这类“痕量元素”分析技术的检测限明显低于其他原子光谱技术。但检测限的具体情况十分复杂。对于不同的元素，同一种技术表现出的性能并不一样，这通常取决于元素的灵敏度和背景信号。例如，在 ICP-OES 中，与低强度发射谱线相比，高强度发射谱线将实现更高的灵敏度，因此 DL 也更低。同样，对于 ICP-MS，丰度较高的同位素将获得比低丰度同位素更高的灵敏度和更低的 DL。

ICP-MS 在金属实验室中迅速应用的原因之一在于，该技术对在低浓度下测量的元素通常具有较低的 DL。这一类元素包括多种重金属，例如 Cr、As、Cd、Hg 和 Pb。在 ICP-MS 分析中具有较高 DL 的元素往往是需要较高浓度下测量的分析物，例如矿物元素 Na、K、Ca、S、Fe 等。

样品基质和主要元素组成也会影响 DL。例如，元素的 DL 可能会因特定样品基质中的光谱重叠而受到严重影响。实验室环境和试剂质量也会对每种技术通常可实现的实际 DL 产生重大影响。通常认为，具有超低 DL 的高灵敏度技术需要使用非常洁净的化学品和优异的空气品质，例如洁净室。但这些因素影响的是可实现的报告限值，而不是技术本身。例如，试剂质量不佳或多尘实验室环境引起的样品污染可能会妨碍 ICP-MS 实现该技术本能够实现的 ppt 和亚 ppt 级 DL。但是，如果最小报告限值为 ppb 级，则不会影响结果。

## 干扰

干扰是样品测量过程中可能对测量结果产生负面影响的相互作用。原子光谱干扰可分为三类：

- 由样品基质或配制时使用的溶液引起的物理干扰
- 由样品组分和分析物之间的相互作用引起的化学干扰
- 一种元素的测量信号在波长或质量尺度上没有与另一种元素的信号完全分离而引起的光谱干扰

每种技术都在不同程度上受到这三种类型的干扰。如表 3 所示。尽管原子光谱技术存在不同程度的干扰，但所有技术都拥有可靠的方法来抵消这些干扰带来的影响。这可以通过硬件配置、操作条件和软件工具，或通过样品前处理和质量控制程序来实现。干扰差异不应成为实验室选择技术时的主要考虑因素。但是，如果对于待分析的大部分样品您都不知道组成（通常称为“未知”样品），则需要方法开发过程中考虑干扰。

表 3. 每种技术中不同类型干扰的相对发生概率（点越多表示干扰程度越高）

干扰类型	原子光谱技术					
	火焰 AAS	GFAAS	MP-AES	ICP-OES	ICP-MS	ICP-MS/MS
物理	••	•	••	••	••	••
化学	•••	••••	••	•	••	••
光谱	•	•	••	•••	••	•

### 物理干扰

当不同的基质和溶剂水平引起溶液粘度、表面张力和蒸发速率的变化时，就会产生物理干扰，从而导致测得的信号水平出现差异。所有涉及泵送液体的技术都会产生物理干扰。这些影响通常发生在进样系统中，尽管有些也会影响样品前处理步骤，例如在移液过程中。物理影响可能由以下原因引起：

- 使用不同的溶剂配制标样和样品（例如 HCl 和 HNO<sub>3</sub>，或水性溶剂和 10% 乙醇）
- 标样和样品的酸或有机溶剂含量不同（例如，标样含 0.1% 的酸，样品含 10% 的酸）
- 与标样相比，样品中主要元素的含量不同（例如，简单合成的标样和含有高浓度溶解碳或 1% 溶解态固体的样品消解物）

可以使用多种方法来解决物理干扰，其中最广泛的是基质匹配、标准加入法和信号校正。

基质匹配是指用户确定样品的关键组分，并使用类似基质配制标样（以及空白、QC 溶液等）。这可以是简单地加入相同量的酸，也可以是更复杂的方法，例如使用样品前处理和稀释过程中使用的相同溶液配制标样。如果标样和样品具有相同的基质，两者的物理效应应相同，因此可以尽可能降低信号差异。

标准加入法是基质匹配的一种高级形式，通过将标准溶液加入样品中，消除基质组成的任何差异性。虽然这一方法在原理上非常有吸引力并在某些行业中得到了广泛的应用，但标准加入法具有明显的缺点，即每种不同的样品类型都必须使用自己的一组加标溶液。

信号校正通常依赖于添加非目标元素作为内标 (ISTD)。理想的 ISTD 元素不应是分析物，也不会受到其他分析物的影响或对分析物造成干扰，并且不会自然存在于样品中。将 ISTD 元素以相同的浓度添加（通常使用在线混合接头自动进行）到所有溶液（标样、空白、QC 和未知样品）中。物理干扰通常会影响到离子源的溶液总量，因此信号的任何变化都应受到相同的程度影响所有元素。分析后，使用 ISTD 信号的变化校正分析物的信号。例如，如果样品中的 ISTD 信号比标样中的 ISTD 信号低 10% (90% 回收率)，将对分析物信号进行相同量的校正。这种 ISTD 校正补偿了样品基质造成的信号损失。ISTD 校正广泛应用于各种原子光谱技术，其优势在于可以校正长期漂移和物理干扰。多元素技术 (ICP-OES 和 ICP-MS) 通常会使用多种 ISTD 元素，尽可能为所有分析物提供理想校正。

## 化学干扰

当元素在进样或测量过程中发生化学相互作用时就会产生化学干扰。化学干扰在低温原子源（例如火焰 AAS）中更为常见。这是因为较低的火焰温度在分解和解离样品材料以及形成被测分析物的游离原子方面效率较低。如果基质组分与分析物原子结合形成另一种化合物，则游离分析物原子将减少，因此分析物特征原子波长处的吸光度将降低。因此，与标样的信号相比，样品基质以及其中的特定元素会影响产生的分析物信号强度。使用更高温度的火焰或添加化学改性剂可以降低火焰 AAS 中的化学干扰。

在样品吸取过程中会产生一些化学效应，例如当样品中某种元素的存在形式比其在标样中的存在形式具有更高的挥发性时。这会导致信号增强，因为挥发性更高的化合物从气溶胶液滴的表面蒸发。使用适当的溶剂或络合剂对元素进行化学稳定可以解决这种类型的化学效应。

电离效应是另一种会影响高温火焰 AAS 分析的化学干扰。当易电离元素从原子转化为离子时（如在 ICP-MS 中）就会发生电离效应。如果形成离子，则无法在原子吸收光谱中对其进行定量。

虽然化学干扰对 AAS 的影响更为常见，但 ICP-OES 和 ICP-MS 中使用的高温 ICP 原子和离子源也不能完全幸免。例如，在存在高浓度碳的情况下进行 ICP-MS 测量时，会观察到砷和硒的电离增强。低百分比含量碳基质的存在会增强 As 和 Se 的电离，与碳含量较低的标样相比，信号增强。通过向所有溶液中加入过量的碳（例如以 2% 正丁醇的形式）可以轻松校正该效应，从而使信号增强保持一致。

## 光谱干扰

光谱干扰会对所有原子光谱技术造成不同程度的影响。低温火焰 AAS 源的光谱重叠较少，而温度极高的 ICP 源则会产生非常丰富且强度极高的发射光谱。由于在 ICP-OES 的测量波长范围内有数千条发射谱线（参见

图 11 中的示例），很可能至少有两条谱线接近，并可能相互干扰。如果您的 ICP-OES 能够监测每种元素的多条发射谱线，您只需选择一条不受干扰的谱线进行分析，从而避免光谱干扰。

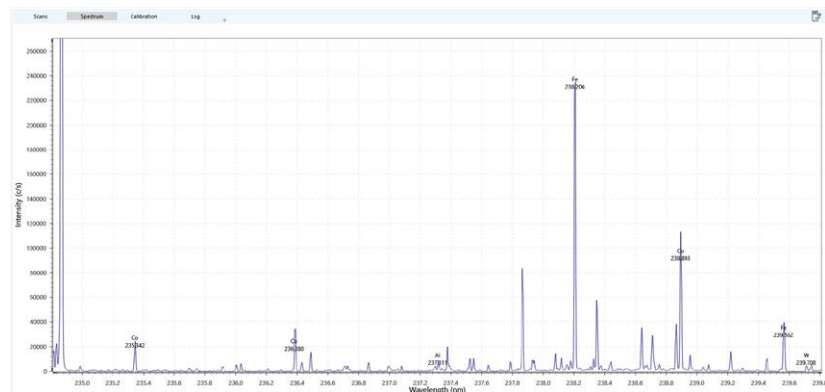


图 11. 典型的 ICP-OES 发射谱线图，显示了约 4 nm 的波长范围

ICP-MS 质谱图包含不到 240 个自然原子/同位素质量数，因此比 ICP 发射光谱图简单得多。此外，ICP-MS 测量的每一种元素（铷除外）至少有一个质量数（同位素）不受其他元素的直接重叠干扰。虽然在 ICP-MS 中可以轻松避免干扰元素重叠，但质谱重叠干扰也可由形成分子离子的元素组合形成，称为“多原子”离子。这些多原子离子可以由氩气、空气中的 N 和 O 等元素以及溶液和样品基质的成分形成。常见的多原子离子重叠包括在  $m/z$  32 处  $O_2^+$  与硫的主要同位素重叠，在  $m/z$  56 处  $ArO^+$  与铁的主要同位素重叠，以及在  $m/z$  75 处  $ArCl^+$  与砷的唯一同位素重叠。ICP-MS 分析可用的同位素数量有限，因此难以避免多原子重叠。多原子干扰曾经是复杂的高基质样品获得准确结果的主要限制。仪器制造商现已开发出有效的自动化方法来处理多原子干扰，但并非所有 ICP-MS 仪器均具备相同的处理能力，因此应仔细考虑其中的差异。

## 成本

### 安装成本

除了仪器的购买成本外，您可能还需要投资对实验室进行重大变革，以满足原子光谱仪的要求。一般要求如下所示。

- 排气抽气
- 气体供应
- 用于样品前处理的通风橱（取决于您的样品类型）
- 样品前处理设备（例如微波消解仪，取决于样品类型）
- 能够摆放大型分析仪器的实验室工作台
- 空调
- 冷却水（用于 GFAAS、ICP-OES 或 ICP-MS）
- 将仪器运入实验室以及搬抬仪器的能力
- 单相电源（通常与仪器在单独的电路上）
- 经过适当培训或具备相关经验的分析人员

如果测量 ppt 级的元素

- 需要洁净室或层流罩提供无尘环境
- 高纯度试剂
- 高质量标准品

原子光谱仪所需的公用设施和设备

### 持续运行成本

每种原子光谱技术对维护和备件都有不同的要求。您需要在预算中考虑仪器的备件和维修成本。以下是各种技术的要求概述：

#### 使用成本

气体和用电是与原子光谱分析相关的最大使用成本。例如，对于氙气的质量和用量要求因技术而异。GFAAS 仅使用 3 L/min 的氙气（或 N<sub>2</sub>，取决于所测元素），而基于等离子体的 ICP-OES 和 ICP-MS 技术则需使用约 20 L/min（因为等离子体由氙气驱动）的流量。ICP-MS 可能还需要少量的 He、H<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub> 和 O<sub>2</sub>（取决于方法要求）。ICP-OES 可以使用价格和纯度较低的 99.95% 氙气运行，而 GFAAS 和 ICP-MS 则需要使用高纯度 99.99% 氙气（最低要求）。

火焰 AAS 需要使用压缩空气、乙炔和一氧化二氮气体，具体取决于需要测量的元素。

在这几种技术中，MP-AES 的使用成本最低，因此每个样品的分析成本也最低。它只需要持续供应氮气，而氮气可以通过氮气发生器从环境空气中提取。点燃等离子体需要少量 99.0% 纯度的氙气（装在机载氙气瓶中）。MP-AES 的功率要求也较低，仅需使用 10 A 的电源即可。

与其他技术相比，ICP-OES 和 ICP-MS 耗能更多。其中，ICP-MS 和 ICP-MS/MS 耗能最多，因为两者均配备通常需持续运行的真空泵。ICP-MS 和 ICP-MS/MS 均需使用单独的 30 A 电源。ICP-OES 需要使用 15 A 电源。

根据当地气候的不同，每种技术都可能需要使用空调。实验室温度应保持在 15–30 °C，湿度保持在 20%–80% 范围内。

根据每个样品的分析成本进行成本比较非常重要。ICP-OES 和 ICP-MS 均为可以快速测量一批样品的多元素技术。尽管它们在运行时需要使用更多的气体 and 更高的功率，但与其他技术相比，在检测相同数量的样品时，他们所需的时间更短。

### 日常维护

所有原子光谱技术都需要定期进行清洁和维护。分析的样品越多，样品越复杂，需要的维护就越频繁。特别是在进行超痕量浓度分析时，GFAAS 和 ICP-MS（包括 ICP-MS/MS）等高灵敏度技术需要更频繁的清洁。

如果您每天都在使用仪器，可能需要执行以下维护活动：

#### 每天

检查和清洁进样区域，包括雾化器、雾化室、炬管、燃烧头或石墨管、泵管和废液容器。所有技术的维护项目均相似，但 GFAAS 除外，它具有不同的组件。预计完成这些维护需要长达 30 分钟的时间。请注意，有些仪器每天早上会自动向操作人员提供系统状态报告，详细说明需要进行哪些维护（如果有）。

## 每周

检查和清洁样品加热区域（例如炬管室）。预计完成这些操作需要 30–60 分钟的时间。

通常，所有技术具有相似的每日/每周维护要求。但是，GFAAS、ICP-OES 和 ICP-MS 拥有更多不常执行的维护任务。这些任务包括检查冷却系统中的水位和真空泵油位。

## 易用性和分析人员技能要求

分析仪器的不断发展越来越趋向于高度自动化和软件功能，这降低了对分析人员的技能要求。对于常见的样品类型，仪器提供的方法和工具将有助于确保报告准确的结果。

火焰 AAS 和 MP-AES 仪器的操作对分析人员的技能要求较低。GFAAS 对操作人员的技能水平要求较高，主要是由于其涉及复杂的化学反应，并且检测限较低。GFAAS 的自动化功能通常较少，因此依赖于分析人员的技能水平来开发方法和运行分析。

设置常规方法后，所有原子光谱技术的日常操作都相对简单。开发新方法需要较高的技能水平，而更复杂的多元素方法和更多样化的样品类型会提高对技能水平的要求。现代原子光谱仪器通常包括方法库和软件工作流程指南等资源，为不熟悉这项潜在的艰巨任务的人提供支持。

表 4. 比较不同原子光谱技术开发方法时的相对复杂程度

	火焰 AAS	GFAAS	MP-AES	ICP-OES	ICP-MS	ICP-MS/MS
方法开发的复杂程度	🎓	🎓	🎓🎓🎓	🎓🎓	🎓🎓	🎓🎓🎓

## 方法 — 法规方法和可用的预开发方法

### 法规方法

许多典型的元素分析在各个国家/地区受到政府的监管。例如，饮用水中金属的检测受美国国家环境保护局监管。EPA 针对饮用水发布了以下方法：

- 200.5 利用轴向观测电感耦合等离子体原子发射光谱法测定饮用水中的痕量元素 (2003)
- 200.7 利用电感耦合等离子体原子发射光谱法测定水和废弃物中的金属和痕量元素 (1994)
- 200.8 EPA 方法 200.8 利用电感耦合等离子体质谱法测定水和废弃物中的痕量元素 (1994)
- 200.9 利用稳定温度石墨炉原子吸收光谱法测定痕量元素 (1994)

对于其中的每一种方法，所需的分析技术取决于所选的方法。反过来，方法可能由您必须遵循的法规决定。

全球有 1500 多种用于元素分析的标准方法。其中包括非常具有针对性的方法（例如测定工作场所空气中的钨 ([GB/T 17087](#))），以及应用范围广泛的方法（例如测定水中的 26 种元素 ([US EPA 200.8](#))）。

### 预开发方法和方法开发

许多仪器都会随附一套适用于常规分析类型的方法模板，例如测定饮用水中的元素。随附的方法往往用于法规监管分析。如果您需要进行非常规分析或有其他特定要求，则需要为您的仪器找到一种已发表的方法或自行开发方法。

单元素技术（例如火焰和石墨炉 AAS）的使用已有很长的时间，往往拥有针对许多分析物和样品类型的成熟方法。

ICP-OES 和 ICP-MS 上使用的多元素方法具有更多变量，设置起来更为复杂。将现有方法转移到新仪器时，这些方法也可能需要更多修改。

# 样品前处理

## 液体样品



图 12. 样品通常以液体形式引入，以使用任何原子光谱技术进行测量。除 GFAAS 以外，所有技术均使用雾化器将液体样品转变为气溶胶雾。GFAAS 使用进样针进样液体样品

在常规分析中，使用基于火焰、石墨炉和等离子体的原子光谱技术测定的样品均以液体形式进样。即使样品已经为液体形式，在检测前通常也需要进行前处理。这些样品前处理可能包括过滤、酸化、消解或其他某种形式的稳定化，以确保分析物在溶液中保持稳定。

大多数法规或标准方法都会指定要使用的样品前处理流程。网上还有很多针对不同样品类型的样品前处理方法。例如，安捷伦发布了[介绍各种分析的应用简报](#)。

## 固体样品



图 13. 土壤、岩石或矿石样品的元素含量测定是原子光谱的一种常见应用

在处理前，通常会对土壤和沉积物样品进行干燥。将岩石或矿石等样品研磨成粉末，进行混合然后二次取样，确保用于分析的样品具有代表性。

然后对土壤、沉积物或岩石样品进行酸处理，将需要分析的元素（分析物）提取到溶液中。这种酸处理过程称为消解（类似于我们胃中的消化过程）。

对于痕量分析，消解和所有样品转移或储存步骤必须在惰性材料（例如石英或聚合物）制成的容器中进行。由硼硅酸盐或钠玻璃制成的容器不能用于痕量金属分析，因为玻璃材料包含可浸出到酸性溶液中的元素。玻璃还会吸附溶液中的痕量元素，导致不稳定性和回收率降低。

## 消解、稀释和过滤

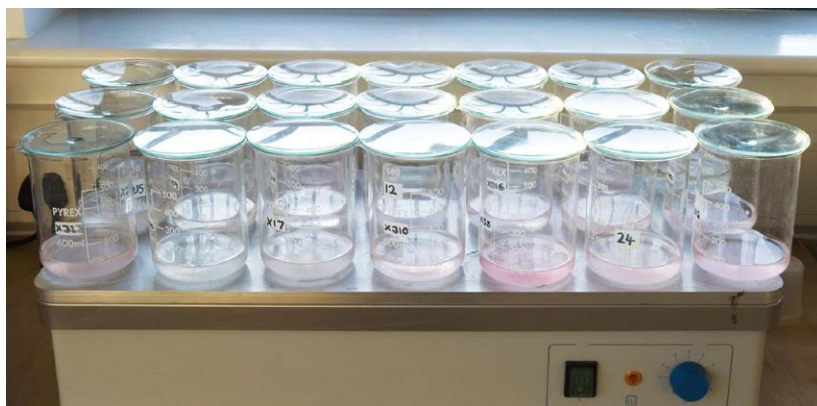


图 14. 样品可能需要用酸消解，将元素释放到溶液中

根据想要测定的元素和样品类型，您可能需要用酸消解样品。消解和其他样品前处理要求取决于应用和方法。法规或标准方法通常会指定应进行的样品前处理。

如需消解样品，可以将其放入装有酸的烧杯中，然后在加热板上进行加热（在实验室通风橱中进行）。也可以使用微波消解系统或恒温消解仪。恒温消解仪一次可以处理多个样品，并能提供比加热板更好的温度控制。微波消解系统采用“密闭容器”，可以实现更高的温度和压力，从而改善消解。

用于样品消解的酸取决于样品类型和要测定的元素（一份实用资料：[分析化学分解方法手册](#)）。钼等具有挑战性的元素需要使用腐蚀性更强的酸（例如氢氟酸 (HF)）才能进入并留在溶液中。此外，您可能需要使用混合酸来分解样品。如果在样品前处理过程中需要使用氢氟酸，则需要使用惰性组件，因为这种酸会腐蚀玻璃。安捷伦为原子光谱仪提供惰性组件，例如[用于 ICP-OES 的惰性进样系统](#)。

样品前处理的最后一步是稀释或过滤。方法通常会指定样品稀释的最终体积。您可能需要进一步稀释，使样品浓度处于仪器的校准范围内，或将样品中的总溶解固体 (TDS) 含量降至仪器可以处理的水平（因技术和仪器型号而异）。含有未溶解颗粒的样品需要过滤，否则颗粒会导致仪器进样系统堵塞。

### 有机样品前处理

油样品等有机化学物质通常可以使用合适的有机溶剂（己烷、二甲苯、甲苯等），通过“稀释-上样”方法进行分析。然而，如果样品中含有大颗粒（例如用于磨损金属分析的油样品），则需要对其进行消解。

测定有机物可能需要在仪器中使用特定的部件以及特定的仪器设置。对于 AA、MP 和 ICP-OES 技术，重要的是防止有机样品中的碳在等离子体炬管或火焰燃烧头上积聚。使用 ICP-OES 或 ICP-MS 测定有机溶剂时，向炬管中加入氧气（氩气中混合 20% 的氧气）以分解基质，并避免在炬管中心管或 ICP-MS 接口锥上形成积碳。在 ICP-MS 中，加入氧气会导致标准镍锥快速腐蚀，因此在分析有机溶剂时应将接口锥更换为铂锥。

[Agilent FilterMate 过滤系统](#)使您能够使用同一试管消解、过滤和分析样品。过滤管与恒温消解仪兼容，但不适合用于微波消解系统。



## 溶剂专用仪器组件

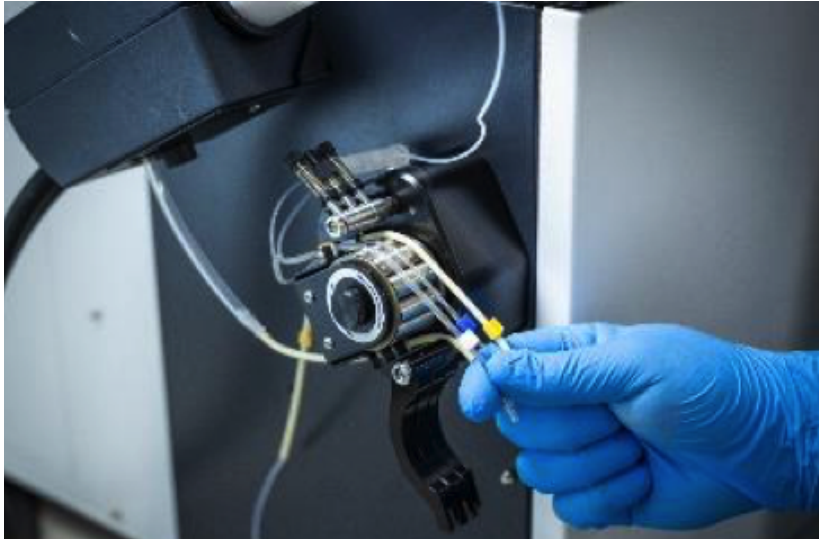


图 15. 泵管必须与使用的溶剂兼容

仪器蠕动泵上使用的管线必须与使用的溶剂兼容。例如，安捷伦为相应的 [AA](#)、[MP-AES](#)、[ICP-OES](#) 和 [ICP-MS](#) 仪器提供了适用于不同溶剂的不同管线类型。

可能需要将整个进样系统更换为与所用溶剂兼容的系统。例如，许多分析人员针对有机溶剂配备了一套单独的组件。

## 校准

原子光谱技术测定目标元素相对于已知浓度溶液（称为标样）的浓度。确定实测值与已知标样中浓度之间的关系的过程称为“校准”。已知标样通常为认证校准溶液或标准物质。校准溶液通常从仪器供应商处获得。例如，安捷伦[提供一系列单元素和多元素认证校准标样](#)。化学品供应商也会生产和供应校准标样，而美国国家标准与技术研究院 (NIST) 等标准物质生产商则提供与一系列行业和应用相关的有证标准物质 (CRM) 和标准参比物质 (SRM)。CRM 和 SRM 可用于仪器校准或作为质量控制 (QC) 样品运行，提供对校准标样准确度的独立校验。

原子光谱领域常用的校准方法是利用包含目标元素的认证储备液配制一系列校准标样。AAS 等单元素技术通常对每种要测定的元素进行单独的校准。单元素标准品仅对目标元素浓度进行了认证。ICP-OES 和 ICP-MS 等多元素技术通常使用包含所有目标元素的校准混标。ICP 标准品远比 AAS 标准品昂贵，因为 ICP 标准品不仅需要认证目标元素具有准确的浓度，而且还要确认和认证不含其他元素。

通过稀释校准储备液提供覆盖未知样品中预期浓度范围的标样浓度。然后使用将用于测定未知样品的方法来测定稀释后的标样。仪器软件处理在各浓度水平下测得的各元素信号（吸收、发射或计数），并绘制信号和浓度之间的关系图。



对于使用温度相对较低的原子源的技术（例如火焰 AAS），线性响应只会覆盖较小的浓度范围（如图 16 所示）。这意味着在较高浓度下难以获得准确的结果，因为吸光度和浓度之间的关系不呈线性。通过将样品稀释至校准的线性部分，或使用更复杂的数学方法来建立吸光度和浓度之间的关系，可以解决这一问题。

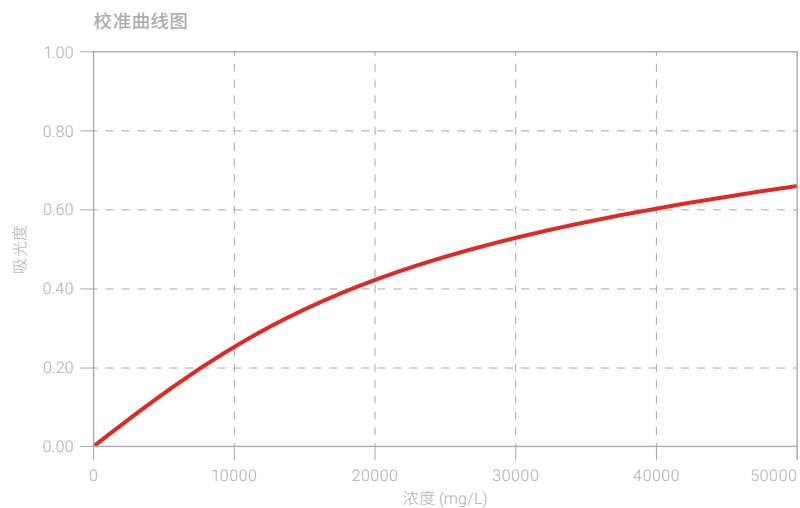


图 16. 对于火焰 AAS 等技术，吸光度和浓度之间的线性关系可能仅覆盖较小的浓度范围。这意味着必须稀释样品，使其浓度处于校准的线性范围内，或使用更复杂的数学方法。在此处所示的校准曲线中，线性响应仅持续到 10000 mg/L

在温度更高的（等离子体）源仪器（ICP-OES 和 ICP-MS）上，校准曲线通常在几个数量级范围内呈线性。这些线性校准的曲线拟合可以表示为  $y = ax + b$ ，其中  $a$  代表斜率， $b$  代表 Y 轴的截距。当所用的技术在较宽的浓度范围内呈线性响应时，校准会更加简单，因为需要的标样更少。同时方法也更灵活，因为标样不需要高度匹配样品浓度。图 17 显示了覆盖五个数量级的 Na 的线性 ICP-MS 校准。该 ICP-MS 校准在 0.1–10000 ppm 范围内呈线性。

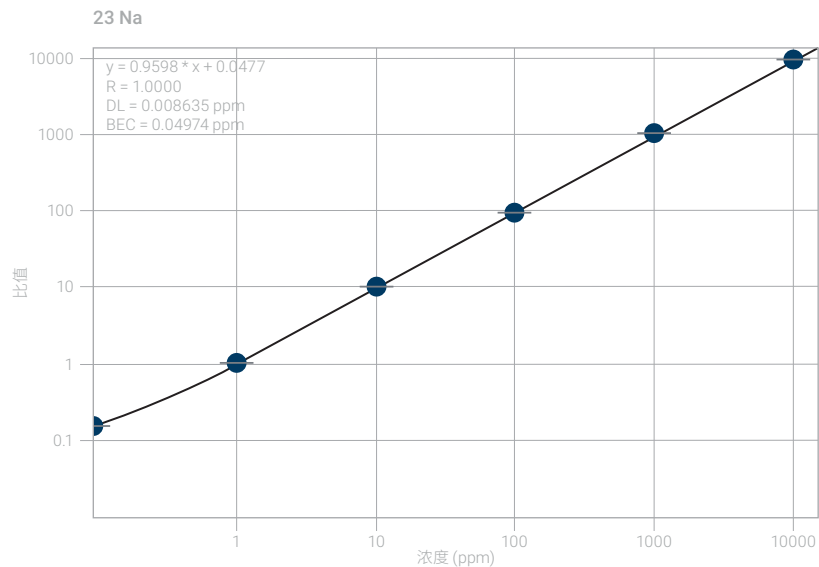


图 17. Na 的 ICP-MS 校准在 0.1–10000 ppm 范围内呈线性

# 应用

原子光谱广泛应用于各个行业中的各种测量。表 5 显示了不同测量类型最常用的技术。

## 各种应用的常用技术

表 5. 原子光谱的应用领域以及这些领域的常用技术。点越多表示越常用该技术

领域	典型应用	火焰 AAS	GFAAS	MP-AES	ICP-OES	ICP-MS	ICP-MS/MS
农业	土壤	••	•	•	•••	•••	•
	植物	••	••	•	•••	••	•
	肥料	••		••	•••		
大麻	生产/QC		•		••	•••	•
临床研究	生物体液		••			•••	••
能源与化工	精细化学品纯度	•	••		•••	•••	•• (高纯度)
	可再生能源：生物燃料、太阳能电池板、燃料电池	•	•	••	•••	•••	••
环境	土壤	•••	••	•	•••	•••	••
	水	•••	••	•	•••	•••	••
	空气		••		••	•••	••
	工业和发电废弃物监测	•			•••	•••	•
	废弃物	•••	•	•	•••	••	•

领域	典型应用	火焰 AAS	GFAAS	MP-AES	ICP-OES	ICP-MS	ICP-MS/MS
食品与饮料	食品安全		•		•	•••	••
	营养标签	••	•	••	••	•	
	食品真伪检测	•	•	•	••	•••	••
法医学	玻璃、油漆、油墨分析		•		••	•••	••
	枪击残留物		••		•	•••	•
地球化学和采矿	勘探	•••	•	•	•••	••	•
	生产（成品监测）	•	•	•	•••	••	••
	研究和地质年代学					••	•••
生命科学	单细胞分析					••	•••
	生物成像					•••	•••
	蛋白质组学					•	•••
	金属组学					••	•••
材料	陶瓷	•	•		•••	••	•••
	电池	•	•		•••	••	•
	磁体	•	•		•••	•••	•••
	催化剂				•••	•••	••
	玻璃和光纤		•		•	••	•••
金属与合金	高温合金		•		••	•••	••
	贵金属		•		•••	••	•••
	黑色金属				•••	••	•

领域	典型应用	火焰 AAS	GFAAS	MP-AES	ICP-OES	ICP-MS	ICP-MS/MS
纳米材料	研发和生产					•••	•••
	环境监测					•••	•••
	食品添加剂					•••	•••
	消费品					•••	•••
核能	燃料生产					•	••
	退役					••	•••
	监测反应器冷却水					•••	••
石油化工	润滑油中的磨损金属	••		••	•••	•	
	原油	••		••	•••	••	••
	过程控制				•••	••	••
	燃料 QC	••		••	•••	••	•
制药/生物制药	药物发现		•			••	•••
	可萃取物与可浸出物		•		••	•••	•
	生产/QC		•		••	•••	•
半导体	制程化学品纯度		•		••	••	•••
	硅片纯度		•			••	•••
	高纯金属		•		•	••	•••

## 针对常见检测场景的建议

### 对少量样品进行痕量 (< 10 ppb) 或超痕量 (ppt) 浓度测定

对于每天需要检测少量样品中的几种痕量或超痕量 (ppt) 元素的实验室，有两种选择：石墨炉原子吸收光谱 (GFAAS 或石墨炉 AAS) 或电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS)。

GFAAS 可以检测 48 种元素，而 ICP-MS 可以检测 86 种元素。GFAAS 无法检测但 ICP-MS 可以检测的常见元素包括：Br、C、Ce、Cl、F、Gd、Hf、Ho、I、La、Lu、Nb、Nd、Os、Pr、Re、S、Sc、Sm、Ta、Tb、Th、Tm、U、W、Y 和 Zr。即便使用 ICP-MS，C 的检测限依然较高，而 F 需要专用的 ICP-MS/MS 方法。

与 ICP-MS 相比，GFAAS 的价格和运行成本更低。但 ICP-MS 具有更快的分析速度、更宽的线性动态范围和更少的干扰。如果需要分析更多的元素或样品，ICP-MS 是更快速、更经济有效的选择，因为它可以在 2-3 分钟的采集时间内完成样品中所有元素的检测。相比之下，GFAAS 需要单独检测样品中的每种元素，每种元素的单次测定大约需要 2-3 分钟。这意味着使用 GFAAS 检测每个样品中的 5 种元素且每种元素重复测定 3 次时，大约需要 30-40 分钟 (5 种元素 × 3 次重复测定 × 每次测定需要 2 分钟)。因此，一台 GFAAS 仪器 24 小时内能完成大概 240 次检测 (每次检测重复进样 3 次)，可以是检测 240 个样品中的 1 种元素，60 个样品中的 4 种元素或 24 个样品中的 10 种元素。

这两种技术都要求操作人员具备一定的知识和技能水平。二者均支持无人值守运行，因此您可以将样品放入自动进样器，然后就可以放心离开，让仪器自动完成分析。典型的 QA/QC 实验室通常选择 GFAAS，但如果实验室正在扩大其规模，并需要确保能够在未来处理更多的样品，ICP-MS 可以提供更广泛的元素覆盖范围和更高的样品通量，以满足不断增长的需求。



### ICP-MS 的优势

如果您符合如下情况，ICP-MS 将是您的理想之选：

- 每个样品需要检测至少 10 种元素，或者未来需要检测的元素数量可能会增加
- 需要检测 GFAAS 无法检测的元素
- 每天超过 100 个样品，或者样品批次中包含超过 200 个样品
- 检测浓度未知的元素，或者不同样品间元素的浓度差异较大



### GFAAS 的优势

GFAAS 是以下实验室的理想选择：

- 需要在痕量水平进行定量分析，且每日分析的样品和元素不超过 240 次检测（24 小时内检测 60 个样品中的 4 种元素），假设每次检测重复进样 3 次
- 已知分析物的大致浓度范围，且已知不同样品的浓度不会有显著变化
- 只需检测几种元素
- 希望保持较低的资金投入并尽可能降低实验室设置成本和运营成本



安捷伦提供 Duo 原子吸收系统，它结合了火焰原子吸收仪和 GFAAS。使用 GFAAS 检测低浓度元素，使用火焰 AAS 检测高浓度元素。两者可以同时检测样品，提高了样品通量。火焰原子吸收仪无法实现无人值守运行，因此只能在分析人员的监测下进行分析。

## 在至少 50 份样品中检测至少 10 种低浓度 (< 10 ppb) 元素

如果您的实验室需要检测至少十种浓度低于 10 ppb 的元素，并且每天要检测超过 50 份样品，那么电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 将是一种理想的技术。ICP-MS 也可以检测浓度较高的元素，但如果元素数量和样品数量较少，火焰 AAS 或 MP-AES 等技术是检测高浓度分析物的低成本选择。

### ICP-MS 能够：

- 在 3 分钟的样品读数时间内快速检测几乎所有元素（如果使用切换阀，每个样品仅需 1 分钟）
- 为大多数元素提供高灵敏度和低检测限（低至 ng/L (ppt) 或亚 ppt 级）。还可以测量元素同位素比
- 在同一次检测中检测浓度低于 0.1 ppt 至浓度高于 1000 ppm 的元素
- 克服几乎所有检测干扰
- 检测各种类型的样品，包括有机溶剂和溶解固体含量高达 25% 的溶液
- 与其他技术联用，例如联用液相色谱或气相色谱进行色谱分离，或者联用激光剥蚀 (LA) 直接进行固体进样
- 利用自动进样器进行无人值守运行



### 您需要哪种类型的 ICP-MS?

ICP-MS 有两种常见配置：单四极杆 ICP-MS 或串联四极杆 ICP-MS（即 ICP-MS/MS，简称串联 ICP-MS）。两种配置均可检测 86 种元素，ICP-MS/MS 还能够检测单四极杆 ICP-MS 无法检测的 F。

与 ICP-MS/MS 相比，单四极杆 ICP-MS 价格更低，运行成本也略低。ICP-MS/MS 的设置和运行对操作人员有更高的技术要求，尽管这取决于运行的方法。许多针对单四极杆 ICP-MS 开发的方法无需修改即可在 ICP-MS/MS 上运行。

ICP-MS/MS 的主要优势在于能够解决单四极杆 ICP-MS 无法解决的质谱干扰问题。对于各种样品，ICP-MS/MS 能够提供更低的检测限和更一致的结果。例如，利用单四极杆 ICP-MS 检测 Si、P 和 S 元素时存在严重的质谱干扰，因此检测限相对较高。ICP-MS/MS 能够克服这些干扰，从而能够在痕量水平下检测这些难以分析的元素。



### 单四极杆 ICP-MS

ICP-MS 是以下实验室的理想选择：

- 运行常规 ICP-MS 方法（一般为法规方法）
- 检测典型的痕量元素，不包括 F、Cl、Si、P 或 S 等“困难”元素
- 分析环境样品等常见样品类型
- 无需检测极低浓度的超痕量（低于 ppt 级）水平的元素



### 串联四极杆 ICP-MS

ICP-MS/MS 是以下实验室的理想选择：

- 需要运行要求苛刻的应用，其中包含复杂样品类型，需要分析 F、Cl、Si、P 或 S，或涉及难以克服的干扰问题
- 需要检测高纯度材料或半导体制程化学品中的超痕量级（低于 ppt 级）元素
- 需要检测受同质异位素（元素）重叠（例如  $^{204}\text{Pb}/^{204}\text{Hg}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{87}\text{Rb}$ 、 $^{176}\text{Hf}/^{176}\text{Lu}$ ）干扰或放射性同位素干扰的分析物，进行地球化学样品或核能样品分析的实验室往往需要这种分析能力
- 需要检测的元素浓度低，其质量数又紧邻常量元素，例如碳基质中的硼、钢铁中的锰、铀中的镎
- 现在或将来想要能够处理更多样品类型和元素的实验室

## 检测大量样品中的多种中、高浓度 (> 10 ppb) 元素

部分实验室需要检测大量样品中的多种元素，工作内容繁重，需要用到 ICP-OES 或 ICP-MS 这类快速电感耦合等离子体元素分析技术。

在比较 ICP-OES 和 ICP-MS 时，首先要认识到这两种技术的浓度检测范围有所重叠，这很重要。如果所有元素的浓度都大于 10 ppb，那么 ICP-OES 是理想的选择。如果需要检测某些浓度较低的元素，或者需要检测 C、F、Cl、Br 或 I，那么推荐使用 ICP-MS。即便使用 ICP-MS，C 的检测限依然较高，而 F 需要专用的 ICP-MS/MS 方法。请参阅前述章节[您需要检测哪些元素?](#)

虽然 ICP-OES 不能像 ICP-MS 那样检测浓度低至 ppt 级的元素，但其常用于检测以前可利用火焰原子吸收进行检测的元素。

需要检测放射性元素 Np、Pu、Am 或 Ra，或者其他非常稀有的锕系元素 (Ac、Bk、Cf、Cm、Pa、Po) 的高度专业性应用也需要使用 ICP-MS。





### ICP-OES

如果您符合如下情况，ICP-OES 将是您的理想之选：

- 需要分析大量样品（单日超过 1200 份样品）。面对这些情况，您需要 ICP-OES 出色的分析速度，其能够在几分钟内检测样品中多达 74 种元素的浓度
- 需要检测含有高百分比总溶解固体 (TDS) 或悬浮固体的样品。虽然 ICP-MS 也可以检测这些样品，但是日常检测使用 ICP-OES 更方便
- 需要检测的样品中每种元素的浓度总是大于 10 ppb



### ICP-MS

如果您有以下需求，ICP-MS 是更好的选择：

- 需要分析某些浓度小于 10 ppb 的元素，或者是将来可能有这种需求（比如由于法规要求发生变化）
- 需要检测元素的同位素比
- 需要将元素分析与其他技术联用，例如联用液相色谱或气相色谱进行色谱分离，或者联用激光剥蚀 (LA) 直接进行固体进样

## 检测不超过 10 种的高浓度 (> 100 ppb) 元素，每天检测不超过 100 个样品

当检测少量样品中的几种浓度高于 100 ppb 的元素时，火焰原子吸收光谱（称为 FAAS、火焰 AAS 或仅 AA）或微波等离子体原子发射光谱 (MP-AES) 是理想的选择。MP-AES 可以检测 70 种元素，而火焰 AAS 可以检测 67 种元素。如果需要检测 S、Ce 或 Th，MP-AES 是两者中更好的选择。然而，存在 AAS 和 MP-AES 均无法检测的一些元素。

### 您是否需要检测这些元素？

如果您想要检测的元素包括：Cl、I 或放射性 Tc 或 Pm，ICP-OES 才是理想选择，因为 AAS 和 MP-AES 均无法检测这些元素。请注意，如果您需要在低浓度下检测这些元素（Cl < 20 ppm 或 I < 200 ppm），或者如果您想要检测的元素包括 Br、放射性 Np、Pu、Am 或 Ra，或任何难以分析的钢系元素（Ac、Bk、Cf、Cm、Pa 或 Po），ICP-MS 是唯一的选择。然而，ICP-MS 仪器的成本较高，意味着通常不会使用它们对少量样品进行中、高浓度元素分析，而是采用火焰 AAS、MP-AES 或 ICP-OES。

### MP-AES、ICP-OES 与火焰 AAS 之间的差异

火焰 AAS 是这几种仪器中购买成本最低的仪器。如果将[安捷伦快速序列模式](#)用于 AAS，MP-AES 和火焰 AAS 将具有相似的样品检测时间。ICP-OES 仪器的购买成本更高，但样品检测速度比火焰 AAS 或 MP-AES 快得多。如果要检测的样品数量或元素数量可能增加，ICP-OES 将是理想的选择。

在这几种技术中，MP-AES 的运行成本最低并且不使用易燃气体。它支持无人值守运行，并且非常适合偏远地区，因为其可以与氮气发生器一起使用，只需提供电源即可（无需气体供应）。



### 火焰 AAS 的优势

FAAS 是以下实验室的理想选择：

- 使用法规 FAAS 方法。通常为食品和环境应用
- 希望使用标准方法。由于 FAAS 的应用历史已久，因此有许多有据可查的方法
- 只希望每周对少数几种元素进行几次检测



### MP-AES 的优势

如果符合如下情况，MP-AES 将是您的理想选择：

- 需要分析大量样品。使用自动进样器可以实现无人值守过夜运行，完成大批量分析
- 与 FAAS 相比，您希望减少气体供应并降低消耗品成本
- 需要检测 S、Ce 或 Th
- 实验室位于石油化工厂或其他不允许出现明火的场所
- 使用气瓶或易燃气体存在无法接受的安全风险



### ICP-OES 的优势

如果符合如下情况，ICP-OES 将是您的理想选择：

- 您希望使用法规 ICP-OES 方法。最常为食品和环境应用
- 需要检测 Cl 或 I
- 需要检测的样品数量或元素数量可能增加
- 样品中元素的浓度可能降低，需要更低的检测限
- 希望使用自动进样器让仪器实现无人值守过夜运行

## 需要检测少量样品中的几种浓度较低（十几 ppb 至低 ppm 级）的元素？

对于每天样品数量较少，且需要检测样品中少数几种浓度较低（超过 10 ppb）的元素的实验室，有三种选择：石墨炉分析技术（称为 GFAAS 或石墨炉 AAS）和两种电感耦合等离子体技术，即电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 和电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-OES)。

技术的选择取决于需要检测的元素。ICP-MS 可以检测 86 种元素，ICP-OES 可以检测 74 种元素，石墨炉可以检测 48 种元素。GFAAS 无法检测的常见元素包括 Br、C、Ce、Cl、F、Gd、Hf、Ho、I、La、Lu、Nb、Nd、Os、Pr、Re、S、Sc、Sm、Ta、Tb、Th、Tm、U、W、Y 和 Zr。同样，ICP-OES 无法检测 C、F、Cl、Br 或 I，因此，如果要检测其中任何一种元素，就需要 ICP-MS。即便使用 ICP-MS，C 的检测限依然较高，而 F 需要专用的 ICP-MS/MS 方法。前面的[您需要检测哪些元素？](#)一节详细介绍了每种技术可以检测的元素。

在这三种技术中，GFAAS 的价格和运行成本最低，但是 GFAAS 需要分别检测每种元素，根据元素的不同，每个元素单次测定需要 2 或 3 分钟。这意味着使用 GFAAS 检测每个样品中的 5 种元素且每种元素重复测定 3 次时，大约需要 30-40 分钟（5 种元素 × 3 次重复测定 × 每次测定需要 2 分钟）。因此，一台 GFAAS 仪器 24 小时内能完成大概 240 次检测（每次检测重复进样 3 次），可以是检测 240 个样品中的 1 种元素，60 个样品中的 4 种元素或 24 个样品中的 10 种元素。

ICP-MS 仪器的价格和运行成本更高，但它可以进行快速、多元素分析，线性动态范围更广，且干扰更少。它能在 2 到 3 分钟内检测样品中的所有元素，比石墨炉分析快得多。如果样品的数量和/或元素的数量有可能增加，或者您需要检测的浓度可能降低（例如由于法规要求发生变化），那么 ICP-MS 是理想的选择。



在两种电感耦合等离子体技术中，ICP-OES 的成本低于 ICP-MS。此外，ICP-OES 的样品分析速度更快，每天可以检测多达 2500 份样品中的多种元素。如果您的样品数量有可能会大幅增加，或者元素的数量会增加，但检测的浓度不会降低，那么 ICP-OES 是一个不错的选择。ICP-OES 无法像 GFAAS 或 ICP-MS 那样检测亚 ppb 级浓度。

尽管可以自动执行标准方法和法规方法，但 GFAAS 和 ICP-MS 都要求操作人员具备一定的知识和技能水平，而 ICP-OES 则更易于使用。所有技术均支持无人值守运行，因此您可以将样品放入自动进样器，然后就可以放心离开，让仪器自动完成分析。如果一个 QA/QC 实验室每天只需在少数样品中检测相同的元素，通常会选择 GFAAS。然而，如果实验室正在扩大其规模，并确保能够在未来处理更多的样品，两种电感耦合等离子体技术都可以提供更广泛的元素覆盖范围和更高的样品通量，以满足不断增长的需求。



### 石墨炉的优势

如果您符合如下情况，GFAAS 将是您的理想之选：

- 需要在痕量水平进行定量分析，且每日分析的样品和元素需进行约 240 次检测（例如，检测 60 个样品中的 4 种元素）。假设每次检测重复进样 3 次
- 只需检测几种元素
- 样品量非常少
- 已知分析物的大致浓度范围，且已知不同样品的浓度不会有显著变化
- 预算少，想要尽可能控制仪器和运行成本



### ICP-MS 的优势

如果您符合如下情况，ICP-MS 将是您的理想之选：

- 需要分析多种浓度低于 10 ppb 的元素，或者是将来可能有这种需求（比如由于法规要求发生变化）
- 同时需要低检测限、多元素分析和高样品通量
- 所要分析的元素中包括某些只能用 ICP-MS 检测的元素（如 Br 或 I）
- 需要将元素分析与其他技术联用，例如联用液相色谱或气相色谱进行色谱分离，或者联用激光剥蚀 (LA) 直接进行固体进样



### ICP-OES 的优势

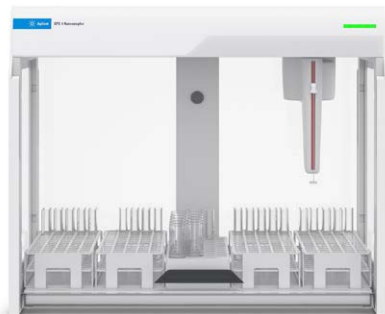
如果您符合如下情况，ICP-OES 将是您的理想之选：

- 始终在高 ppb 浓度水平或以上检测所有分析物
- 样品数量可能大幅增加（单日超过 1200 份样品）。面对这些情况，您需要 ICP-OES 出色的分析速度，其能够在几分钟内检测样品中多达 74 种元素的浓度
- 需要检测含有高百分比总溶解固体 (TDS) 或悬浮固体的样品。虽然 ICP-MS 也可以检测这些样品，但是日常检测使用 ICP-OES 更方便

# 可能需要的其他组件

## 可能需要的其他组件

除仪器外，您可能还需要可提高分析效率或灵敏度的附件。在分析特定样品类型或检测特定元素时，还有一些附件可以提供帮助。



### 自动进样器

自动进样器使仪器能够在无人值守的情况下进行批量样品分析。自动进样器的针头将依次从每根管中吸取样品，并在吸取间隙进行冲洗。如果样品批次中包含超过 100 个样品或需要分析人员管理多台仪器，建议使用自动进样器。



### 样品引入泵

作为火焰 AA 的附件，安捷伦样品引入泵系统 (SIPS) 可自动进行标样配制、样品稀释以及向每个样品中添加其他溶液（例如改性剂和内标）。如果您希望减少耗时且容易引入错误的手动样品前处理任务，SIPS 附件是理想的选择。



### 切换阀

切换阀可提高 ICP-OES 或 ICP-MS 仪器的分析效率并减少气体消耗量。切换阀的工作原理是，在仪器检测前一个样品的同时将下一个样品提前加载到阀中。如果需要定期检测大量样品，建议使用切换阀。使用切换阀减少的氩气消耗量可以抵消阀的成本。



### 氢化物发生器

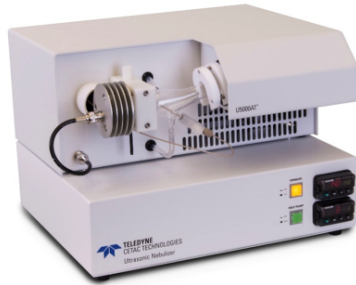
大多数原子光谱技术可以使用氢化物发生器附件来检测 ppb 级的汞和可形成氢化物的元素（例如 As、Bi、Ge、Pb、Sb、Se、Sn 和 Te）。该附件控制生成氢化物所需的化学反应。

在安捷伦 ICP-OES 和 MP-AES 仪器上，您可以使用多模式样品引入系统 (MSIS) 在氢化物发生模式和标准雾化器模式之间进行快速切换，而无需更换任何硬件。



### 温控雾化室

在测量粘性油类样品或含有挥发性有机溶剂的样品时，建议使用 Agilent IsoMist 等温控雾化室。请注意，温控雾化室是所有 ICP-MS 和 ICP-MS/MS 仪器的标准配置。



### 超声雾化器

将超声雾化器（如此处所示来自 [CETAC Technologies](#) 的雾化器）与 ICP-OES 仪器一起使用，以提高环境应用的灵敏度和测量稳定性。

# 安捷伦原子光谱仪

## 了解的价值

安捷伦开发了涵盖仪器、消耗品、标准品、服务、软件等多个方面的创新原子光谱产品组合，为您的实验室带来从容应对的信心，确保您在任何有需要的时候都能获得可靠答案。我们的一系列仪器包括：



## 火焰和石墨炉原子吸收



MP-AES



ICP-OES



ICP-MS



ICP-MS/MS

了解更多信息：

[www.agilent.com/chem/atomic](http://www.agilent.com/chem/atomic)

如需获取技术问题的答案和安捷伦社区的资源，请访问：

[community.agilent.com](http://community.agilent.com)

安捷伦客户服务中心：

**免费专线：800-820-3278**

**400-820-3278（手机用户）**

联系我们：

[LSCA-China\\_800@agilent.com](mailto:LSCA-China_800@agilent.com)

在线询价：

[www.agilent.com/chem/erfq-cn](http://www.agilent.com/chem/erfq-cn)

DE44444.6577546296

本文中的信息、说明和指标如有变更，恕不另行通知。

© 安捷伦科技（中国）有限公司，2021  
2021年9月13日，中国出版  
5994-4048ZHCN

