

《地基污染气体超光谱靶向成像遥感
监测仪校准规范》
编制说明

编制组

2026 年 9 月

《地基污染气体超光谱靶向成像遥感监测仪校准规范》编制说明

一、任务来源

根据国家计量技术规范制修订工作的有关要求，由中国科学技术大学牵头，会同中国环境监测总站、中国计量科学研究院、中国科学院合肥物质科学研究院等单位制定《地基污染气体超光谱靶向成像遥感监测仪校准规范》（以下简称“本规范”）。本规范由全国生态环境监管专用计量测试技术委员会归口（MTC41），广东省广州生态环境监测中心站、云南省生态环境监测中心参加起草。

二、规范制定的目的和意义

自党的十八大将生态文明建设纳入中国特色社会主义总体布局以来，环境保护与治理工作已提升至国家战略高度，全面融入“五位一体”总体布局各方面和全过程。《中华人民共和国大气污染防治法》明确要求，需强化燃煤、工业等领域大气污染综合防治，推行区域联防联控机制，对二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物等污染物与温室气体实施协同管控，同时鼓励大气污染防治科技创新与先进技术装备推广。《国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知》（国发〔2018〕22号）进一步提出，三年内要大幅削减主要大气污染物排放总量，协同降低温室气体排放，并要求完善环境监测监控网络、强化重点污染源自动监控、提升移动源监管能力，通过常态化开展排放源解析构建污染动态溯源体系。为深入贯彻《习近平生态文明思想学习纲要》中建设美丽中国、推动绿色发展的核心要求，严格落实《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》确立的大气减污降碳工作方向，响应《关于进一步强化碳达峰碳中和标准计量体系建设行动方案(2024—2025年)》对“双碳”计量技术规范的制修订要求，特制定《地基污染气体超光谱靶向成像遥感监测仪校准规范》。

空气污染与气候变化已成为全球共同面临的严峻挑战，大气中各类污染气体的复杂相互作用，不仅直接诱发呼吸系统、心血管系统及免疫系统疾病，危害人体健康，更引发酸雨、极端气象等连锁环境问题，制约经济社会可持续发展。减污降碳协同推进既是保护生态环境、保障民生福祉的关键举措，也是提升我国低碳环保领域国际竞争力、树立负责任大国形象的重要途径。为此，国家先后出台系列配套政策与标准：《环境空气质量评价技术规范（试行）》（HJ 663—2013）规范了空气质

量评价流程，保障了评价结果的统一性与可比性；2011 年以来，《碳排放权交易管理暂行办法》《全国碳排放权交易市场建设方案（发电行业）》《碳排放权交易管理办法（试行）》等文件相继印发，构建了市场化减排机制；2025 年实施的 18 项温室气体排放核算国家标准，实现了重点行业碳排放核算的规范化、标准化。然而，在大气监测关键计量技术领域，我国尚未形成完整的校准规范体系，尤其缺乏针对成像遥感类监测设备的专项技术标准，成为制约减污降碳工作精准推进的短板。本规范的制定，正是填补这一空白的关键举措，既能为温室气体减排提供坚实技术支撑，也能充分发挥科技创新在大气环境治理中的核心作用，对减污降碳协同增效具有重要指导意义。

当前，我国对大气痕量气体成像遥感监测的技术规范需求极为迫切，而相关标准的缺失已影响监测数据的准确性与可比性。生态环境部 2024 年发布的《生态环境规划编制技术导则 总纲》（HJ 1359—2024）明确要求，生态环境规划编制必须遵循科学性原则，采用准确可信的数据资料、科学严谨的理论方法和先进成熟的技术手段。近年来，我国超光谱遥感技术已实现跨越式发展，国产超光谱卫星痕量气体遥感系统反演精度达到国际先进水平，广泛应用于大气污染防治业务化监测；大气污染物成像遥感监测仪凭借精准、便携、可靠、高性价比的技术优势，已在能源、工业、交通、农业、固废处理、餐饮等行业的有组织与无组织排放监测中得到规模化应用，为污染溯源提供了全新解决方案。《地基污染气体超光谱靶向成像遥感监测仪校准规范》的出台，不仅能规范现有环境监测设备的校准流程与结果核验标准，为空气污染监测与减污降碳工作提供统一技术依据，更能完善成像遥感监测体系、补齐计量技术规范短板、推进监测设备标准化建设、提升环境治理效能。通过强化监测技术支撑、规范治理流程、筑牢保护防线，本规范将为我国大气环境质量持续改善、实现长期健康发展提供有力保障，助力碳排放双控制度体系落地见效。

三、仪器原理及技术现状

1 仪器工作原理

地基污染气体超光谱靶向成像遥感监测仪一般由前置光学系统、扫描或角度控制机构、主控系统、光纤、分光计和探测器等组成。太阳光经过目标区域和大气路径后进入前置光学系统，经准直、聚焦和光谱色散（或干涉调制）后由探测器接收。仪器利用目标气体在特定波段的吸收结构，通过差分吸收或其他经验证的光谱反演

算法获得目标气体浓度，并将光谱结果与观测方向或探测器空间位置对应，形成二维分布信息。

按空间信息形成方式，现有仪器可概括为两类，如图 1 所示。一类探测器本身具有独立空间维，可同时获得多个空间位置的光谱，通过推扫获取二维空间光谱；另一类以单通道光谱测量为基础，通过摆扫（或其他等效方式）逐点形成二维空间光谱。两类仪器的浓度和光谱性能评价方法具有共性，但空间性能的评价对象不同，因此本规范对空间响应一致性的适用条件作了区分。

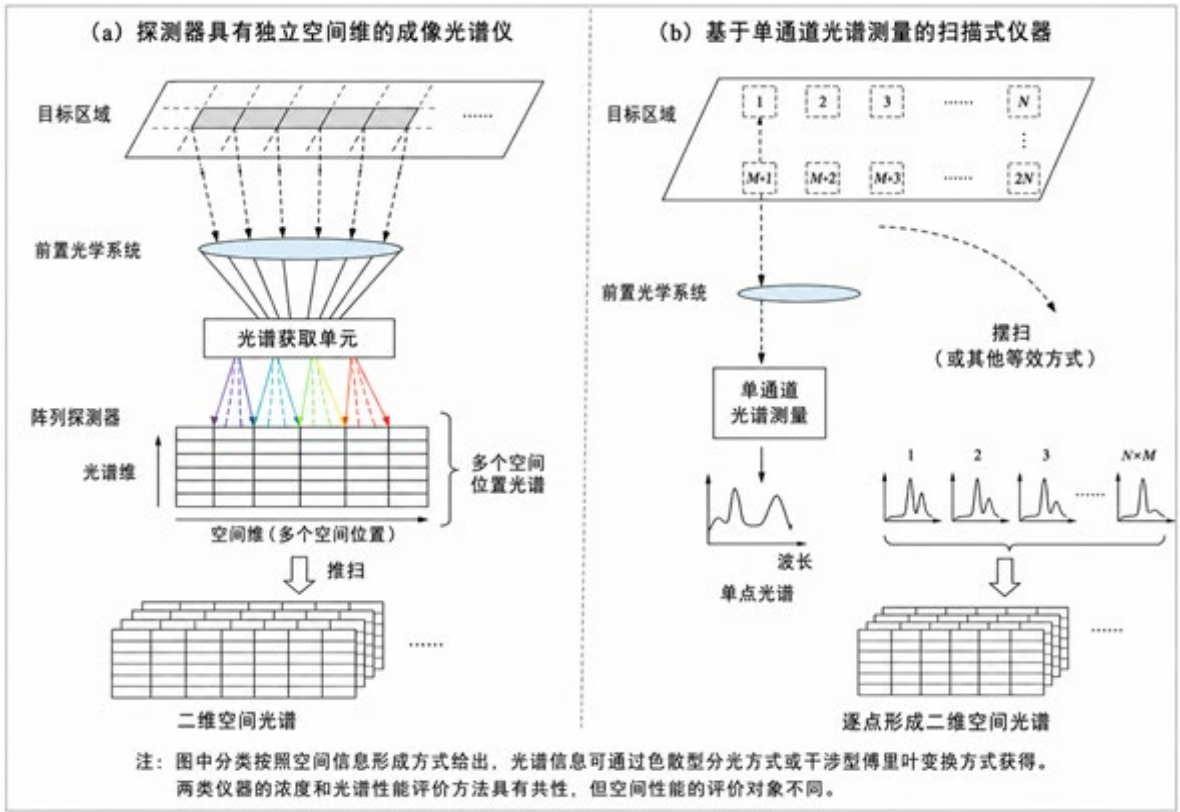


图 1 成像仪器分类

2 主要技术特点及计量问题

该类仪器的浓度反演并非单一传感器读数，而是由光谱采集、波长定标、仪器线形、参考吸收截面、背景处理和反演算法等共同决定。波长坐标偏移或光谱分辨力变化会直接改变目标气体吸收结构与参考谱的匹配关系，从而引入系统偏差；不同空间位置的光学传输和探测器响应差异则可能形成非真实的空间浓度结构。因此，仅校准最终浓度示值不能完整反映仪器的测量性能，必须同时评价光谱和空间成像环节。

浓度类校准还涉及气体标准物质从证书给值状态到气室实际测量状态的转换。特别是标准气体通常以物质的量分数给值，而本规范浓度类校准采用质量浓度表达，动态稀释、气室温度、绝对压力以及零气中目标组分含量都会影响最终参考浓度。为避免以被校仪器反演结果反过来确定参考值，本规范在附录中单独规定气室参考浓度的计算与量值溯源。

3 相关仪器试验数据

主要计量指标包括检出限、浓度示值误差、浓度测量重复性、波长（波数）示值误差、光谱分辨力、接收视场角和空间响应一致性。浓度示值误差和重复性用于评价仪器浓度测量的准确性和稳定性，检出限反映低浓度气体探测能力；波长（波数）示值误差和光谱分辨力用于评价光谱测量性能；接收视场角和空间响应一致性用于评价仪器的空间成像性能。考虑该类仪器用于污染源远距离、非接触式成像监测，有必要从浓度、光谱和空间三个方面对其计量性能进行校准评价。前期相关仪器浓度相关指标测试结果与光学、成像相关指标测试结果汇总分别见表 1 与表 2。结合相关计量技术规范及实验测试结果，给出参考：浓度示值误差不超过 $\pm 15\%$ 、重复性 $\leq 5\%$ 、空间响应一致性 $\leq 5\%$ ，其余指标按不同工作波段和目标气体分别规定。

表 1 前期相关仪器浓度相关指标测试结果汇总

研制或测试单位	技术原理	气体	浓度示值 误差/%	浓度测量 重复性/%	检出限 /($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
机构 A	紫外可见差分吸收光谱	NO ₂	2.3	0.54	0.31
		SO ₂	3.1	0.61	0.67
		HCHO	6.5	0.79	1.24
机构 B	紫外可见差分吸收光谱	NO ₂	2.5	0.51	1.51
		SO ₂	3.3	0.58	3.42
		HCHO	6.3	0.73	5.21
机构 C	紫外可见差分吸收光谱	NO ₂	3.1	0.65	1.73
		SO ₂	3.8	0.77	3.27
		HCHO	7.1	0.88	6.55
机构 D	紫外可见差分吸收光谱	NO ₂	3.5	0.64	1.45
		SO ₂	4.2	0.72	2.78
		HCHO	7.8	0.79	5.87

研制或测试单位	技术原理	气体	浓度示值 误差/%	浓度测量 重复性/%	检出限 /($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
机构 E	傅里叶变换红外吸收光谱技术	NH_3	9.0	4.8	0.05
		CO	2.1	0.3	0.35
		NO	14.0	4.5	1.8
		HCHO	13.3	3.0	0.05
机构 F	傅里叶变换红外吸收光谱技术	NH_3	10.0	3.0	7.0
		CO	8.0	2.5	12.0
		HCl	10.0	3.5	15.0
机构 G	傅里叶变换红外吸收光谱技术	NH_3	18.0	4.0	2.0
		CO	1.5	0.8	1.0
		HCl	8.0	4.0	0.80

表 2 前期相关仪器光学、成像相关指标测试结果汇总

研制或测试单位	技术原理	波长（波数） 示值误差	光谱分辨力	空间响应一致性
机构 A	紫外可见差分吸收光谱	0.05 nm	0.25 nm	3.1%
机构 B	紫外可见差分吸收光谱	0.07 nm	1.0~1.5 nm	4.5%
机构 C	紫外可见差分吸收光谱	0.06 nm	0.6 nm	-
机构 D	紫外可见差分吸收光谱	0.08 nm	<0.6 nm	-
机构 E	傅里叶变换红外吸收光谱技术	0.005 cm^{-1}	0.001 cm^{-1}	-
机构 F	傅里叶变换红外吸收光谱技术	0.01 cm^{-1}	0.125 cm^{-1}	-
机构 G	傅里叶变换红外吸收光谱技术	0.01 cm^{-1}	0.5 cm^{-1}	-

从表中可以看出，不同类型仪器的光谱性能差异较明显。紫外可见波段仪器的波长示值误差主要集中在 0.05~0.08 nm，光谱分辨力约为 0.25~1.5 nm。红外波段仪器通常采用波数表征，波数示值误差约为 0.005~0.01 cm^{-1} ，光谱分辨力约为 0.001~0.5 cm^{-1} ，不同型号之间差异较大。空间响应一致性目前仅部分具有独立空间维的成像仪器给出了测试结果，约为 3.1%~4.5%，其余仪器因空间信息获取方式不同或缺少相应数据，未给出该指标。

四、编制原则和依据

1 编制原则

本规范按照国家计量校准规范的基本结构编制。参考量值应具有独立、明确的量值溯源途径；校准项目应覆盖影响浓度反演和二维成像结果的主要计量环节；紫外—可见和红外波段分别采用与其光谱特性相适应的测量标准。

2 主要技术依据

本规范的结构和编写主要依据 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》，计量术语参考 JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》，测量不确定度评定参考 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》，重复性统计表达参考 GB/T 6379.1—2004《测量方法与结果的准确度》。环境监测和仪器应用方面，结合 GB 3095—2012《环境空气质量标准》、GB 37822—2019《挥发性有机物无组织排放控制标准》、HJ/T 55—2000《大气污染物无组织排放监测技术导则》、HJ 168—2020《环境监测分析方法标准制修订技术导则》以及 T/AHEPI 0002—2023《痕量气体超光谱靶向成像遥感监测技术指南》等文件确定仪器类别、目标气体和应用边界。

相关环境标准用于确定仪器应用范围和浓度量表达方式。本规范不涉及环境空气质量限值、污染物排放限值、监测点位布设及业务数据有效性判定。

五、规范内容

1 名称和范围

规范名称确定为《地基污染气体超光谱靶向成像遥感监测仪校准规范》。“地基”用于区别机载和星载平台；“污染气体”限定监测对象；“超光谱”体现仪器依靠较高光谱分辨能力识别目标气体吸收结构；“靶向成像”强调面向固定或准固定污染源进行定向观测并形成二维空间分布；“遥感监测仪”体现非接触式观测方式。

本规范适用于采用被动遥感方式、以太阳光为观测光源的地基超光谱靶向成像遥感监测仪。紫外—可见波段主要覆盖 NO_2 、 SO_2 、 HCHO 等具有成熟差分吸收观测基础的污染气体；红外波段根据目标气体吸收带确定，其中现有研究表明 HCl 、 CO 、 NH_3 等测量具有可行性。主动式、机载和星载仪器不属于直接适用范围。浓度类校准

适用于在相应波段具有可用吸收特征且具备有效量值溯源途径的目标气体，具体校准气体根据被校仪器的测量能力确定。

2 术语和计量单位

规范对浓度示值误差和浓度测量重复性进行定义，目的是统一最终浓度结果的评价方式。相对示值误差以独立参考浓度为分母，零气点因参考浓度为零，不参与相对误差计算，仅用于零点或背景检查。浓度测量重复性采用相同条件下多次测量结果的相对标准偏差表征，以便不同浓度量级之间比较。

规范采用“超光谱遥感设备”和“靶向成像遥感”术语界定仪器对象及空间信息形成方式。浓度类校准采用质量浓度，单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。仪器原始输出为物质的量分数、柱浓度或路径积分浓度时，应明确被测量定义、有效光程及状态换算模型，并在校准结果中注明。

3 概述

概述规定仪器的一般组成和基本测量原理，不限定具体光学结构或扫描机构，以适用于不同技术结构的同类仪器。

4 计量特性

本规范设置检出限、浓度示值误差、浓度测量重复性、波长示值误差、光谱分辨力、接收视场角和空间响应一致性七项计量特性。前三项评价浓度测量性能，波长示值误差和光谱分辨力评价光谱测量性能，接收视场角和空间响应一致性评价成像空间性能。以上计量特性指标仅供参考，不用于符合性判定。

表 3 计量特性及设置依据

计量特性	参考指标	设置依据和适用说明
检出限	按具体组分划分	评价零输入附近随机噪声与反演波动；不同气体、波段和采集参数差异较大，应分别报告实测值。
浓度示值误差	优于 $\pm 15\%$	评价仪器示值与可溯源参考浓度的一致程度；0%点不计算相对误差。
浓度测量重复性	$\leq 5\%$	评价相同输入条件下的短期随机离散；在约 40%工作范围处重复测量 6 次。

计量特性	参考指标	设置依据和适用说明
波长示值误差	优于 0.1 nm	保证目标气体吸收结构与参考光谱坐标准确对应；每一工作波段选取多个参考点。红外 FTIR 类仪器可在校准记录中同时注明波数坐标。
光谱分辨力	优于 0.5 nm	评价仪器分辨目标气体吸收结构和保持线形的能力。色散型仪器通常以 FWHM 表征；FTIR 类仪器可按其规定的光谱分辨率表征。
接收视场角	-	报告水平和垂直方向全视场角实测值；该项目按仪器实际空间成像结构确定适用性。
空间响应一致性	≤5%	评价原生空间维不同位置在相同输入下的响应差异；仅适用于具有独立空间维的仪器。

5 校准条件和测量标准

环境条件根据仪器的使用环境和测量标准的正常工作条件确定。浓度类校准时测量并记录气室内气体温度和绝对压力，用于气室参考浓度的状态换算；同时记录环境相对湿度。

测量标准及配套设备包括原子谱线灯或窄谱线参考、宽带光源、标准气体或标准气体发生装置、零气、气体动态稀释仪、气室、温压测量设备和测距装置。紫外—可见和红外波段分别选用与相应波段及仪器结构相适应的波长或光谱分辨力参考标准。

表 4 主要测量标准及其作用

标准器或设备	主要作用	制定考虑
原子谱线灯/窄谱线参考	波长示值误差、光谱分辨力	参考谱线位置应有可靠来源并覆盖相应工作波段；红外波段可采用窄线宽激光、标准气体吸收线或经验证的波数参考进行核验。
宽带光源	吸收谱测量及光路耦合	输出波段覆盖被校仪器红外工作范围并具有足够短期稳定性，可配合参考吸收池进行吸收谱测量。
有证标准气体	建立目标气体参考量值	相对扩展不确定度原则上≤3% (k=2)，按目标气体选择。HCl 可采用有证氮中 HCl 气体标准物质。
零气、动态稀释仪	零输入及多浓度点配制	零气纯度和稀释比应满足量值溯源要求；对高反应性气体，可采用经校准的渗透发生系统建立多浓度点。

标准器或设备	主要作用	制定考虑
校准气室及温压测量	形成稳定气体光路并进行状态换算	窗口、材料、密闭性和有效光程应与工作波段及目标气体相容。HCl 应关注吸附和水分影响。
点光源、测距仪	接收视场角校准	长度量可溯源，能够确定视场边界尺寸和仪器至点光源距离。

6 校准结果表达和复校时间间隔

校准证书除通用信息外，还应记录目标气体、工作波段、工作范围、积分时间或主要采集参数、软件和反演算法标识、气室参考浓度状态、温度、绝对压力以及必要的有效光程信息。

复校时间间隔由使用者根据仪器稳定性、使用频率、环境条件、运输和维修情况确定，建议不超过 1 年。更换分光计、探测器、前置光学系统、扫描机构等主要部件，更新核心反演算法，或对测量结果产生怀疑时，应重新校准。

7 附录设置

附录 A 给出校准原始记录参考格式；附录 B 规定气室参考浓度计算和量值溯源方法；附录 C 给出校准证书内页参考格式；附录 D 给出浓度示值误差测量不确定度评定示例。

六、各校准项目和校准方法的确定依据

1 波长示值误差

目标气体浓度反演依赖实测光谱与参考吸收结构在光谱坐标上的准确对应。波长或波数坐标偏移会使吸收线中心和参考截面错位，即使光谱强度稳定也可能产生系统性浓度误差，因此波长示值误差应作为独立校准项目。紫外—可见波段可采用参考波长已知的原子发射谱线；红外色散型仪器可采用窄线宽激光或标准气体吸收线，FTIR 类仪器可采用已知吸收线的标准气体进行核验。每个工作波段至少选择 3 个分布在有效范围内的参考点，每点重复测量 3 次，以仪器测得光谱坐标平均值与参考值之差评价示值误差。

参考点不宜集中在单一窄区域，否则不能反映整个有效波段的波长尺度误差。谱线中心可采用峰值搜索、质心或拟合方法，但同一校准过程应保持方法一致并记录算法和拟合范围。

2 光谱分辨力

光谱分辨力决定仪器能否区分相邻吸收结构以及实测吸收线形是否发生明显展宽。规范采用特征谱线的半高全宽 FWHM 表示光谱分辨力，这是分光类仪器常用且可直接由实测谱线获得的评价方式。每条特征谱线重复测量 6 次，取 FWHM 平均值作为该波长处的光谱分辨力。选择参考线时应避免探测器饱和、相邻谱线重叠和过低信噪比。

3 检出限

检出限用于评价仪器在低浓度区域区分目标气体信号与随机波动的能力。在校准气室中通入零气，在规定工作波段、积分时间和反演条件下连续测量 11 次，以测量结果实验标准偏差的 3 倍作为检出限。该方法同时反映光谱采集和反演过程在零输入附近的随机波动。

如果仪器软件将负浓度结果自动截断为零，会人为降低零气数据的标准偏差，因此校准应优先采用未截断的原始反演结果；无法获得时应在结果中注明。检出限必须与目标气体、工作波段和采集条件一并报告，不能脱离限定条件。

4 浓度示值误差

浓度示值误差是评价仪器最终定量结果准确程度的核心项目。规范在工作范围内设置 0%、1%、10%、20%、50%和 80%等浓度点：零气用于检查零点和背景，1%和 10%覆盖低浓度区域，20%~80%用于评价主要工作区间的定量响应。各非零点在气室浓度、温度和压力稳定后重复测量 6 次，以仪器示值平均值与气室参考质量浓度计算相对示值误差。

对于没有固定满量程或不同气体工作范围不同的仪器，应按制造商声明的工作范围或用户实际使用范围确定浓度点。参考浓度与仪器示值应采用相同的量、单位和状态；零气点不计算相对示值误差。

5 浓度测量重复性

重复性用于评价相同参考输入和相同测量条件下仪器示值的离散程度。规范选择约 40%工作范围处的标准气体连续测量 6 次，以相对标准偏差表示。

6 接收视场角

接收视场角是指在规定工作条件下，仪器能够接收目标辐射并形成有效光谱测量结果的物方角度范围。接收视场角分为水平方向接收视场角和垂直方向接收视场角，以全角表示，单位为（°）。本规范定义接收视场角是为了与扫描后的全视场角做区分。

7 空间响应一致性

对于探测器具有独立空间维的仪器，同一均匀输入在不同空间位置可能因光学传输、像元响应或校正系数差异而产生不同浓度结果，进而形成虚假空间结构。因此规范设置空间响应一致性项目，在约 40%工作范围的均匀标准气体输入下，选取覆盖中心、中间和两侧区域的空间采样位置，或采用全部有效空间单元，以各位置结果的相对标准偏差表征一致性。

该项目必须先确认输入场在被评价空间范围内足够均匀。制造商明确规定的无效像元、遮挡像元和不参与测量的边缘区域不纳入评价。对于探测器仅承担光谱色散、空间信息完全依靠单通道扫描形成的仪器，不存在同一时刻的原生空间位置响应比较，本项目不适用。

七、量值溯源和测量不确定度

1 气室参考浓度的量值溯源

浓度类校准的参考值由标准量值链独立确定。采用动态稀释时，首先依据有证标准气体中目标组分物质的量分数、零气中目标组分含量以及标准气体和零气流量计算气室入口混合气的物质的量分数；再依据气室实测绝对压力、热力学温度和目标气体摩尔质量换算为气室测量状态下的质量浓度。多级稀释时逐级建立计算模型，并考虑同一流道或共同标准引起的相关性。

气室参考浓度必须代表实际作用于仪器光路的气体状态。对于易吸附、易反应或不稳定气体，应评价管路和气室材料、置换时间、吸附、反应、泄漏和发生稳定

性；必要时通过入口/出口一致性试验或独立传递方法验证。不得使用被校仪器的反演结果反向修正标准浓度，否则会形成循环量值链。

2 浓度示值误差的测量不确定度

浓度相对示值误差的不确定度来源主要包括被校仪器重复测量和显示分辨力，以及气室参考浓度所涉及的标准气体认定值、动态稀释比或各流量通道、零气中目标组分含量、气室温度和绝对压力等。经评价不可忽略的气室密闭性、吸附或反应、湿度、有效光程和窗口损耗等影响，应按实际测量模型计入。

标准或配气装置已直接给出校准状态下具有溯源性的质量浓度时，不重复计入相同的温度和压力换算分量；有效光程仅在浓度模型或量纲换算实际使用该量时计入。输入量存在相关性时，应在合成标准不确定度中计入协方差。实际校准应根据所用测量标准、目标气体和测量模型评定测量不确定度。

3 其他项目的不确定度

波长示值误差的不确定度主要考虑参考谱线波长、谱线中心确定、光谱采样间隔和重复性；光谱分辨力主要考虑参考线本征线宽、半高点插值或拟合、采样间隔、信噪比和重复性；接收视场角主要考虑点光源距离 L 、测量位置处点光源中心相对于仪器参考轴的横向偏移量 x 、参考面定位、边界判读和重复定位；空间响应一致性主要考虑标准输入稳定性和均匀性、空间位置选择、无效像元判定以及重复测量。各项目应根据实际测量模型评定测量不确定度。