

《便携式大气温室气体柱浓度遥感
监测仪校准规范》
编制说明

编制组

2026 年 9 月

《便携式大气温室气体柱浓度遥感监测仪校准规范》编制说明

一、任务来源

《便携式大气温室气体柱浓度遥感监测仪校准规范》制定任务由市场监管总局下达，归口技术委员会为全国生态环境监管专用计量测试技术委员会（MTC41）。由中国环境监测总站、中国科学技术大学、浙江工业大学、中国计量科学研究院和中国科学院合肥物质科学研究院共同承担规程制定工作。

二、规范制定的目的和意义

自工业化以来，人类活动导致的二氧化碳、甲烷等温室气体排放持续增加，引发全球气候变暖并显著加剧极端天气事件，已成为国际社会共同面临的重大挑战。获取准确、连续、可比的温室气体监测数据，是深入认识温室气体时空分布特征、变化趋势及其驱动机制，科学评估人为排放影响，支撑气候变化应对与减缓决策的关键基础。

随着全球气候治理进程不断推进，国际社会日益重视构建多尺度、多平台协同的温室气体监测体系，通过整合卫星遥感、航空观测、地基遥感与原位监测等多种技术手段，形成优势互补、相互校验的天空地一体化温室气体监测网络。世界气象组织（WMO）及有关国家均已系统规划并持续推进多种观测手段的协同应用，以提升温室气体监测数据的可靠性和应用价值。2024年1月，我国发布的《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》亦明确提出，要加快建立现代化生态环境监测体系，健全天空地海一体化监测网络。

在上述体系中，地基温室气体柱浓度遥感监测是连接卫星遥感观测与地面原位测量的重要技术手段，在立体监测体系中发挥着重要的基准和纽带作用，其测量准确性直接影响天空地一体化监测数据的质量和可靠性。地基柱浓度监测数据既可用于卫星温室气体遥感产品真实性检验，保障卫星反演结果的质量和可追溯性，也可用于城市、区域等尺度温室气体浓度分布和变化特征监测，为排放清单核算、减排效果评估和相关政策制定提供重要支撑。国际上，基于高分辨率傅里叶变换红外光谱技术的地基温室气体柱浓度遥感监测已形成较为成熟的观测体系，可获取站点尺度高精度、长时序的温室气体柱浓度数据，并广泛应用于全球温室气体变化监测和卫星遥感产品验证。由于高精度地基监测系统建设和运行成本较高，固定站点布设相对有限，难以满足城

市、区域及重点排放源周边高密度观测需求。近年来，国际上进一步发展了基于便携式光谱仪器的温室气体柱浓度遥感监测技术。与固定式高精度监测系统相比，便携式仪器具有体积小、部署灵活、运行成本较低等优势，可根据监测任务需求灵活调整观测地点和观测方式，适用于城市、区域及重点排放源周边的高密度、机动化观测，有效弥补固定站点空间覆盖不足的问题，在区域排放监测、城市碳排放评估和卫星遥感产品区域验证等方面展现出较大的应用潜力。随着相关技术不断发展，便携式温室气体柱浓度遥感监测仪逐渐成为天空地一体化温室气体监测体系的重要组成部分。目前，我国也在积极推进地基温室气体柱浓度监测网络建设，国内相关科研机构 and 仪器研制单位已在便携式监测仪器研发方面取得阶段性进展，涵盖了光栅光谱、傅里叶变换红外光谱、激光外差光谱等不同技术路线，为开展区域高密度温室气体监测和相关应用研究提供了技术基础。

随着此类仪器应用领域不断拓展以及立体监测体系建设持续推进，对监测数据质量的要求也不断提高。然而，目前我国尚缺乏针对便携式大气温室气体柱浓度遥感监测仪的统一校准技术规范，难以有效保障不同仪器、不同观测条件下监测数据的准确性和可比性，在一定程度上制约了其在卫星遥感产品真实性检验、温室气体排放核算及减排效果评估等方面的进一步应用。同时，该类仪器不同于传统原位监测设备，其测量结果通常基于太阳吸收光谱反演获得，易受观测条件、先验信息和反演算法等多重因素影响，计量溯源路径较为复杂，对校准方法和质量控制技术提出了更高要求。因此，系统开展便携式大气温室气体柱浓度遥感监测仪计量技术研究，建立科学、规范、可操作的校准技术规范，对于提升我国温室气体柱浓度监测数据质量、支撑天空地一体化监测体系建设、服务国家气候变化应对与“双碳”战略目标，具有重要的科学意义和现实迫切性。

三、编制原则和依据

1 制定中遵循的基本原则

本规范制定中遵循以下基本原则：

- a) 本规范编写格式应符合 JJF1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》等规范的规定。

- b) 本规范要与国家的节能政策、环境保护政策等相一致；
- c) 本规范要与已颁布实施的相关标准进行衔接；
- d) 本规范规定的技术内容及要求应科学、合理，具有适用性和可操作性。

2 规范制定的依据

在规范编写过程中，本规范参考了 T/AHEPI 03—2022《温室气体柱浓度地基监测技术规范傅里叶变换红外光谱法》标准文件中相关术语和定义。

四、规范内容

1 名称

调研发现国内现有相关仪器主要聚焦 CO_2 和 CH_4 柱浓度监测，为确保校准规范的适用性，将立项时名称《便携式大气柱浓度红外遥感监测仪校准规范》修改为《便携式大气温室气体柱浓度遥感监测仪校准规范》。

2 范围

本规范适用于基于被动红外原理的便携式大气二氧化碳（ CO_2 ）、甲烷（ CH_4 ）柱浓度遥感监测仪的校准。其他温室气体组分参照执行。

3 引用文件

在规范编写过程中，本规范参考了 T/AHEPI 03—2022《温室气体柱浓度地基监测技术规范傅里叶变换红外光谱法》中的术语条款。

4 术语和定义

4.1 术语

4.1.1 温室气体柱浓度

T/AHEPI 03—2022《温室气体柱浓度地基监测技术规范傅里叶变换红外光谱法》3.3 条款对柱浓度的定义为“气体（如 CO_2 ）在单位面积上从地表到大气层顶柱体内所含的分子数”。然而，在温室气体实际监测工作中，常优先使用无量纲的柱平均干空气混合比（ X_{gas} ，如 X_{CO_2} ， X_{CH_4} ），而非柱总量来作为衡量温室气体源汇的关键参数，前者不受气压、温度和水汽含量变化的影响。因此，本规范将温室气体柱浓度定义为从地面到大气层顶某种温室气体相对于干空气的柱平均摩尔分数，记为 X_{gas} 。

本规范采用“温室气体柱浓度”作为术语名称，未采用“温室气体柱平均浓度”“柱平均干空气摩尔分数”等其他表述，主要是为简化术语名称，便于后文表述。

4.1.2 精密度

经调研，在温室气体遥感监测领域中，常用偏差标准差表示反演结果的精密度。因此，在此规范中，定义一段时间内仪器测量值与参考量值之间差值的标准偏差为精密度。

4.2 计量单位

对于CO₂柱浓度，单位为μmol/mol；对于CH₄柱浓度，单位为nmol/mol。

5 概述

基于傅里叶变换红外光谱、光栅光谱和激光外差光谱等技术的便携式大气温室气体柱浓度遥感监测仪均包含太阳跟踪模块、光谱探测模块和数据处理分析模块。其基本原理均是基于大气温室气体成分对太阳光谱的吸收特征，结合辐射传输模型，通过最优化反演算法，获取柱浓度数据。

6 计量特性

本规范规定的计量特性主要包括示值误差、重复性和精密度。在温室气体柱浓度遥感监测领域，通常采用偏差均值和偏差标准差分别表征反演结果中的系统误差和随机误差。为确保校准结论能与监测数据实际应用相接轨，本规范选用示值误差表征仪器反演结果的系统误差水平，采用精密度表征在一定时间尺度内反演结果的随机误差特征，使计量特性指标能够直接对应遥感产品验证和数据质量评估中所使用的统计指标。同时，从仪器性能表征角度出发，本规范还设置重复性指标，用于评价在短时间、相同测量条件下，仪器自身随机因素对示值稳定性的影响。

2025年12月3日至12月9日，多台便携式大气温室气体柱浓度遥感监测仪器与碳柱总量观测网（TCCON）站开展了连续同步比对测试。表1和表2为仪器性能测试结果汇总表。基于测试结果以及国内相关仪器调研情况，制定计量特性指标要求如下：CO₂柱浓度示值误差为±2 μmol/mol、重复性为0.4 μmol/mol、精密密度为1 μmol/mol；CH₄柱浓度示值误差为±10 nmol/mol、重复性为4 nmol/mol、精密密度为5 nmol/mol。

表 1 仪器测试结果汇总表（示值误差和精密度）

序号	研制单位	编号	气体种类	示值误差	精密度
1	机构A	仪器1	CO ₂ /(μmol/mol)	0.08	0.37
			CH ₄ /(nmol/mol)	-3.21	2.31
2	机构A	仪器2	CO ₂ /(μmol/mol)	0.54	0.36
			CH ₄ /(nmol/mol)	-1.88	2.31
3	机构A	仪器3	CO ₂ /(μmol/mol)	1.08	0.35
			CH ₄ /(nmol/mol)	-3.27	2.27

表 2 仪器测试结果汇总表（测量重复性）

序号	研制单位	编号	气体种类	测量重复性						
				3日	4日	5日	6日	7日	8日	9日
1	机构A	仪器1	CO ₂ /(μmol/mol)	0.41	0.14	0.26	0.26	0.19	0.36	0.18
			CH ₄ /(nmol/mol)	1.15	0.49	1.97	1.79	1.20	1.64	1.86
2	机构A	仪器2	CO ₂ /(μmol/mol)	0.42	0.18	0.24	0.25	0.21	0.37	0.17
			CH ₄ /(nmol/mol)	1.12	0.35	1.83	1.89	1.31	1.58	1.92
3	机构A	仪器3	CO ₂ /(μmol/mol)	0.40	0.15	0.23	0.26	0.20	0.36	0.13
			CH ₄ /(nmol/mol)	1.14	0.33	1.82	1.81	1.36	1.57	1.80

7 校准条件

7.1 环境条件

考虑仪器实际使用环境为室外，因此规定校准环境温度：（-10~40）℃；相对湿度：≤85%；大气压：（80~160）kPa；供电电压：AC（220±22）V，（50±1）Hz；校准时应保障仪器放置区域无遮挡，晴朗无云或少云，大气状态稳定，太阳天顶角≤80°。

7.2 测量标准仪器

便携式大气温室气体柱浓度遥感监测仪通过接收太阳光经大气传输后的吸收光谱信号，结合先验廓线数据、光谱参数数据库、辐射传输模型及最优化反演算法，获取高精度大气温室气体柱浓度数据。该类仪器的测量路径覆盖整个大气层，其反演结果不仅与仪器光谱测量性能有关，还受到先验廓线数据质量、光谱吸收参数准确性以

及辐射传输模型等多种因素的综合影响。气体标准物质气室仅能模拟有限光程条件下的吸收过程，不能反映大气整层传输特征，也无法体现廓线分布及光谱参数对反演结果的影响。因此，采用气室标准物质难以对柱浓度反演结果进行有效校准。

本规范借鉴国际相关设备的校准做法，将 TCCON 标准站或便携式传递标准仪器作为测量标准仪器。该类仪器应通过飞机原位观测或 AirCore 采样系统获取的高精度垂直廓线数据进行校准，确保其量值可溯源至国际单位制（SI）。标准仪器测得的 CO₂ 柱浓度最大允许误差为 0.16%，CH₄ 柱浓度最大允许误差为 0.4%。

8 校准项目和校准方法

8.1 校准前准备

校准工作应在晴朗、无云或少云且无遮挡的室外条件下进行。被校仪器应布设在距离标准仪器水平直线距离不超过 100 m 的位置，保证两者观测条件基本一致。校准前，应按照仪器使用说明书的要求对被校仪器和标准仪器进行预热和系统检查，使仪器处于稳定工作状态后方可开展校准。

8.2 示值误差

被校仪器应与测量标准仪器在同一观测条件下开展连续同步观测。分别计算被校仪器与标准仪器的 10 min 测量平均值，并进行时间匹配，有效匹配对数 $n \geq 150$ ，按照公式（1）计算仪器的示值误差。

$$\overline{\Delta C} = \frac{\sum_{k=1}^n \Delta C_k}{n} \quad (1)$$

$$\Delta C_k = C_k - C_{s,k} \quad (2)$$

式中：

n ——同步测量次数；

$\overline{\Delta C}$ —— n 次同步测量值示值误差的算术平均值， $\mu\text{mol/mol}$ 或 nmol/mol ；

ΔC_k ——被校仪器与标准仪器第 k 次同步测量值的示值误差， $\mu\text{mol/mol}$ 或 nmol/mol ；

$C_{s,k}$ ——标准仪器的第 k 次同步测量值， $\mu\text{mol/mol}$ 或 nmol/mol ；

C_k ——被校仪器的第 k 次同步测量值， $\mu\text{mol/mol}$ 或 nmol/mol 。

考虑到不同仪器测量时间分辨率的差异和大气温室气体柱浓度的稳定性，并参考国际同类比对经验，本规范采用被校仪器与标准仪器的 10 min 测量均值进行时间匹配。

经调研，目前国内外相关仪器柱浓度测量的时间分辨率均可达到分钟级，故未将时间分辨率单独列为计量性能指标。

校准工作需在室外晴朗无云条件下进行，须在测量时长与指标代表性之间取得平衡。为确定满足计量特性评价要求的最少匹配样本量，基于 2025 年 12 月 3 日至 9 日三台机构 A 仪器与 TCCON 站同步观测数据开展实验分析，考察 CO₂ 和 CH₄ 柱浓度示值误差与精密度随匹配样本量的变化趋势，结果如图 1 至图 3 所示。

总体来看，三台仪器的分析结论基本一致。以机构 A 仪器 1 为例，当匹配样本量大于 100 时，其 CO₂ 柱浓度示值误差与精密度均趋于稳定（图 1(a)）；CH₄ 柱浓度示值误差与精密度则呈现一定波动。为进一步量化稳定性的判定标准，引入“极差值”作为评价指标，并将其阈值设定为相应计量特性要求的十分之一，即若在样本量 x 下，后续不同样本量对应的指标值极差不大于该阈值，则认为 x 为具备代表性的最小样本量。

基于该方法分析得到：对于 CO₂ 柱浓度测量（图 1(b)），当样本量 ≥ 34 时，示值误差的极差值小于 0.4 $\mu\text{mol/mol}$ ；当样本量 ≥ 66 时，精密度的极差值小于 0.1 $\mu\text{mol/mol}$ 。对于 CH₄ 柱浓度测量（图 1(d)），当样本量 ≥ 14 时，示值误差的极差值小于 2 nmol/mol ；当样本量 ≥ 149 时，精密度的极差值小于 0.5 nmol/mol 。

综合实验分析结果与实际校准工作的可操作性，本规范规定被校仪器与标准仪器的有效匹配对数应不少于 150 对，对应约需在晴好天气条件下开展 3~5 天同步观测。

（冬季 9 点-16 点，一天约 40 个；夏季 8 点-18 点，一天约 60 个）

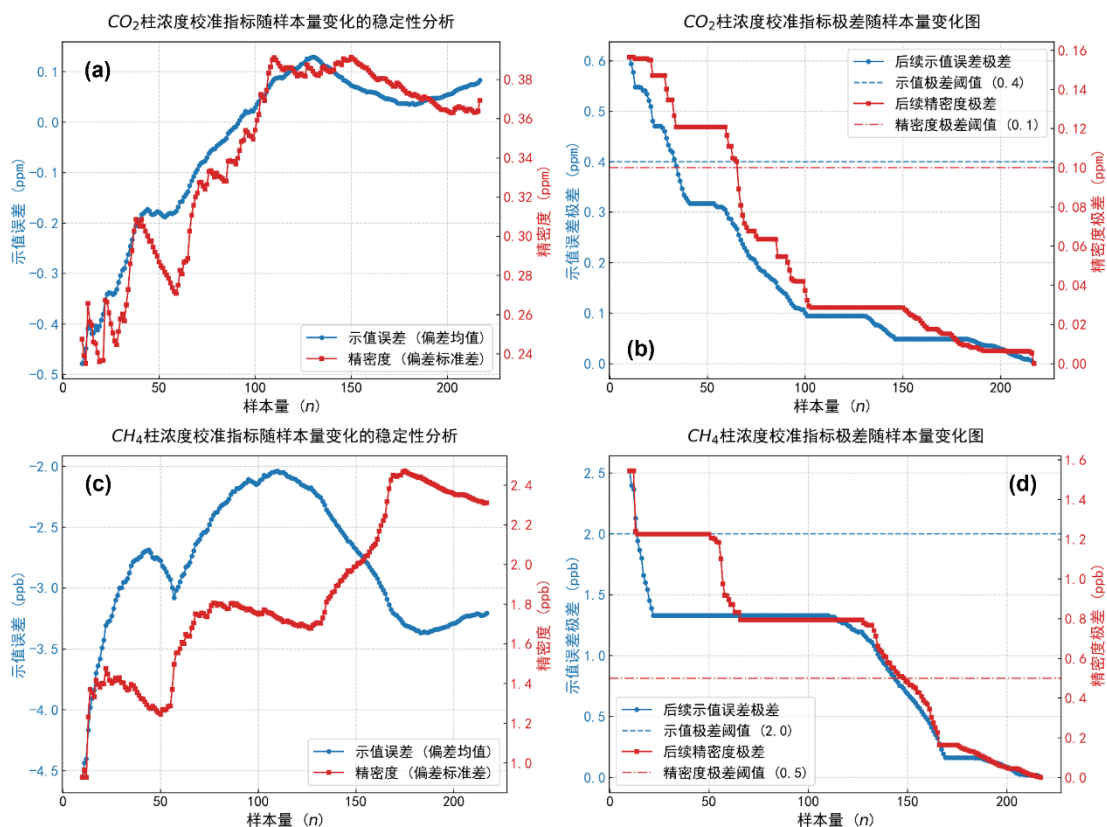


图 1 机构 A 仪器 1 校准指标的稳定性与代表性样本量分析

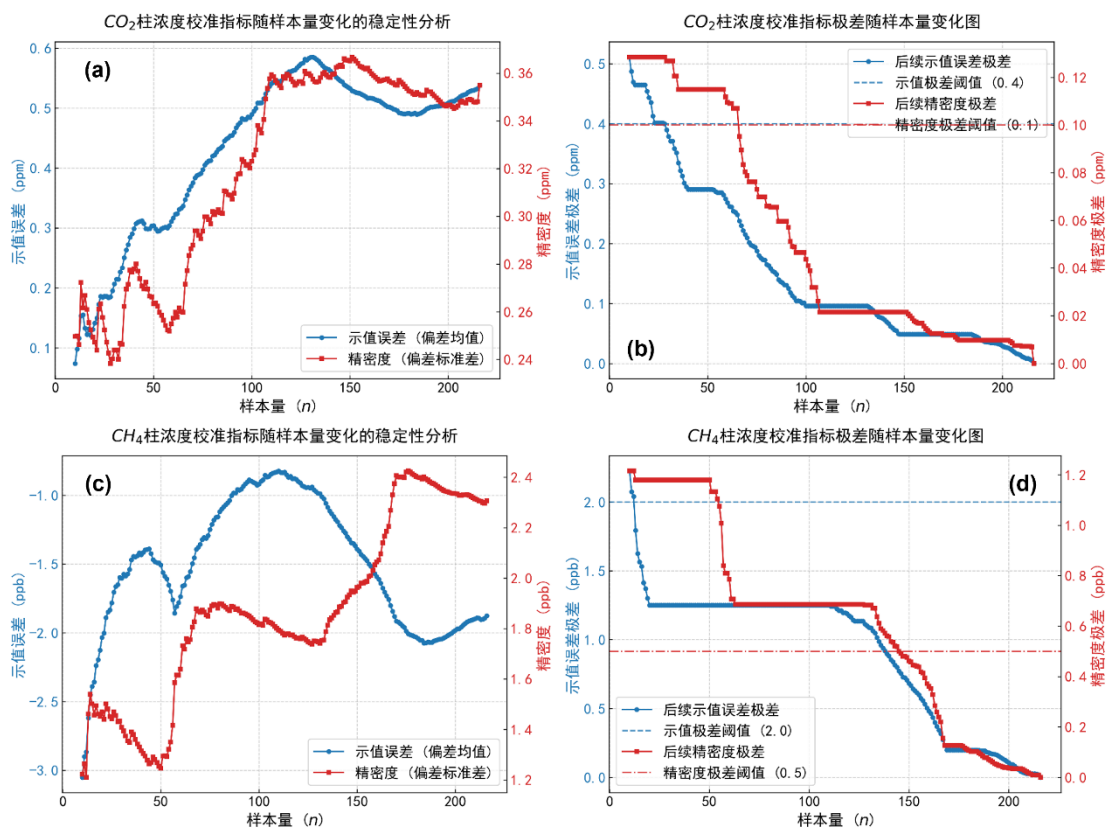


图 2 机构 A 仪器 2 校准指标的稳定性与代表性样本量分析

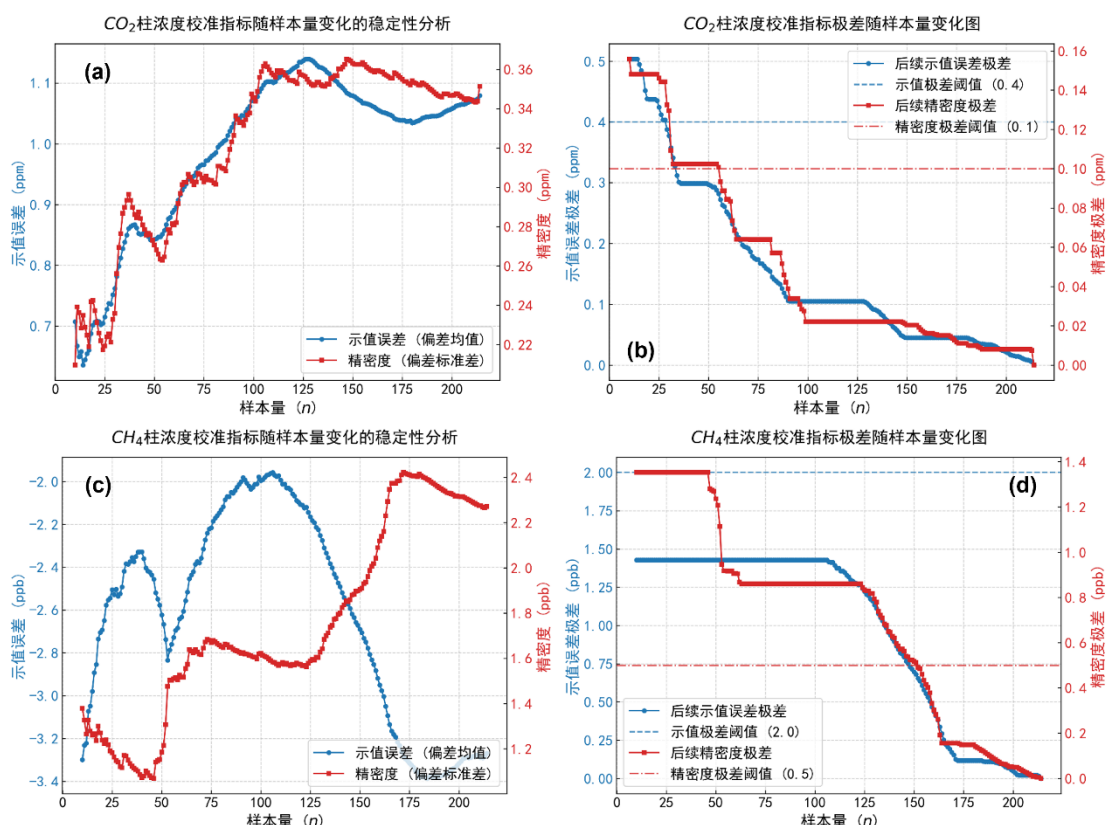


图3 机构A仪器3 校准指标的稳定性与代表性样本量分析

8.3 重复性

选取晴朗、少云且无剧烈天气活动、大气状态稳定的典型日开展仪器观测。选取当地时间 11:00 到 13:00 期间的测量数据，测量次数 $n \geq 10$ 。按照公式 (3) 计算仪器测量的标准偏差，作为仪器的测量重复性。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (C_k - \bar{C})^2}{n-1}} \quad (3)$$

式中：

S ——测量标准偏差， $\mu\text{mol/mol}$ 或 nmol/mol ；

C_k ——被校仪器第 k 次测量值， $\mu\text{mol/mol}$ 或 nmol/mol ；

$\bar{C}$ ——被校仪器 n 次测量值的平均值， $\mu\text{mol/mol}$ 或 nmol/mol ；

n ——测量次数。

该时段太阳高度角较大，大气路径变化较小，观测条件相对稳定，适用于测量重复性的评定。

8.4 精密度

被校仪器应与测量标准仪器在同一观测条件下开展连续同步观测。分别计算被校仪器与标准仪器的 10 min 测量平均值，并进行时间匹配，有效匹配对数 $n \geq 150$ ，按照公式（4）计算仪器的精密度。

$$S_r = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\Delta C_k - \overline{\Delta C})^2}{n - 1}} \quad (4)$$

式中：

S_r ——被校仪器的精密度， $\mu\text{mol/mol}$ 或 nmol/mol ；

ΔC_k ——被校仪器与标准仪器第 k 次同步测量值的示值误差， $\mu\text{mol/mol}$ 或 nmol/mol ；

$\overline{\Delta C}$ —— n 次同步测量值示值误差的算术平均值， $\mu\text{mol/mol}$ 或 nmol/mol ；

n ——测量次数。

有效匹配对数的确认见 8.2。

五、总结

在本规范的制定过程中，起草单位以国内外技术资料及相关标准、实验数据为技术依据，本着科学合理、易于操作和普遍适用的原则，制定完成了便携式大气温室气体柱浓度遥感监测仪校准规范相关内容。本规范制定以实际情况为出发点，体现科学性、合理性、实用性。努力使规范的校准项目、校准方法与国家标准、相关（行业）标准等技术规范相符合。