

《环境空气 污染物和温室气体垂直分布测量技术 管路引流法》

编制说明

《环境空气 气态污染物和温室气体垂直分布测量技术 管路引流法》编制组

二〇二六年四月

项目名称：环境空气污染物和温室气体垂直分布测量技术
管路引流法

项目统一编号：

承担单位：暨南大学，广东省生态环境监测中心，中国科学院大气物理研究所，中国科学院合肥物质科学研究院，无锡中科光电技术有限公司，北京英格海德分析技术有限公司，广东省广州生态环境监测中心站，深圳市国家气候观象台，南京信息工程大学、香港科技大学、澳门科技大学

目 录

| | |
|---|----|
| 1 任务来源，起草单位，主要起草人 | 3 |
| 1.1 任务来源 | 3 |
| 1.2 起草单位 | 3 |
| 1.3 主要起草人 | 3 |
| 2 标准制定的必要性与意义 | 4 |
| 2.1 相关环保工作及环保标准的需要 | 4 |
| 2.2 现行方法实施情况和存在问题 | 4 |
| 2.3 国内外相关技术/研究现状 | 4 |
| 3 主要工作过程 | 5 |
| 4 标准制订的原则和依据 | 6 |
| 4.1 标准制订的基本原则 | 6 |
| 4.2 标准制订的依据 | 6 |
| 5 标准内容简介（主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述） | 8 |
| 5.1 文件内容框架 | 8 |
| 5.2 适用范围 | 8 |
| 5.3 规范性引用文件 | 8 |
| 5.4 术语和定义 | 8 |
| 5.5 原理 | 12 |
| 5.6 系统组成 | 12 |
| 5.7 技术要求 | 14 |
| 5.8 安装要求 | 21 |
| 5.9 运行维护 | 23 |
| 5.10 质量控制与数据处理 | 24 |
| 6 重大意见分歧的处理依据和结果 | 25 |
| 7 与国内外同类标准水平的对比情况 | 25 |
| 7.1 国外同类标准水平情况 | 25 |
| 7.2 国内同类标准水平情况 | 26 |
| 8 参考文献 | 28 |

《环境空气气态污染物和温室气体垂直分布测量技术 管路引流法》 编制说明

1 任务来源，起草单位，主要起草人

1.1 任务来源

为贯彻落实《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国大气污染防治法》以及国家碳达峰碳中和战略目标，改善环境质量，保障人体健康，应对气候变化，需发展规范化、标准化的立体监测技术。管路引流法作为一种经济、高效的垂直分布测量手段，已在国内多个观测站点和科研项目中得到应用，但尚缺乏统一的技术标准，导致不同机构的数据可比性与质量控制方法不一致。为此，暨南大学联合广东省生态环境监测中心、中国科学院大气物理研究所等多家单位，于 2025 年 1 月正式获得广东省环境科学学会立项，启动团体标准《环境空气气态污染物和温室气体垂直分布测量技术 管路引流法》的制定工作，旨在规范该方法的技术要求、安装运维、质量控制与数据处理，提升我国大气环境立体监测网络的标准化水平和技术竞争力。

1.2 起草单位

暨南大学，广东省生态环境监测中心，中国科学院大气物理研究所，中国科学院合肥物质科学研究院，无锡中科光电技术有限公司，北京英格海德分析技术有限公司，广东省广州生态环境监测中心站，深圳市国家气候观象台，南京信息工程大学、香港科技大学、澳门科技大学。

1.3 主要起草人

邵敏，李小兵，袁斌，黄山，林玉君，陈多宏，桂华侨，王迎红，裴成磊，郑隆武，陈文泰，赵智，梁宝玲，钟庄敏，柯钊跃，黄颖彦，叶梦茜，张春生，刘爱明，王鸣、顾达萨、游燕，宋鑫。

2 标准制定的必要性与意义

2.1 相关环保工作及环保标准的需要

近年来，随着我国工业化和城市化进程的不断加快，许多地区的环境空气污染问题日益严重。其中，获取大气边界层内空气污染物和温室气体的垂直分布信息对于理解大气化学过程、评估空气质量、探索二次污染成因机制、监管与核验温室气体排放总量、以及制定有效的碳污协同控制策略具有重要意义。然而，传统的监测技术与方法主要局限于地面，难以全面反映污染物和温室气体在垂直方向上的分布情况。因此，开展对环境空气污染物和温室气体垂直分布的研究，不仅有助于深入理解大气污染物的传输和转化机制，科学监测温室气体排放来源和排放核算，而且对于改善空气质量、保护公共健康具有重要的现实意义。

“环境空气污染物和温室气体垂直分布测量技术 管路引流法”标准制定将规范和指导该领域的监测工作。该标准的制修订目的在于提高大气环境垂直监测的准确性和效率，为环境管理和决策提供科学依据。通过对管路引流方法的研究和应用，结合在线测量仪器的使用，可以实现对气态污染物和温室气体垂直分布的连续监测，这对于及时发现污染源、评估污染影响范围、制定针对性的控制措施具有必要性。此外，该标准的制定也将填补国内外在该领域的空白，提升我国环境监测技术的国际竞争力。

2.2 现行方法实施情况和存在问题

尽管国内外已有一定的研究和实践基础，但现有的指导文件和技术仍存在一些不足之处。首先，现有技术往往侧重于单一污染物的测量，缺乏对多种气态污染物和温室气体的协同监测能力。其次，现有方法在连续监测和实时数据分析方面表现不足，难以满足快速响应和动态管理的需求。此外，现有技术的普及程度有限，特别是在发展中国家和偏远地区，高昂的成本和技术要求限制了其广泛应用。针对这些问题，本标准在制定过程中将力求提出更加高效、经济且易于推广的解决方案。

2.3 国内外相关技术/研究现状

在国际层面，关于环境空气污染物和温室气体垂直分布的测量技术已有若

干标准和实践。例如，欧洲联盟和美国环保署均发布了相关的技术指导文件，这些文件详细描述了使用探空气球、无人机和固定监测站等多种方法来测量大气污染物的垂直分布。这些技术在精度、成本和操作便利性方面各有特点，但普遍存在着设备复杂、维护成本高昂和技术门槛较高的问题。尽管如此，这些国际实践能够为本标准的制定提供了宝贵的经验和参考。

国内在环境空气污染物和温室气体垂直分布测量技术方面的研究起步较晚，但近年来已经在学术界取得了显著的研究进展。国内科研机构和企业也较早关注和引进国际先进技术，同时结合我国实际情况进行了应用创新和改进。目前，国内已有一些地区开始尝试使用管路引流法结合在线测量仪器进行气态污染物和温室气态的垂直分布监测，并取得了初步的应用成果。然而，由于缺乏统一的标准和规范，这些技术和方法的应用仍然面临着一致性和互认性的挑战。

3 主要工作过程

2023年9月，收到《关于征集2023年度第二批广东省环境科学学会标准项目的通知》(粤环学(2023)22号)，征集相关标准。牵头单位暨南大学组织开展《环境空气 污染物和温室气体垂直分布测量技术 管路引流法》立项前期研究工作。

2023年12月7日，暨南大学和广东省环境科学学会共同成立《环境空气污染物和温室气体垂直分布测量技术 管路引流法》编制工作组，召开编制工作启动会，明确主要技术规范内容，部署任务分工。

2024年1-4月，查阅国内外相关技术规范和文献资料，结合我国污染物和温室气体垂直观测现状，确定技术规范编制技术路线，形成技术规范文本框架。

2024年5-9月，组织协调参与单位，基于前期调研和编制组工作基础进一步开展相关技术测试，掌握污染物和温室气体垂直观测管路引流方法中的关键参数，梳理不同化学组分测量的关键影响因素和测量数据保质控流程。

2024年10-11月，编写初稿并开展编制组内部讨论，在广东省环境科学学会的统一领导下，进一步修改文本细节，并补充相关实验，开展已有数据分析提炼工作，形成标准草稿，并以多种方式征求业内专家意见，对文本进行修改。

2024年12月24日，编制完成《环境空气污染物和温室气体垂直分布测量技术 管路引流法》标准立项申报材料，提交广东省环境科学学会申请立项。

2025年1月16日，广东省环境科学学会在广州市组织召开《土壤和沉积物 溴代二噁英类的测定 同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法》等5项团体标准立项论证会。专家组听取了标准起草单位的汇报，审阅了相关资料，经认真讨论，给出了同意立项的结论，同时提出修改意见和建议，主要有：1.进一步优化标准的适用范围；2.进一步明确标准条款具体内容，完善标准可操作性。

2025年2月10日，广东省环境科学学会印发了《关于《土壤和沉积物 溴代二噁英类的测定 同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法》等5项团体标准立项的通知》(粤环学函(2025)1号)，《环境空气 污染物和温室气体垂直分布测量技术 管路引流法》正式立项。

2025年2-11月，编制牵头单位组织参与单位进行多次讨论，就标准的适用范围、可操作性等关键问题进行研讨，根据前期数据结论成果及专家意见，形成标准征求意见稿和编制说明。

4 标准制订的原则和依据

4.1 标准制订的基本原则

a) 科学性与先进性原则：以国内外最新研究成果和实践经验为基础，技术指标充分参考相关国家标准、行业标准，并经过实验验证；

b) 适用性与可操作性原则：紧密结合我国当前监测技术水平和业务化运行实际，规定明确、具体，便于实施和检查；

c) 协调统一性原则：与 GB 3095、HJ 654、HJ 759、HJ 818、QX/T 125、T/GDAEPI 29 等现行有效的国家、行业及地方标准相衔接，引用其成熟的技术要求；

d) 规范编制原则：严格按照 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》的要求起草标准文本。

4.2 标准制订的依据

4.2.1 标准编制依据的法规政策文件

《中华人民共和国环境保护法》第二十八条明确地方各级人民政府应当根据环境保护目标和治理任务，采取有效措施，改善环境质量。未达到国家环境质量标准的重点区域、流域的有关地方人民政府，应当制定限期达标规划，并

采取措施按期达标。

《中华人民共和国大气污染防治法（主席令第三十一号）》第三条规定县级以上人民政府应当将大气污染防治工作纳入国民经济和社会发展规划，加大对大气污染防治的财政投入。地方各级人民政府应当对本行政区域的大气环境质量负责，制定规划，采取措施，控制或者逐步削减大气污染物的排放量，使大气环境质量达到规定标准并逐步改善。

2020年9月22日，国家主席习近平在第七十五届联合国大会上宣布，中国力争2030年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和目标。

2024年3月4日生态环境部印发《关于加快建立现代化生态环境监测体系的实施意见》的通知，环监测〔2024〕17号，为深入贯彻党的二十大精神和全国生态环境保护大会部署，加快建立现代化生态环境监测体系，全力支撑深入打好污染防治攻坚战和美丽中国建设。健全天空地海一体化监测网络，完善监测体系，加速新技术标准化进程。

4.2.2 与现有标准的关系

污染物和温室气体监测标准主要以相关监测技术和质控标准为主，涉及管路引流法垂直观测的国家标准和行业标准还尚未发布。“环境空气 污染物和温室气体垂直分布测量技术 管路引流法”标准制定将规范和指导大气监测领域中使用长管路引流方法开展气态污染组分和温室气体的业务化垂直监测工作。该标准的制修订目的在于提高大气环境中气态污染物和温室气体垂直监测的准确性和效率，为应对气候变化、环境管理和决策提供科学依据。通过对管路引流方法的研究和应用，结合在线测量仪器的使用，可以实现对气态污染物和温室气体垂直分布的连续监测，这对于及时发现污染源、评估污染影响范围、制定针对性的控制措施具有必要性。此外，该标准的制定也将填补国内外在该领域的空白，提升我国环境监测技术的国际影响力和竞争力。

4.2.3 科学研究与技术报告

编制组依托单位在深圳石岩气象塔、中国科学院大气物理研究所铁塔等地开展的长期观测实验，以及针对长管路传输性能的系统评估研究成果，为本标准中关键技术参数的确定提供了直接实验数据支撑。

5 标准内容简介（主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述）

5.1 文件内容框架

本文件包括：适用范围，规范性引用文件，术语和定义，原理，系统组成，技术要求，安装要求，运行维护，质量控制与数据处理，附录 A（资料性附录）、附录 B（规范性附录），附录 C（规范性附录），以及附录 D（资料性附录）。

5.2 适用范围

本标准适用于环境大气监测领域中对气态污染物和温室气体的垂直分布进行测量的技术要求和方法。具体应用场景包括但不限于城市空气质量监测、工业排放监控、大气科学研究以及气候变化研究中对温室气体的观测。该标准旨在为相关机构提供一个统一的技术规范，以确保测量数据的准确性和可比性，从而支持环境政策的制定和执行。

本标准的目标用户群体主要包括环境监测站、环境保护部门、气象研究机构、高等院校以及从事环境科学研究的非政府组织。此外，工业企业在进行自我监测和环境影响评估时，亦可参照本标准执行。标准的预期使用者应具备基本的环境保护知识和相关的监测技能，以便正确理解和应用标准中规定的技术和方法。

5.3 规范性引用文件

GB 3095 环境空气质量标准；

HJ 654 环境空气气态污染物（SO₂、NO₂、O₃、CO）连续自动监测系统技术要求及检测方法；

HJ 759 环境空气 65 种挥发性有机物的测定罐采样/气相色谱-质谱法；

HJ 818 环境空气气态污染物（SO₂、NO₂、O₃、CO）连续自动监测系统运行和质控技术规范；

QX/T 125 温室气体本地观测术语；

T/GDAEPI 29 环境空气 117 种挥发性有机物的测定罐采样/气相色谱-氢火焰离子化/质谱检测联用法。

5.4 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

GB 3095、HJ 654、QX/T 125 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

5.4.1 管路引流法 tubing drainage method

通过敷设在不同高度的引流管路，依靠动力将环境空气从采样口抽取并输送至分析仪器，以实现多点位、不同高度气态污染物和温室气体浓度垂直测量的方法。其中，分析仪器可以设置在地面，也可以设置在某一高度平台上。无论分析仪器设置在地面还是其他高度，仅设置一套分析仪器完成不同高度环境样气测量^[1, 2]。如图 1 所示，以深圳石岩气象塔为例，在 5 m、40 m、70 m、120 m、220 m、335 m 等 6 个高度上敷设引流管路，将各高度上的环境样气引流至地面分析仪器开展气态污染物和温室气体的垂直测量^[3, 4]。

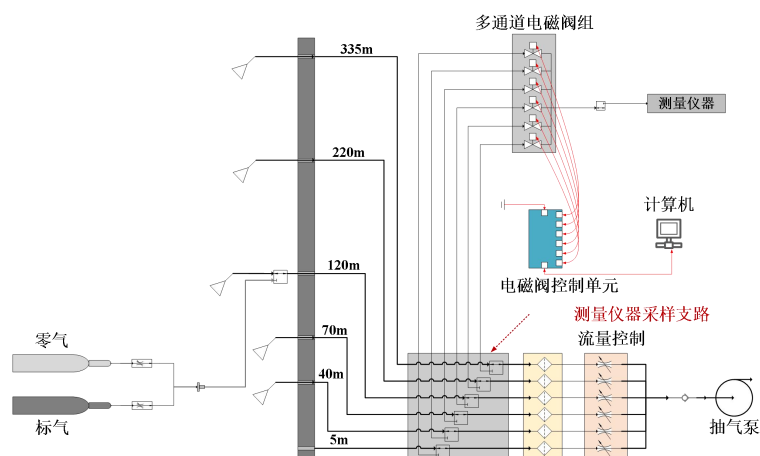


图 1 基于深圳石岩气象塔的管路引流垂直观测系统^[3]

5.4.2 引流管路 drainage tubing

用于从不同高度采样点向分析仪器输送样气的管路。图 2 所示为外径为 1/2 英寸的 Teflon PFA 管路。



图 2 Teflon PFA 管路

5.4.3 管路驻留时间 tubing residence time

给定引流管路中的采样流量时，环境样气通过引流管路所需要的平均时间。使用公式（1）计算管路驻留时间。图 3 给出了采样流量为 13 SLPM 时，使用 PTR-ToF-MS 测量异戊二烯通过外径为 1/2 英寸的 400 m 长度 Teflon PFA 管路时的驻留时间。根据公式（1）计算获得理论管路驻留时间为 131 s，实际测得管路驻留时间为 155 s，导致两者差异的主要因是实际测量时间还包含了样气通过仪器内部管路和 400 m 管路与分析仪器之间连接管路的时间。

$$t = \frac{L\pi(d/2)^2}{Q} \quad (1)$$

式中：

t ——管路驻留时间，s；

L ——引流管路长度，cm；

d ——引流管路内径，cm；

Q ——采样流量， $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ 。

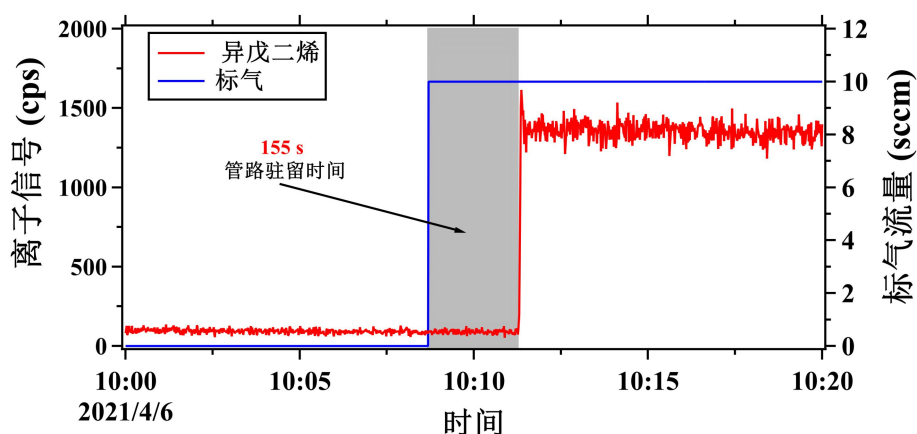


图 3 采样流量为 13 SLPM 时，400 m 长度 1/2 英寸 Teflon PFA 管路驻留时间^[3]

5.4.4 管路延迟时间 tubing delay time

在恒定采样流量下，从引流管路入口处气体浓度发生阶跃变化，到其出口处浓度达到稳定值的 90%（上升延迟）或降至初始值的 10%（下降延迟）所需的时间^[5, 6]。

给定采样流量条件下，首先在引流管路的入口处通入不含目标组分的零气，确保在采样管路入口处测量的目标组分浓度为零或者小于仪器检测限值。随后，在引流管路入口处通入含有目标物种固定浓度的混合样气，在采样管路出口处

持续测量混合样气中的目标组分浓度 C_I 。待测量的目标组分浓度稳定后，在引流管路入口处切换通入零气，随后计算引流管路出口中目标组分浓度从 C_I 降低至 $C_I \times 10\%$ 时所需要的时间。如图 1 所示，当采样流量为 13 SLPM，1/2 英寸 Teflon PFA 管路长度为 400 m 时，在引流管路出口处测到 VOCs 组分的下降延迟曲线。为了计算方便，以组分浓度开始下降时刻（ $t=0$ ）为基准进行归一化处理，然后采用双指数曲线进行拟合，拟合曲线数值等于 0.1 时即为相应组分的管路延迟时间。

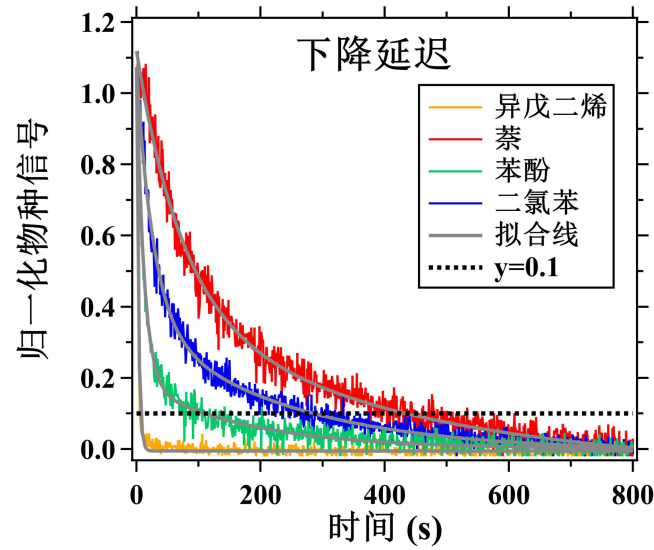


图 4 采样流量为 13 SLPM 时，部分 VOCs 组分通过 400 m 长度 1/2 英寸 Teflon PFA 管路的延迟时间^[3]

5.4.5 管路压降 tubing pressure drop

给采样流量条件下，样气通过引流管路后压力的下降幅度。使用公式（2）和公式（3）计算管路压降。

$$P_d = \frac{(P_i - P_o) \times 100\%}{P_i} \quad (2)$$

$$P_o = \sqrt{P_i^2 - \frac{Q}{256\pi d^4 \eta L P_i}} \quad (3)$$

式中：

P_d ——管路压降，%；

P_i ——引流管路入口处压力，hPa；

P_o ——引流管路出口处压力，hPa；

d ——引流管路内径, cm;
 L ——引流管路长度, cm;
 Q ——采样流量, $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$;
 η ——引流管路中样气的粘性系数, Pa s^{-1} 。

5.4.6 浓度偏差 concentration discrepancy

目标组分通过引流管路后, 其浓度与入口处相比的绝对变化百分比。使用公式 (4) 计算浓度偏差。

$$U_c = \frac{|C_o - C_i| \times 100\%}{C_i} \quad (4)$$

式中:

U_c ——测量偏差, %;
 C_o ——引流管路入口处浓度;
 C_i ——引流管路出口处浓度。

5.5 原理

基于管路引流的垂直观测技术原理主要是通过依托平台 (比如气象铁塔) 的不同高度上敷设惰性材料制成的引流管路, 在地面或某一高度上使用抽气泵同时抽取各高度的环境样气。在地面或某一高度上设置一套分析仪器和多通道切换装置, 按照预设的采样时间和采样顺序, 将不同高度引流管路中的样气依次切换并导入同一套高精度气体分析仪器中进行测量, 从而获得目标气态污染物或温室气体浓度的垂直分布数据。

5.6 系统组成

测量系统主要由垂直采样单元、样气输送单元、系统校标单元、气体分析单元、数据采集与控制单元、以及辅助单元等 6 部分组成, 如图 5 所示。

(a) 垂直采样单元主要包括各高度上的引流管路、颗粒物过滤、及相应固定设施, 其主要功能是将各高度上经过去除颗粒物后的环境样气引至分析仪器; 颗粒物过滤器主要是将环境样气中的颗粒物进行去除, 避免污染引流管路和分析仪器; 相应固定设施主要包括固定采样口、颗粒物过滤器和引流管路的各种器材, 比如扎带、抱箍、支撑杆等。

(b) 样气输送单元主要包括抽气泵、单向阀、及流量控制与测量装置,

其主要功能是为测量系统采样提供动力，保证各高度引流管路采样流量持续、稳定；抽气泵动力必须充足，且工作稳定，能够同时支撑各高度引流管路持续采样；单向阀能够保证系统采样气流只能单向流动，避免因断电或抽气泵损坏等意外情况发生时出现泵体气流回流，污染引流管路；流量控制装置主要是控制每条引流管路的采样流量能够符合预期；流量测量装置能够实时测量每条引流管路的采样流量，以便观察管路是否出现破损漏气、堵塞等意外情况。

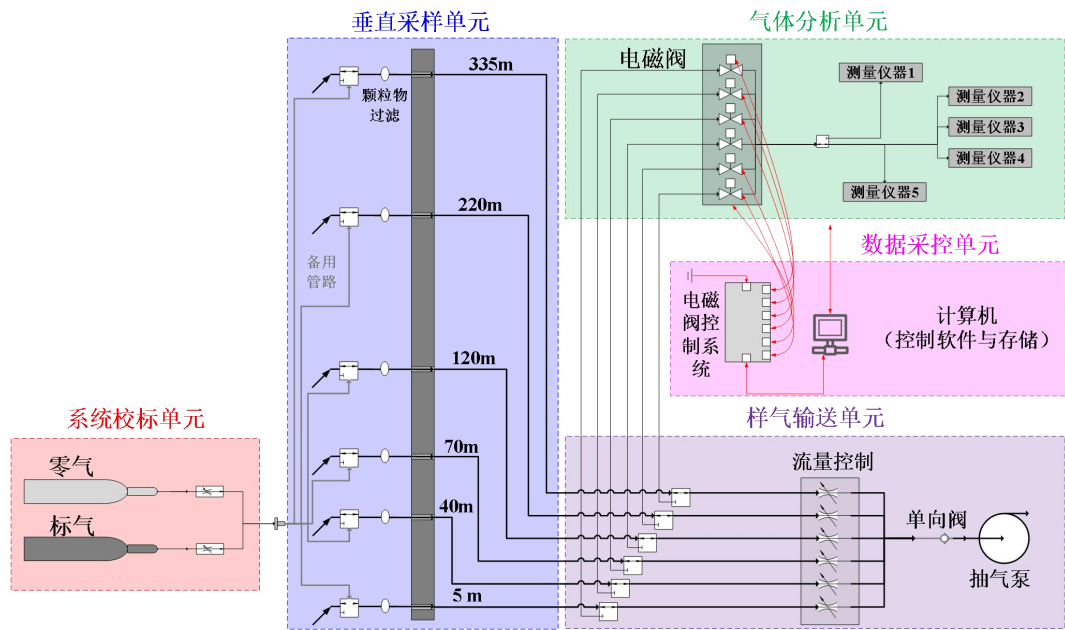


图 5 基于管路引流的垂直测量系统示例

(c) 系统校标单元主要包括标气/零气提供装置及其引入端口，其主要功能是将零气或已知浓度的标气与零气混合气输送至指定高度的引流管路采样口位置。

(d) 气体分析单元主要包括多通道电磁阀切换系统和分析仪器；其主要功能是实现不同高度环境样气的循环测量，最终获取气态污染物和温室气体浓度的垂直分布数据。其中多通道切换装置（如多通道电磁阀）设置多个进气端口和一起出气端口，进气端口与不同高度引流管路连接，出气端口与分析仪器连接。如果是在线分析仪器，必须具备高灵敏度和高时间分辨率，以便不同高度切换间测量数据能够快速稳定。

(e) 数据采集与控制单元由一系列控制软件和存储硬件设施组成，其主要功能是控制多通道切换装置的采样时序和切换逻辑，以及采集和记录引流管

路的流量、压力、及组分浓度等信息。

(f) 辅助单元主要包括电源、避光与温控设施等；其中避光设施主要是针对室外引流管路包裹的不透光材料，避免阳光直射导致内部组分化学反应，造成不可预料的测量结果偏差；温控设施主要是对引流管路进行保温或伴热，防止样气或水汽在引流管路内冷凝，污染采样管路或者造成分析仪器损坏。

5.7 技术要求

5.7.1 测量仪器要求

气态污染物和温室气体的分析仪器性能指标应满足 HJ 654 和 QX/T 125 等相关标准的规定。对于在线测量仪器，需要具备高灵敏度和高时间分辨率要求，保证不同高度引流管路切换后仪器测量数据能够快速、平稳。对于离线采样分析，比如使用苏玛罐通过不同高度引流管路采集样气，然后使用 GC-MS/FID 分析 VOCs 组分浓度，宜在高度切换后 3-5 min 后开始采样。

5.7.2 管路系统适用性要求

管路系统适用性要求主要是针对目标组分测量的适用性，具体体现在两个方面：首先，目标测量组分的大气寿命应该显著长于样气在引流管路中的驻留时间与延迟时间。如果目标组分的大气寿命短于样气在引流管路中的驻留时间，在样气通过管路过程中，必然伴随着大量损耗，造成测量结果偏低。此外，如果组分大气寿命短于管路延迟时间，样气通过管路后的组分浓度在稳定过程中发生显著损耗，同样会导致测量结果偏低。

其次，系统能够有效测量的组分还需要按照附录 B 或附录 C 的方法进行评估。对于 O₃、NO_x、CO、SO₂ 等气态污染物，其通过引流管路后的浓度偏差应小于 10%。对于 CH₄、CO₂、N₂O 等温室气体，其通过引流管路后的浓度偏差应小于 1%。如图 6 所示，按照附录 B 的方法，针对 NO、NO₂、O₃、CO₂ 等气态污染物，使用 400 m 长度 1/2 英寸 Teflon PFA 管路，在采样流量为 13 SLPM 时进行了浓度偏差评估。结果表明，气态污染物的浓度偏差均小于 10%，温室气体的浓度偏差均小于 1%。对于 VOCs 测量，可以参考 HJ 759 标准文件中关于平行样品的测量偏差要求，其通过引流管路后的浓度偏差应小于 25%。表 1

为使用附录 C 方法，使用 400 m 长度 1/2 英寸 Teflon PFA 管路，在采样流量为 13 SLPM 左右时，测量气态污染物、温室气体和部分 VOCs 组分的浓度偏差。由表 1 可知，测量的气态污染物浓度偏差均小于 10%，温室气体浓度偏差均小于 1%。对于 VOCs 而言，使用苏玛罐采样的分析结果表明，分析出浓度的 95 个组分中，有 90 种组分的浓度偏差小于 25%。

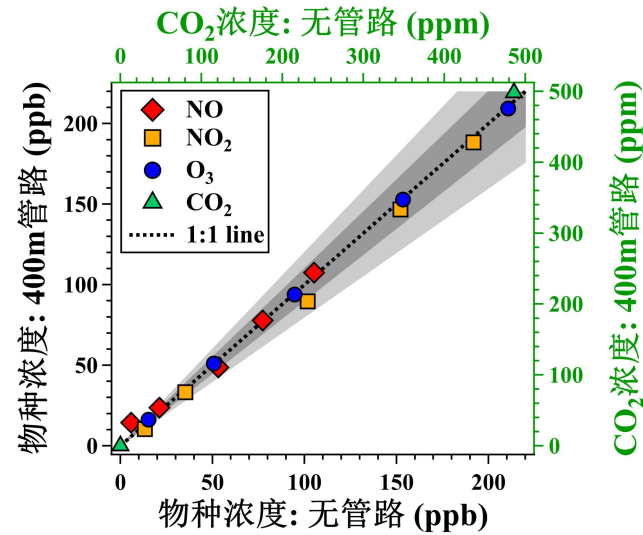


图 6 采样流量为 13 SLPM 时，使用 400 m 长度 1/2 英寸 Teflon PFA 管路的入口
处和出口处测量的部分气态污染物和温室气体浓度对比^[3]

表 1 使用附录 C 方法评估气态污染物和温室气体测量的浓度偏差

| 类别 | 测量仪器 | 组分名称 | CAS | 浓度偏差（%） |
|-------|---------------|--------------|------------|---------|
| 气态污染物 | Thermo 49i | 臭氧 | 10028-15-6 | 8.5 |
| | Thermo 42i-HL | 氮氧化物 | - | 7.0 |
| | Picarro G2401 | 一氧化碳 | 630-08-0 | 0.2 |
| 温室气体 | Picarro G2401 | 甲烷 | 74-82-8 | 0.04 |
| | | 二氧化碳 | 124-38-9 | 0.2 |
| VOCs | GC-MS/FID | 三氟甲烷 | 75-46-7 | - |
| | | 乙烯 | 74-85-1 | 2.3 |
| | | 五氟乙烷 | 354-33-6 | - |
| | | 二氟甲烷 | 75-10-5 | 3.6 |
| | | 乙烷 | 74-84-0 | 0.1 |
| | | 1,1,1-三氟乙烷 | 71-55-6 | - |
| | | 五氟氯乙烷 | 355-87-3 | - |
| | | 间/对二甲苯 | 1330-20-7 | 4.1 |
| | | 1,1,1,2-四氟乙烷 | 811-97-2 | 3.8 |

| | | | | |
|--|--|---------------------|-----------|------|
| | | 1,1-二氟乙烷 | 75-37-6 | - |
| | | 二氟氯甲烷 | 75-45-6 | 40.5 |
| | | 二氟二氯甲烷 | 75-71-8 | 4.6 |
| | | 一氯甲烷 | 74-87-3 | 6.2 |
| | | 1-氯-1,1-二氟乙烷 | 1631-32-5 | 20.1 |
| | | 1,1,2,2-四氟-1,2-二氯乙烷 | 76-14-2 | - |
| | | 异丁烷 | 75-28-5 | 6.9 |
| | | 氯乙烯 | 75-01-4 | 0.8 |
| | | 1-丁烯 | 106-98-9 | 11.1 |
| | | 1,3-丁二烯 | 106-99-0 | 1.6 |
| | | 正丁烷 | 106-97-8 | 12.1 |
| | | 反-2-丁烯 | 624-64-6 | 7.3 |
| | | 一溴甲烷 | 74-83-9 | 3.9 |
| | | 顺-2-丁烯 | 590-18-1 | 5.1 |
| | | 氯乙烷 | 75-00-3 | - |
| | | 丙烯醛 | 107-02-8 | 2.2 |
| | | 丙酮 | 67-64-1 | 3.7 |
| | | 异戊烷 | 78-78-4 | 0.8 |
| | | 异丙醇 | 67-63-0 | 45.5 |
| | | 一氟三氯甲烷 | 75-72-9 | 7.9 |
| | | 1,1-二氯-1-氟乙烷 | 75-38-7 | 21.4 |
| | | 正戊烷 | 109-66-0 | 1.3 |
| | | 2-甲基-1,3-丁二烯 | 78-79-5 | 48.1 |
| | | 1-戊烯 | 109-67-1 | 6.6 |
| | | 反-2-戊烯 | 646-04-8 | 4.7 |
| | | 顺-2-戊烯 | 627-20-3 | 2.5 |
| | | 1,1-二氯乙烯 | 75-35-4 | - |
| | | 二氯甲烷 | 75-09-2 | 1.6 |
| | | 1,1,2-三氯-1,2,2-三氯乙烷 | 76-13-1 | 10.0 |
| | | 2,2-二甲基丁烷 | 463-82-1 | 6.3 |
| | | 二硫化碳 | 75-15-0 | 8.1 |
| | | 反-1,2-二氯乙烯 | 156-60-5 | 5.5 |
| | | 乙酸乙烯酯 | 108-05-4 | 8.1 |
| | | 甲基叔丁基醚 | 1634-04-4 | 3.9 |
| | | 1,1-二氯乙烷 | 75-34-3 | - |
| | | 2-甲基戊烷 | 107-83-5 | 0.03 |
| | | 2,3-二甲基丁烷 | 79-29-8 | 1.1 |
| | | 环戊烷 | 287-92-3 | 8.3 |
| | | 2-丁酮 | 78-93-3 | 16.4 |

| | | | | |
|--|--|---------------|------------|------|
| | | 3-甲基戊烷 | 96-14-0 | 1.7 |
| | | 1-己烯 | 592-41-6 | 37.5 |
| | | 乙酸乙酯 | 141-78-6 | 4.4 |
| | | 顺-1,2-二氯乙烯 | 156-59-2 | - |
| | | 正己烷 | 110-54-3 | 2.2 |
| | | 三氯甲烷 | 67-66-3 | 4.0 |
| | | 四氢呋喃 | 109-99-9 | 2.2 |
| | | 2,4-二甲基戊烷 | 108-62-3 | 3.2 |
| | | 1,2-二氯乙烷 | 107-06-2 | 13.7 |
| | | 甲基环戊烷 | 96-37-7 | 2.7 |
| | | 1,1,1-三氯乙烷 | 71-55-6 | - |
| | | 苯 | 71-43-2 | 0.03 |
| | | 2-甲基己烷 | 591-76-4 | 4.1 |
| | | 四氯化碳 | 56-23-5 | 7.2 |
| | | 环己烷 | 110-82-7 | 2.4 |
| | | 2,3-二甲基戊烷 | 565-79-5 | 10.0 |
| | | 3-甲基己烷 | 589-34-4 | 1.7 |
| | | 1,2-二氯丙烷 | 78-87-5 | 1.8 |
| | | 甲基丙烯酸甲酯 | 80-62-6 | 2.0 |
| | | 1,4-二噁烷 | 123-91-1 | 4.5 |
| | | 2,2,4-三甲基戊烷 | 540-84-1 | - |
| | | 一溴二氯甲烷 | 75-27-4 | - |
| | | 三氯乙烯 | 79-01-6 | 4.6 |
| | | 庚烷 | 142-82-5 | 3.3 |
| | | 4-甲基-2-戊酮 | 108-10-1 | 7.1 |
| | | 顺-1,3-二氯-1-丙烯 | 10061-01-5 | 3.3 |
| | | 甲基环己烷 | 108-87-2 | 2.1 |
| | | 反-1,3-二氯-1-丙烯 | 10061-02-6 | 0.2 |
| | | 1,1,2-三氯乙烷 | 79-00-5 | 8.7 |
| | | 2,3,4-三甲基戊烷 | 565-75-3 | 10.4 |
| | | 2-甲基庚烷 | 592-70-1 | - |
| | | 2-己酮 | 589-38-8 | 3.4 |
| | | 甲苯 | 108-88-3 | 1.1 |
| | | 3-甲基庚烷 | 589-67-3 | 2.8 |
| | | 二溴一氯甲烷 | 75-27-4 | - |
| | | 正辛烷 | 111-65-9 | 2.5 |
| | | 1,2-二溴乙烷 | 106-93-4 | 0.6 |
| | | 四氯乙烯 | 127-18-4 | 1.1 |
| | | 氯苯 | 108-90-7 | 5.0 |

| | | | |
|--|--------------|------------|------|
| | 乙苯 | 100-41-4 | 1.5 |
| | 三溴甲烷 | 75-25-2 | 5.8 |
| | 苯乙烯 | 100-42-5 | 0.8 |
| | 正壬烷 | 111-84-2 | 2.9 |
| | 1,1,2,2-四氯乙烷 | 79-34-5 | 0.2 |
| | 邻二甲苯 | 95-47-6 | 0.4 |
| | 异丙苯 | 98-82-8 | 2.1 |
| | 正丙苯 | 103-65-1 | 1.5 |
| | 间-乙基甲苯 | 620-14-4 | - |
| | 对-乙基甲苯 | 106-42-3 | - |
| | 1,3,5-三甲基苯 | 108-67-8 | 2.8 |
| | 邻-乙基甲苯 | 100-41-4 | 0.3 |
| | 正癸烷 | 124-18-5 | 1.5 |
| | 1,2,4-三甲基苯 | 95-63-6 | - |
| | 氯代甲苯 | 26263-91-6 | 9.2 |
| | 1,3-二氯苯 | 541-73-1 | 36.7 |
| | 1,4-二氯苯 | 106-46-7 | 55.8 |
| | 1,2,3-三甲基苯 | 526-73-8 | 7.7 |
| | 1,2-二氯苯 | 95-50-1 | 15.5 |
| | 间二乙基苯 | 103-65-1 | - |
| | 对二乙基苯 | 103-65-1 | 8.1 |
| | 正十一烷 | 112-02-7 | 1.1 |
| | 正十二烷 | 112-40-3 | 3.3 |
| | 1,2,4-三氯苯 | 120-82-1 | 12.8 |
| | 萘 | 91-20-3 | 0.7 |
| | 六氯丁二烯 | 87-68-3 | 0.2 |
| | 丙烷 | 74-98-6 | 2.0 |
| | 丙烯 | 115-07-1 | 5.9 |

5.7.3 引流管路选择

在引流管路的管径选择方面，目前环境大气测量领域普遍使用的管径尺寸规格包括 1/8 英寸、1/4 英寸、3/8 英寸和 1/2 英寸。由图 5 可知，引流管路的采样流速越大，管路压降也随之快速增加。此外，管径越小，管路压降随流速增加也越大，如图 7 所示。因此，在基于管路引流的垂直观测系统中，为了增加采样流速以降低壁损失和降低管路压降，并节约系统建设成本，宜选 3/8 或 1/2 英寸规格的引流管路。

在引流管路的材料选择方面，必须使用针对目标测量组分的化学惰性材料。

目前，针对温室气体测量，普遍使用铝塑复合管。针对气态污染物，根据已有研究文献评估结果^[5]，宜选用聚四氟乙烯（PTFE）、全氟烷氧基烷烃（PFA）或氟化乙烯丙烯共聚物（FEP）等材质的管路，以尽量减少气态污染物通过管路时的壁损耗。此外，在这三种聚合物材质管路中，PFA 材质管路性能最优。同时测量气态污染物和温室气体时，宜使用 PTFE、PFA 和 FEP 等材质的管路。

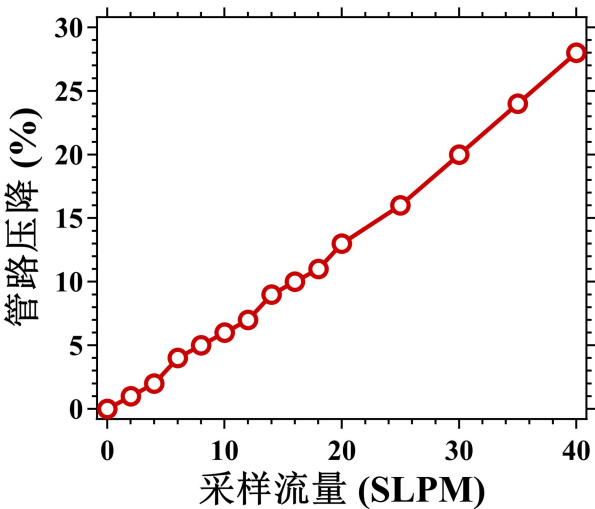


图 7 400 m 长度 1/2 英寸 Teflon PFA 管路压降随采样流量变化关系^[3]

在管路长度选择方面，可以根据具体采样高度，以及测量仪器与引流管路布设点之间的水平距离总和确定。此外，为了便于后期测量仪器位置移动、或者管路损坏修复等情况，可以预留不少于 10% 的冗余长度。

5.7.4 采样流量与泵

引流管路中的采样流量越大，目标测量组分的管路驻留时间和延迟时间越小，由壁效应或化学反应引起的损耗也减小，这对于测量 VOCs、O₃ 等活性组分尤为重要。图 8 展示了各类 VOCs 组分通过 400 m 长度 1/2 英寸 Teflon PFA 管路的延迟时间随采样流量增加的变化关系。VOCs 组分的饱和蒸气压越小，其通过采样管路后的延迟时间也越大。当采样流量小于 10 SLPM 时，VOCs 组分的管路延迟时间随采样流量增加而快速下降。当采样流量大于 10 SLPM 时，VOCs 组分的管路延迟时间随采样流量增加而下降速度减缓。因此，针对单条引流管路的采样流量，一般建议不低于 10 SLPM。此外，如图 7 所示，采样流量增加导致管路压降升高，给仪器的正常采样与分析造成负担，可能导致目标组分测量浓度偏差。因此，采样流量在满足分析仪器能够正常工作的基础上，

宜越大越好，以最大程度降低目标组分测量的浓度偏差。

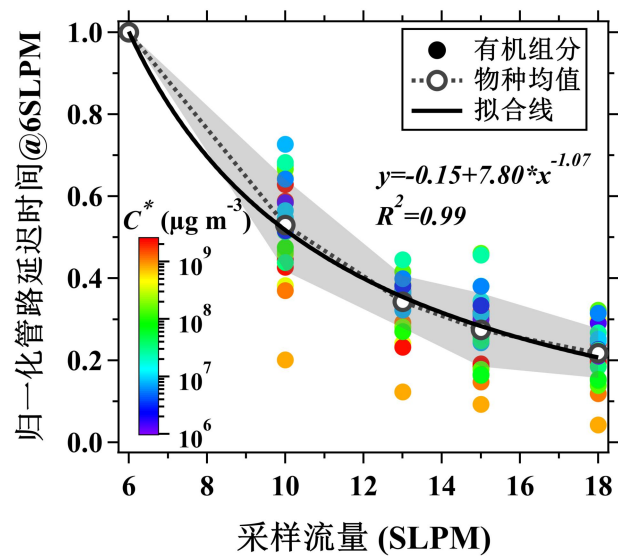


图 8 VOCs 组分通过 400 m 长度 1/2 英寸 Teflon PFA 管路的延迟时间随采样流量变化^[3]

对于抽气泵的选择，需要从平稳性和动力性两方面进行考量。在平稳性方面，需要保障管路采样流量平稳，不宜出现采样流量较大波动。因此，应选用运行稳定、脉动小的抽气泵（如旋片式真空泵）。在动力性方面，因为用于垂直测量的引流管路普遍较长，且需要同步对多条引流管路进行抽气，因此要求泵的抽力应能克服所有引流管路、过滤器和阀件所导致的总压降，并保证各条引流管路均能够获得预期采样流量。

5.7.5 多通道切换装置

基于管路引流的垂直测量系统普遍在多个高度设置引流管路，但只使用一套分析仪器开展测量，因此需要借助多通道切换装置完成不同高度间的切换。对于多通道切换装置，在设计和选用时需要遵循两点原则：首先，为了避免样气中目标组分在通过其内部时发生损耗，其内部气路需要使用 PTFE、PFA 等材料进行惰性化处理；其次，为了尽量缩短样气在切换装置内部管路中的停留时间，电磁阀内部体积需要尽可能小，以缩短通道切换后仪器响应的稳定时间。切换稳定时间需要通过实验确定，并在数据数据分析时予以剔除。

以暨南大学在深圳石岩气象塔建设的管路引流系统观测数据为例（图 1 和图 9），由于对 6 个高度的引流管路同步、持续抽气，气态污染组分与管路内壁

间的作用过程（如吸收/释放、吸附/解析等）基本上处于实时动态平衡状态。多通道切换装置在切换不同高度引流管路后，目标组分（以甲苯为例）浓度能够在 20 s 内达到稳定状态。因此，在处理数据时，为了尽量保证数据质量，可以删除多通道切换装置切换高度后 30 s 以内的测量数据。

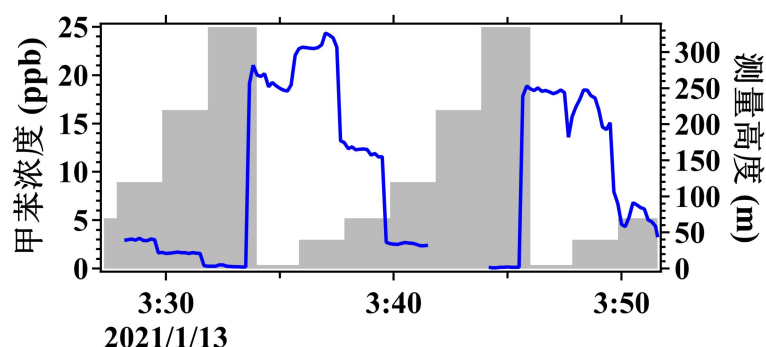


图 9 基于深圳石岩气象塔 6 个高度引流管路测量的甲苯浓度时间序列

5.8 安装要求

5.8.1 采样口安装

引流管路采样口安装时需要着重考虑两方面因素：首先，为了避免降水、灰尘等物质进入管路，采样口需要朝下安装，如图 10 所示；其次，由于许多活性组分在金属、水泥等介质表面会发生化学反应损耗，因此采样口需要距离任何支撑物表面不小于 50 cm。此外，由于采样口朝下安装已经能够在很大程度上避免降水进入管路内部，因此不宜再额外安装防雨装置，避免造成额外的组分吸附损耗或释放干扰物质，导致测量结果出现不确定性偏差。



图 10 采样口安装位置示例

5.8.2 引流管路敷设

引流管路在敷设时候需要重点考虑三方面因素：首先，引流管路普遍具有一定透光性，而大部分活性组分在光照条件下能够发生化学反应损耗。因此，为了尽量降低样气中组分通过管路过程中的化学损耗，需要将引流管路置于建筑物内部、套管中，或使用不透光材料包裹，确保管路避光；其次，引流管路在安装时候应尽量远离热源和冷源。管路温度过高会导致内部化学损耗加剧或者管路内部释放干扰物质，而温度过低会导致管路内部出现组分或水汽冷凝，增加测量结果不确定性。因此，当管路安装不可避免经过温度变化剧烈区域时，需要对管路进行保温或伴热，以防止样气或水汽在管内冷凝；最后，引流管路在敷设过程中需要保持平顺，在需要弯曲安装地方，应尽量避免向下低洼弯曲安装，防止冷凝水在弯曲部位积聚，导致分析仪器损坏或出现严重测量偏差。

5.8.3 过滤装置

为了尽量保持引流管路内部清洁，需要在采样口安装颗粒物过滤装置，避免颗粒物累积造成污染管路。颗粒物过滤装置的安装与维护需要着重考虑两方面因素：首先，颗粒物过滤装置不能对目标组分测量造成干扰，因此宜选用对目标组分吸附性低的材质滤膜，比如 PTFE 滤膜；其次，由于颗粒物在过滤装置中累积会导致抽气泵工作负荷，导致管路压降增大，影响分析仪器工作性能，需要定期对过滤装置进行维护或更换。根据 400 m 长度管路测试结果（图 11），当管路压降增加超过初始值 20% 时，部分分析仪器会出现内部压力过低报警。因此，在观测过程中需要定期检查并记录各高度引流管路压降，当管路压降影响分析仪器正常测量工作时，需要对颗粒物过滤器进行清洁或更换。

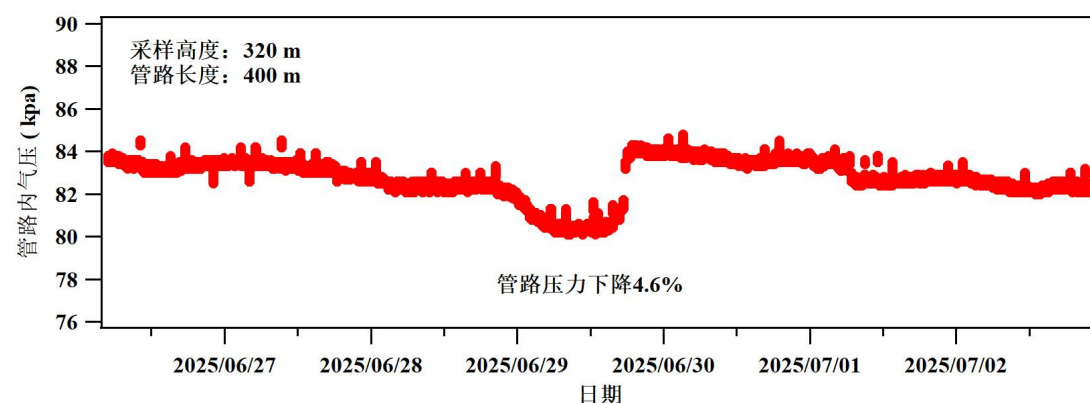


图 11 观测过程中 320 m 高度（400 m 长度管路）管路内部气压变化

5.8.4 备用/标定管路

在构建基于管路引流的垂直观测系统时，宜在每个高度配置一主一备两条引流管路，两条管路在颗粒物过滤装置上游端连接，如图 12 所示。安装主管路与备用管路主要基于以下两个因素考虑：首先，当主管路出现问题时（比如漏气、污染等），可以快速启用备用管路，避免观测中断；其次，备用管路可以充当主管路性能评估的输气管路（图 12）。将标气与零气的混合气体从备用管路输送至主管路采样口，就可以定期评估主管路的传输效率。为了避免备用管路污染，在非使用期，备用管路地面端口需要封闭。

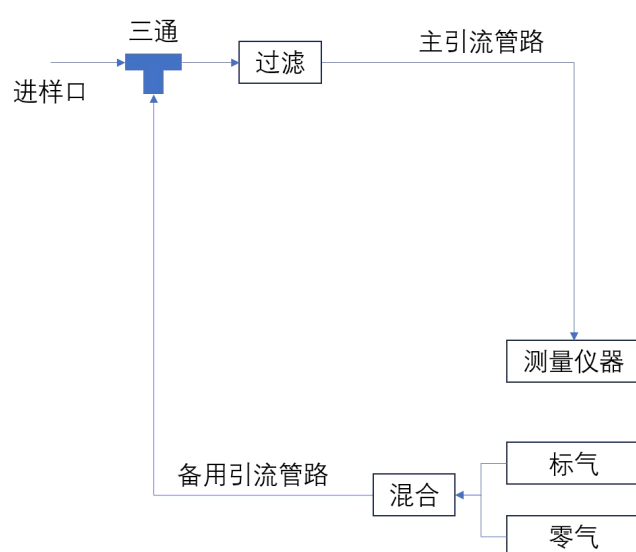


图 12 主管路与备用管路安装示例

5.8.5 单向阀安装

由于抽气泵对所有观测高度上的引流管路同步抽气，总抽气流量较大，当抽气泵发生意外或正常停止工作的瞬间可能会造成其内部高温气流回流，导致引流管路污染。因此，在引流管路接入抽气泵之前需要安装一个单向阀（图 5），保证采样气流只能够单向流通。

5.8.6 多通道切换装置安装

为了避免抽气泵停止工作时的样气回流影响，多通道切换装置进气口与引流管路之间的连接口应设置在单向阀上游。

5.9 运行维护

5.9.1 日常运行记录

在观测期间，需要对各个高度引流管路的采样流量、管路压降、电磁阀切换状态、分析仪器读数及环境温湿度等信息进行详细、连续记录，便于后续数据的处理与分析。

5.9.2 定期维护

在观测期间，需要按照分析仪器要求对其进行维护与保养，并根据管路压降和采样流量等信息对颗粒物过滤器进行定期维护。此外，如果测量过程中的一些操作可能会对引流管路造成干扰或污染时，比如更换颗粒物过滤器滤膜或者断开、拼接管路等，需要使用零气对管路进行吹扫，或者使用标气对管路性能进行定量评估，并详细记录相关操作的具体内容和时间，以便后续处理与分析时将该时段数据剔除。

5.10 质量控制与数据处理

5.10.1 引流管路系统性能定期评估

为保障观测数据质量，观测期间至少每月开展一次引流管路的传输效率评估。具体的评估方法为：通过备用管路或专用端口，在主管路采样口处通入已知浓度的标气，对比仪器测量值与标气参考值，计算目标组分的浓度偏差。评估结果符合标准中 6.2.2 的要求后方可继续开展观测，否则需要进行系统排查。此外，在每次更换主要引流管路部件或长期停用后重新启运前，均需要对引流管路的进行评估。

5.10.2 空白测试

为保障观测数据质量，为了清楚了解系统本身对目标组分测量的本底值和潜在交叉污染，需要每周至少开展一次全系统空白测试。测试操作方法可以通过备用管路或专用端口，在主管路采样口处通入零气，针对各个高度运行一个完整的测量周期，记录各条引流管路中目标组分的测量空白值，后续数据处理时可以将其扣除。

5.10.3 数据处理

为确保观测数据质量，观测数据处理需要遵守以下三方面要求：

首先，由于管路内部作用影响，当目标组分的管路延迟时间较大时，分析仪器在短时间内的测量数据并不能够达到稳定（图 13）。因此，在分析数据时，

该组分有效数据的平均时间尺度应大于其在所有高度引流管路中的最长延迟时间，以确保测量浓度为该高度层的混合均匀样气。

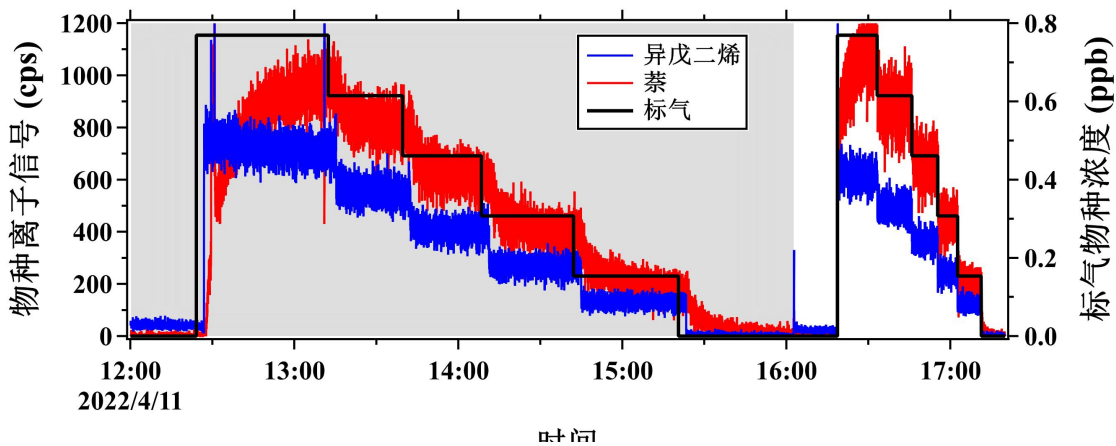


图 13 不同 VOCs 组分（异戊二烯与萘）信号梯度变化时间序列^[3]

其次，在开展数据分析前，需要根据运行日志对原始数据进行处理。在多通道切换装置切换前后，各高度引流管路中的样气需要通过一定长度的辅助管路进入分析仪器，并且分析仪器对于组分浓度变化也需要一定的响应时间（图 9）。因此，当多通道切换装置切换时，需要剔除切换前后的观测数据，具体数据删除时长需根据分析仪器的灵敏度和运行稳定性确定。此外，在进行系统维护时，比如更换滤膜、进行管路评估或开展其他可能干扰测量的操作期间及之后一段时间内的数据也需要进行剔除，具体时长需根据操作内容、系统重新稳定时间、以及运行日志等相关信息确定。

最后，系统在运行过程中，其背景值或目标组分传输效率可能会发生变化。因此，需要根据定期评估结果，对观测数据进行系统性校正，并且校正应在确认该偏差具有统计显著性与时间稳定性的基础上进行。

6 重大意见分歧的处理依据和结果

无

7 与国内外同类标准水平的对比情况

7.1 国外同类标准水平情况

在国际层面，关于环境空气污染物和温室气体垂直分布的测量技术已有若干标准和实践。例如，欧洲联盟和美国环保署均发布了相关的技术指导文件，

这些文件详细描述了使用探空气球、无人机和固定监测站等多种方法来测量大气污染物的垂直分布。这些技术在精度、成本和操作便利性方面各有特点，但普遍存在着设备复杂、维护成本高昂和技术门槛较高的问题。尽管如此，这些国际实践能够为本标准的制定提供了宝贵的经验和参考。

7.2 国内同类标准水平情况

国内在环境空气污染物和温室气体垂直分布测量技术方面的研究起步较晚，但近年来已经在学术界取得了显著的研究进展。国内科研机构和企业也较早关注和引进国际先进技术，同时结合我国实际情况进行了应用创新和改进。目前，国内已有一些地区开始尝试使用管路引流法结合在线测量仪器进行气态污染物和温室气态的垂直分布监测，并取得了初步的应用成果。然而，由于缺乏统一的标准和规范，这些技术和方法的应用仍然面临着一致性和互认性的挑战。

尽管国内外已有一定的研究和实践基础，但现有的指导文件和技术仍存在一些不足之处。首先，现有技术往往侧重于单一污染物的测量，缺乏对多种气态污染物和温室气体的协同监测能力。其次，现有方法在连续监测和实时数据分析方面表现不足，难以满足快速响应和动态管理的需求。此外，现有技术的普及程度有限，特别是在发展中国家和偏远地区，高昂的成本和技术要求限制了其广泛应用。针对这些问题，本标准在制定过程中将力求提出更加高效、经济且易于推广的解决方案。

8 涉及专利的有关说明

本文件第 4 条原理与第 5 条系统组成可能涉及到相关的专利使用。本文件的发布机构对于该专利的真实性、有效性和范围无任何立场。该专利持有人已向本文件的发布机构承诺，他愿意同任何申请人在合理且无歧视的条款和条件下，就专利授权许可进行谈判。该专利持有人的声明已在本文件的发布机构备案。相关信息可以通过以下联系方式获得：

专利持有人姓名：李小兵，袁斌，邵敏，杨红龙，刘智杰。

地址：广东省广州市番禺区兴业大道东 855 号，暨南大学南校区环境与气候学院祈福楼 B1 栋 4084 室。

请注意除上述专利外，本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布

机构不承担识别专利的责任。

证书号第 12458024 号





实用新型专利证书

实用新型名称：一种基于高塔的挥发性有机物在线垂直观测系统

发 明 人：李小兵;袁斌;邵敏;杨红龙;刘智杰

专 利 号：ZL 2020 2 1026533.4

专利申请日：2020 年 06 月 05 日

专 利 权 人：暨南大学

地 址：510632 广东省广州市天河区黄埔大道西 601 号

授权公告日：2021 年 02 月 05 日 授权公告号：CN 212483450 U

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法经过初步审查，决定授予专利权，颁发实用新型专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况，专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

局长
申长雨





第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页

8 参考文献

- [1] LI X-B, YUAN B, HUANGFU Y, et al. Vertical changes in volatile organic compounds (VOCs) and impacts on photochemical ozone formation [J]. *Atmos Chem Phys*, 2025, 25(4): 2459-72.
- [2] SONG X, LI X-B, YUAN B, et al. Elucidating key factors in regulating budgets of ozone and its precursors in atmospheric boundary layer [J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2024, 7(1): 262.
- [3] LI X-B, ZHANG C, LIU A, et al. Assessment of long tubing in measuring atmospheric trace gases: applications on tall towers [J]. *Environmental Science: Atmospheres*, 2023, 3(3): 506-20.
- [4] 李小兵, 袁斌, 邵敏, et al. 一种基于高塔的挥发性有机物在线垂直观测系统, CN111562304A [P/OL]. 2021-.
- [5] DEMING B L, PAGONIS D, LIU X, et al. Measurements of delays of gas-phase compounds in a wide variety of tubing materials due to gas-wall interactions [J]. *Atmos Meas Tech*, 2019, 12(6): 3453-61.
- [6] LIU X, DEMING B, PAGONIS D, et al. Effects of gas-wall interactions on measurements of semivolatile compounds and small polar molecules [J]. *Atmos Meas Tech*, 2019, 12(6): 3137-49.