

环境空气中苯系物、甲烷及总烃的快速分析方法研究



邓文清, 邓凡锋, 张婷, 徐冰艳, 熊华竞, 潘义*

中国测试技术研究院化学研究所, 成都 610021

【摘要】 无组织排放的苯系物和总烃对生态环境及人类健康具有不可逆转的危害性, 实现苯系物和总烃的快速准确分析一直是环境空气监测的研究热点。基于双 FID 检测器的多维气相色谱仪, 开发出用于总烃、甲烷、苯、甲苯、乙苯、对二甲苯、间二甲苯、邻二甲苯以及苯乙烯的快速分析方法。结果表明, 一次进样可在 12 min 内完成目标组分的准确快速分析, 组分在测量浓度范围内呈现良好的线性和重复性。该方法具有优异的方法检出限, 准确性在 -7.7% ~ 0.2% 之间。方法可在不同时空场景下对分析仪器进行在线校准, 在环境空气现场走航监测方面具有潜在应用价值。

【关键词】 计量学; 气相色谱; 苯系物; 甲烷; 总烃; 快速分析

【中图分类号】 TB99

【文献标识码】 A

【文章编号】 2096-9015(2024)07-0003-07

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2024.0037

【引用本文】 邓文清, 邓凡锋, 张婷, 等. 环境空气中苯系物、甲烷及总烃的快速分析方法研究 [J]. 计量科学与技术, 2024, 68(7): 3-9.

Rapid Analysis Method for Benzene Series, Methane, and Total Hydrocarbons in Ambient Air

DENG Wenqing, DENG Fanfeng, ZHANG Ting, XU Bingyan, XIONG Huajing, PAN Yi

Institute of Chemistry, National Institute of Measurement and Testing Technology, Chengdu 610021, China

Corresponding author: PAN Yi, Email: 9026427@qq.com

【Abstract】 Fugitive emissions of benzene series compounds and total hydrocarbons pose irreversible harm to the ecological environment and human health. The rapid and accurate analysis of these compounds has long been a research focus in ambient air monitoring. A quick method for the analysis of total hydrocarbons, methane, benzene, toluene, ethylbenzene, p-xylene, m-xylene, o-xylene, and styrene was developed using a multi-dimensional gas chromatograph with dual FID detectors. The results show that the target components can be accurately analyzed within 12 minutes with a single injection, and the components exhibit good linearity and repeatability across the measurement range. This method demonstrates excellent detection limits, with accuracy ranging from -7.7% to 0.2% . The method can be applied for on-line calibration of analytical instruments in various spatiotemporal scenarios, showing potential application value in field mobile monitoring of ambient air.

【Key words】 metrology, gas chromatography, benzene series, methane, total hydrocarbons, rapid analysis

0 引言

大气中的苯系物、烃类化合物的含量与环境空气质量以及人体健康密切相关。苯系物作为环境空气中的常见污染物, 具有强烈的刺激性和毒性, 对人体中枢神经系统和造血组织有严重的损害^[1-2]。长期处于一定浓度的苯系物环境中, 会引发如白血

病、骨髓增生异常综合征等严重疾病^[3-5]。2020年, 苯系物被世界卫生组织确定为致癌物质^[6]。非甲烷总烃是从总烃中扣除甲烷以外的其它有机化合物的总和^[7]。环境空气中的非甲烷烃类化合物与臭氧和雾霾的生成具有紧密联系, 而臭氧与雾霾会对人体皮肤系统和呼吸系统造成损害^[8-11]。为保证健康可持续发展的生态环境, 对空气中苯系物、甲

收稿日期: 2024-02-01; 修回日期: 2024-03-14

基金项目: 国家标准物质资源共享平台项目 (APT2302-6)。

作者简介: 邓文清 (1992-), 中国测试技术研究院化学研究所工程师, 研究方向: 分析检测、方法开发, 邮箱: 906968433@qq.com; 通讯作者: 潘义 (1982-), 中国测试技术研究院化学研究所研究员, 研究方向: 分析方法开发、新装置研发、标准物质和标准研制工作, 邮箱: 9026427@qq.com。

烷与总烃的含量进行快速检测非常重要。

目前,有大量学者针对苯系物及烃类的准确测量开发了相应的分析方法,其中最常见的是气相色谱法及气相色谱-质谱联用技术^[12-15],此外,光电质谱法^[16-17]、光谱法^[18]等也有相关报道。基于苯系物和烃类物质对环境空气和人类健康带来的巨大风险,国家生态环境部将其列为大气环境监测的重要参数,并分别针对总烃与苯系物的测定制定了相应分析方法标准^[19-22]。其中 HJ 583-2010 与 HJ 584-2010 提出用气相色谱法分析环境空气中苯系物,两个分析方法标准分别采用固体吸附/热脱附和活性炭吸附/二硫化碳解析两种不同的富集与脱附方法对苯系物进行分析测定。HJ 604-2017 基于气相色谱法提出了环境空气中总烃、甲烷和非甲烷总烃的测定方法。上述工作需要采用两种分析仪器,或采用一种分析仪器不同的方法分析,均无法实现一次进样即可完成苯系物和烃类化合物所有组分的同时分析。在日常分析检测中,通常需要两台常规分析仪或需要一台分析仪先分析其中一种参数之后,再进行另外的参数分析,这不仅加大了实验耗材成本,而且分析效率低,不利于待测样品的高效快速测定。因此,建立一次进样同时快速准确检测烃类和苯系物的分析方法具有重要意义。

本文基于多维气相色谱仪,采用高精度在线稀释仪,开发了一次进样同时分析总烃、甲烷和苯系物(苯、甲苯、乙苯、对二甲苯、间二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯)的快速分析方法,并对分析方法的检出限、重复性、准确性等性能进行了系统评估。研究表明,本文建立的方法分析总烃、甲烷和苯系物,在对应浓度范围内线性及重复性良好,相关系数 $R^2 > 0.995$ 。其中总烃、甲烷、苯、甲苯、乙苯、对二甲苯、间二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯的方法检出限分别为 0.24 $\mu\text{mol/mol}$, 0.0058 $\mu\text{mol/mol}$, 0.0082 $\mu\text{mol/mol}$, 0.010 $\mu\text{mol/mol}$, 0.012 $\mu\text{mol/mol}$, 0.017 $\mu\text{mol/mol}$, 0.016 $\mu\text{mol/mol}$, 0.013 $\mu\text{mol/mol}$ 和 0.016 $\mu\text{mol/mol}$, 测量浓度点准确性在 -7.7% ~ 0.2% 之间。该方法具有分析速度快、准确度高、操作简单等特点。

1 实验部分

1.1 实验仪器与器材

气体标准物质:氮气中甲烷、丙烷、苯、甲苯、乙苯、对二甲苯、间二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯分析用气体标准物质,均由四川中测标物科技有限公司采用称量法^[23]制备,组分浓度的相对不确定度为 5% ($k=2$),有效期 12 个月。各组分详细浓度值见表 1。

表 1 气体标准物质各组分浓度值

Tab.1 Concentration values of each component in the gas reference material

瓶号	HM6071									
组分	甲烷	丙烷	苯	甲苯	乙苯	苯乙烯	对二甲苯	间二甲苯	邻二甲苯	氮气
浓度($\mu\text{mol/mol}$)	19.6	20.0	20.1	20.3	20.2	20.1	19.9	20.3	20.0	余量

气相色谱仪:岛津企业管理(中国)有限公司,型号 Nexgen GC CAGC-100,配备两个 FID 检测器、一个十通阀、两个六通阀与四根色谱柱,气体流路均经过惰性化处理。

在线气体稀释仪:成都思创睿智科技有限公司,型号 Trace Gas Dilution-SP。

1.2 分析流程及分析条件

Nexgen GC CAGC-100 气相色谱仪同时分析苯系物、甲烷和总烃的流程如图 1 所示。Nexgen GC CAGC-100 由两个 FID 检测器、四根色谱柱与三个进样阀组成。样品气进入进样口后分为 3 路流量,其中 261(十通阀)与预柱 P-N(2 m*1.0 mm)+MS-13X(2 m*1.0 mm)用于甲烷分析,260(六通阀)与熔融石英毛细柱(THCs; 2 m*0.3 mm)用于总烃分析,

259(六通阀)与 BTX(2 m*1.0 mm)用于苯系物分析。整个分析过程所用载气均为氮气。具体分析条件参见表 2。

2 实验结果

2.1 分析图谱

设置稀释仪入口浓度为气体标准物质浓度,标准物质稀释用稀释气为氮气。气体标准物质通过在线气体仪稀释不同倍数后,依次进样到分析系统,对各待测组分进行定性与定量分析。在 FID 1 检测器上,总烃与甲烷在色谱图上先后出峰,由于在相同稀释倍数下,总烃的信号强度远高于甲烷的信号强度,在同一张色谱图上无法清晰展现甲烷的信号峰及浓度变化趋势,因此将 FID 1 上的色谱图分别拆分为

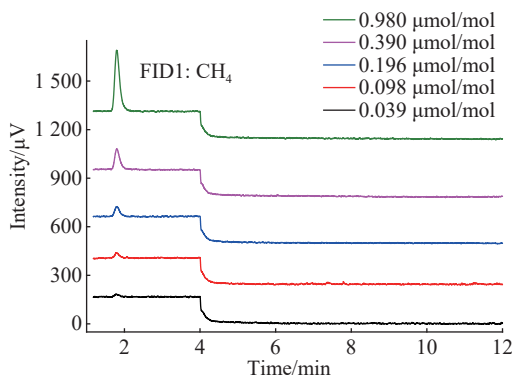


图3 不同浓度甲烷对应的色谱图
Fig.3 Chromatograms corresponding to different concentrations of methane

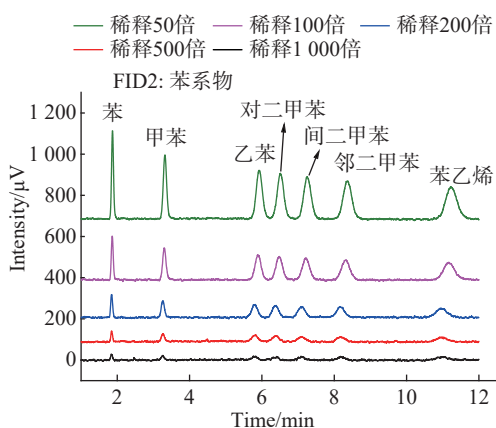


图4 不同浓度苯系物对应的色谱图
Fig.4 Chromatograms corresponding to different concentrations of benzene series compounds

2.2 实验数据讨论

2.2.1 标准曲线建立

将气体标准物质通过高精度在线气体稀释仪进行逐级稀释,得到的目标浓度气体进入气相色谱分析系统进行测定,每个浓度的目标稀释气重复测定

7次,以7次测定平均值作为最终实验结果。将各组分在不同浓度下的峰信号进行面积积分处理,可拟合得到各组分对应的线性关系,如表3所示。从线性拟合结果可知,该分析方法在分析浓度范围内具有良好的线性关系,各组分相关系数 R^2 均大于 0.995。

2.2.2 检出限

本工作对仪器检出限和方法检出限分别进行了考察。

仪器检出限:基于线性分析最低浓度点对应的峰高,按照式(1)计算各组分的仪器检出限(其中 N_0 代表噪声, x 代表最低浓度值, H 代表最低浓度值的峰高)^[24],详细数据见表4。从表4的计算结果可以发现,各组分的仪器检出限均较低,处于 nmol/mol 水平,表明该多维气相色谱仪性能灵敏,在环境空气中总烃、甲烷以及苯系物的低含量分析方面表现出优异的检出能力。

$$IDL = 2N_0 \times \frac{x}{H} \quad (1)$$

方法检出限:基于线性方程最低浓度点对应的峰面积平均值,将其带入拟合线性方程中反算得到相应的分析浓度值,根据式(2)计算可得到对应各组分的方法检出限(其中, t 代表自由度为 $n-1$,置信度为 99%时 t 分布,此处 $t(6,0.99)=3.143$; S 为 7次平行测定的标准偏差)^[25],经过计算可得出各组分的方法检出限分别为 0.24 μmol/mol, 0.0058 μmol/mol, 0.0082 μmol/mol, 0.010 μmol/mol, 0.012 μmol/mol, 0.017 μmol/mol, 0.016 μmol/mol, 0.013 μmol/mol 和 0.016 μmol/mol,能满足环境空气中苯系物及烃类的定量分析要求,详见表5。

$$MDL = t_{(n-1,0.99)} \times S \quad (2)$$

表3 各待测组分的测定范围及线性方程

Tab.3 Measurement range and linear equations for each target component

组分	浓度范围(μmol/mol)	线性方程	相关系数 R^2
总烃(以碳计)	1.15 ~ 22.93	$y = 4056x - 1908.4$	0.9963
甲烷	0.0392 ~ 0.98	$y = 3627.0x - 124.10$	0.9958
苯	0.0201 ~ 0.402	$y = 4051.3x + 38.855$	0.9995
甲苯	0.0203 ~ 0.406	$y = 4922.1x + 52.748$	0.9999
乙苯	0.0202 ~ 0.404	$y = 6781.4x + 68.932$	0.9999
对二甲苯	0.0199 ~ 0.398	$y = 6829.2x + 79.239$	0.9997
间二甲苯	0.0203 ~ 0.406	$y = 6996.1x + 86.893$	0.9996
邻二甲苯	0.0200 ~ 0.400	$y = 7754.6x + 50.473$	0.9992
苯乙烯	0.0201 ~ 0.402	$y = 8319.2x + 116.95$	0.9988

表 4 各组分的仪器检出限

Tab.4 Instrumental detection limits for each component

组分	峰高								N_0	IDL ($\mu\text{mol/mol}$)
	1	2	3	4	5	6	7	H		
总烃	2820	2619	2481	2411	2381	2329	2351	2484.57	14.96	0.014
甲烷	19	21	18	20	19	23	21	20.14	14.96	0.058
苯	28	32	30	30	31	30	29	30.00	9.16	0.012
甲苯	21	23	23	24	23	22	23	22.70	9.16	0.016
乙苯	19	22	19	21	21	17	20	19.90	9.16	0.019
对二甲苯	20	18	16	20	19	18	22	19.00	9.16	0.019
间二甲苯	21	19	18	20	19	23	18	19.71	9.16	0.019
邻二甲苯	17	20	18	23	21	18	20	19.57	9.16	0.019
苯乙烯	19	17	23	19	20	19	17	19.14	9.16	0.019

表 5 各待测组分的方法检出限

Tab.5 Method detection limits for each target component

组分	计算得到的浓度值($\mu\text{mol/mol}$)								MDL ($\mu\text{mol/mol}$)
	1	2	3	4	5	6	7	S	
总烃	1.79	1.73	1.66	1.62	1.61	1.59	1.60	0.077	0.24
甲烷	0.055	0.058	0.054	0.053	0.054	0.058	0.056	0.0019	0.0058
苯	0.019	0.025	0.024	0.023	0.024	0.019	0.020	0.0026	0.0082
甲苯	0.014	0.022	0.019	0.021	0.019	0.018	0.024	0.0033	0.010
乙苯	0.022	0.025	0.019	0.026	0.020	0.015	0.022	0.0038	0.012
对二甲苯	0.025	0.020	0.015	0.028	0.016	0.017	0.027	0.0055	0.017
间二甲苯	0.031	0.030	0.020	0.025	0.021	0.017	0.021	0.0051	0.016
邻二甲苯	0.026	0.018	0.023	0.025	0.030	0.027	0.021	0.0040	0.013
苯乙烯	0.024	0.027	0.020	0.031	0.018	0.024	0.017	0.0051	0.016

2.2.3 重复性

将各待测组分分析浓度点进行 7 次重复测定, 计算 7 次测定数据的相对标准偏差可得各个浓度点的重复性。计算结果表明该方法在线性方程最低浓度点的重复性在 6.5%~18.5% 之间, 最低点以外的其它浓度点的重复性几乎都保持在 0.4%~3.5% 以内, 并随着浓度的增加, 重复性越好, 这主要是由于浓度越低, 测得的信号受到基线噪声、环境变化等随机影响就越大, 其重复性相对较差。具体试验数据见表 6。

2.2.4 准确性

选择线性范围的中间浓度点对分析系统进行准确性考察。将各组分理论浓度对应峰面积带入相应校准曲线中计算可得到计算浓度, 利用计算浓度与理论浓度的差异评估该测量系统的准确性。计算结果表明, 如表 7 所示, 各组分的计算值与理论值的相

对偏差在-7.7%~0.2% 之间, 表明本文基于多维气相色谱法所建立的校准曲线准确可靠, 能满足总烃、甲烷及苯系物快速、准确检测的需求。

表 6 各待测组分的浓度重复性

Tab.6 Repeatability of concentration measurements for each target component

组分	浓度($\mu\text{mol/mol}$)	峰面积	RSD ₇
总烃	1.15	4815	6.5%
	2.29	8271	1.5%
	5.73	19542	0.6%
	11.5	41754	0.9%
	22.9	92751	0.4%
苯	0.0201	127	8.3%
	0.0402	207	3.2%
	0.100	447	1.6%
	0.201	830	2.1%
	0.402	1678	1.7%

续表 6

组分	浓度(μmol/mol)	峰面积	RSD ₇
甲苯	0.0203	149	11.0%
	0.0406	260	2.9%
	0.102	551	2.0%
	0.203	1048	1.5%
	0.406	2053	1.6%
乙苯	0.0202	212	12.2%
	0.0404	349	2.7%
	0.101	745	1.7%
	0.202	1430	1.9%
	0.404	2814	0.9%
对二甲苯	0.0199	220	18.5%
	0.0398	371	3.5%
	0.0995	745	1.9%
	0.199	1415	2.8%
	0.398	2810	1.7%
间二甲苯	0.0203	250	14.4%
	0.0406	378	2.9%
	0.102	781	1.7%
	0.203	1479	1.2%
	0.406	2944	0.5%
邻二甲苯	0.0200	237	13.2%
	0.0400	378	2.9%
	0.100	776	1.5%
	0.200	1586	2.5%
	0.400	3169	1.2%
苯乙烯	0.0201	308	13.8%
	0.0402	492	3.0%
	0.100	910	1.6%
	0.201	1735	1.3%
	0.402	3494	1.0%
甲烷	0.0392	77	8.8%
	0.0980	287	2.9%
	0.196	567	3.2%
	0.390	1140	2.4%
	0.980	3486	1.2%

表 7 方法准确性评估
Tab.7 Method accuracy evaluation

组分	理论浓度(μmol/mol)	峰面积	计算浓度(μmol/mol)	偏差(%)
总烃	5.732	19541.70	5.290	-7.7%
甲烷	0.1960	567.14	0.1906	-2.8%
苯	0.1005	446.86	0.1007	0.2%
甲苯	0.1015	550.71	0.1012	-0.3%
乙苯	0.1010	745.00	0.0997	-1.3%
对二甲苯	0.0995	744.57	0.0974	-2.1%
间二甲苯	0.1015	780.71	0.0992	-2.3%
邻二甲苯	0.1000	775.57	0.0935	-6.5%
苯乙烯	0.1005	909.71	0.0953	-5.2%

3 结论

本文基于配备双 FID 检测器的多维气相色谱仪,开发了用于总烃、甲烷、苯、甲苯、乙苯、对二甲苯、间二甲苯、邻二甲苯以及苯乙烯的快速分析方法。该方法通过一次进样在 12 分钟内能同时完成总烃与多种苯系物的快速分析。在测定浓度范围内,方法具有良好的线性关系、重复性、方法检出限与准确性,能满足环境空气中总烃、甲烷及苯系物的分析要求。由于本工作基于标准物质对方法性能进行研究,未评估氧气对总烃测量结果的影响,建议在 进行实际空气样品测量时,对总烃的测定方法重新进行评估。

参考文献

- [1] 丽敏,徐洪伟,于秀彦,等. 罐采样/预浓缩-GC/MS 法测定环境空气中 7 种苯系物的不确定度评定 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 62-68.
- [2] 陈浩,杨加定. 便携式 GC-MS 测定环境空气中低浓度苯系物 [J]. 福建分析测试, 2017, 26(3): 36.
- [3] 贾如升. 我国室内苯及苯系污染物危害与防制现状 [J]. 环境与职业医学, 2010, 27(1): 56-57.
- [4] 李朝晖,赵文. 苯气体检测报警器校准问题浅析 [J]. 计量科学与技术, 2020, 10: 19-21.
- [5] Li Z, Guo Z, Chen X, *et al.* Development of a high-throughput device for liquid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry for the determination of benzene derivatives in environmental water[J]. Analytical Methods, 2021, 13 (25): 2865-2870.
- [6] 屈春花,马艳,李新科. 气相色谱法同时测定污染源废气中 11 种苯系物 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(1): 135-139.
- [7] 刘经天. 测定固定污染源废气中非甲烷总烃的技术研究 [J]. 山西化工, 2023, 43(8): 51-53.
- [8] Yi H, Huang Y, Tang X, *et al.* Characteristics of non-methane hydrocarbons and benzene series emission from commonly cooking oil fumes[J]. Atmospheric Environment, 2019, 200: 208-220.
- [9] Madhoun WA AI, Ramli NA, Yahaya AS, *et al.* Temporal distribution of non-methane hydrocarbon (NMHC) in a developing equatorial island, Air Quality[J]. Atmosphere & Health, 2016, 9 : 303-310.
- [10] Jia C, Mao X, Huang T, *et al.* Non-methane hydrocarbons (NMHCs) and their contribution to ozone formation potential in a petrochemical industrialized city, Northwest China[J]. Atmospheric Research, 2016, 169 : 225-236.
- [11] Kumar R P, Kashyap P, Kumar R, *et al.* Cancer and non-cancer health risk assessment associated with exposure to non-methane hydrocarbons among roadside vendors in Delhi, India, Human and Ecological Risk Assessment[J]. An International Journal, 2020, 26 (5): 1285-1299.

- [12] 林武, 廖德兵, 杨洋, 等. 罐采样-GC/MS 法测定环境空气中挥发性有机物 [J]. *四川环境*, 2014, 33(5): 93-99.
- [13] 葛璇, 陈燕朋, 魏征, 等. 罐采样-加压进样-气相色谱法测定环境空气中非甲烷总烃研究 [J]. *中国环境监测*, 2023, 39(2): 177-186.
- [14] 郑玉凤, 郝露露. 气相色谱法测定环境空气中的总烃、甲烷和非甲烷总烃 [J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40(8): 10-12.
- [15] 普学伟, 豆刚. 气相色谱附双柱双氢火焰离子化检测器法同时测定环境空气中的总烃和非甲烷总烃 [J]. *理化检验 (化学分册)*, 2020, 56(8): 911-915.
- [16] 刘聪, 李杨, 蒋吉春, 等. 集束毛细管柱富集便携式光电离飞行时间质谱检测大气中苯系物 [J]. *质谱学报*, 2023, 44(2): 233-241.
- [17] 李函蔚, 蒋吉春, 杨明, 等. 离子漏斗聚焦光电质谱仪的研制及其在大气苯系物在线监测中的应用 [J]. *分析化学*, 2022, 50(10): 1456-1464.
- [18] 周泽义. FTIR 光谱法定量分析微量气体苯系物 [J]. *分析仪器*, 2010(3): 42-46.
- [19] 环境保护部. 环境空气 苯系物的测定 固体吸附热脱附-气相色谱法: HJ 583-2010[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [20] 环境保护部. 环境空气 苯系物的测定 活性炭吸附二硫化碳解吸-气相色谱法: HJ 584-2010[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [21] 环境保护部. 环境空气 总烃、甲烷和非甲烷总烃的测定 直接进样-气相色谱法: HJ 604-2017[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- [22] 国家环境保护局. 大气污染物综合排放标准: GB/T 16297-1996[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [23] Pan Y, Zhang Y J, Li Z A, *et al.* A selective cataluminescence sensor with a homemade gaseous sample introduction system for accurate and sensitive determination of H₂S using catalytic g-C₃N₄@Fe [J]. *Microchemical Journal*, 2020, 156: 104833.
- [24] 邓凡锋, 邓文清, 张婷, 等. 在线稀释-傅里叶变换红外光谱法用于质子交换膜燃料电池汽车用氢燃料中微量杂质组分的快速分析 [J]. *分析实验室*, 2023, 42(3): 312-318.
- [25] 生态环境部. 环境监测分析方法标准制订技术导则: HJ 168-2020[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.

本文编辑: 江迪

(上接第 71 页)

- [35] Cumber P S. Evaluating View Factors Using a Hybrid Monte-Carlo Method[J]. *J Heat Transf-Trans ASME*, 2022, 144(12): 11.
- [36] Singh J, Kumaraswamidhas L A, Vijay A, *et al.* Estimation of uncertainty of effective area of a pneumatic pressure reference standard using Monte Carlo method[J]. *Indian J Pure Appl Phys*, 2016, 54(12): 755-764.
- [37] 郭有光, 黄大伦, 方永源, 等. NIM-II 型可移激光绝对重力仪 [J]. *地球物理学报*, 1988, 31(1): 73-81, 121.
- [38] 国家质量监督检验检疫总局. 砝码: JJG 99-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [39] Thakur V N, Yadav S, Kumar A. Evaluation of Uncertainty in the Effective Area and Distortion Coefficients of Air Piston Gauge Using Monte Carlo Method[J]. *MAPAN-J Metrol Soc India*, 2019, 34(3): 371-377.
- [40] Olson D A. NIST calibration services for pressure using piston gauge standards [R]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2009: 47-48.
- [41] Vergne P. New high pressure viscosity measurements on the di 2 ethyl hexyl sebacate and comparisons with previous data[J]. *High Temp-High Press*, 1990, 22: 613-621.
- [42] 国家质量监督检验检疫总局. 液体活塞式压力计: JJG 59-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

本文编辑: 霍祯炜