

荧光光度法测定空气中甲醛研究

赵长民¹, 简朝星¹, 郑占波², 张喜凤¹, 王志远¹, 潘本锋^{3,4}

1. 河南省郑州生态环境监测中心, 河南 郑州 450007

2. 河南省三门峡生态环境监测中心, 河南 三门峡 472000

3. 河北先进环保产业创新中心有限公司, 河北 石家庄 050035

4. 生态环境物联网与大数据应用技术国家地方联合工程中心, 河北 石家庄 050035

摘要:乙酰丙酮分光光度法在测定空气中的甲醛时具有较好的选择性, 但灵敏度较低, 不适用于低浓度甲醛监测。对乙酰丙酮分光光度法进行改进: 将样品作显色处理后, 采用 410 nm 激发光激发产生荧光, 并将荧光强度作为分析信号, 取代了原方法的吸光度信号。改进后的方法具有更低的检出限和更高的灵敏度。经测试, 改进后的乙酰丙酮荧光法的检出限达到了 0.000 5 mg/m³, 平行测定的相对标准偏差范围为 1.1%~4.9%, 标准样品测定的相对误差范围为 1.8%~3.0%, 空白加标样品的回收率为 93.0%~107%。测试结果表明, 改进后的方法具有较高的精密度和准确度, 可以满足室外和室内环境空气中甲醛监测的需要。

关键词: 乙酰丙酮; 分光光度法; 荧光法; 甲醛; 改进

中图分类号: X830.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-6002(2025)01-0174-06

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2025.01.18

Study on Determination of Formaldehyde in Air by Fluorescence Spectrophotometry

ZHAO Changmin¹, JIAN Chaoxing¹, ZHENG Zhanbo², ZHANG Xifeng¹, WANG Zhiyuan¹, PAN Benfeng^{3,4}

1. Zhengzhou Ecological Environment Monitoring Center of Henan Province, Zhengzhou 450007, China

2. Sanmenxia Ecological Environment Monitoring Center of Henan Province, Sanmenxia 472000, China

3. Hebei Advanced Environmental Protection Industry Innovation Center Co., Ltd., Shijiazhuang 050035, China

4. National and Local Joint Engineering Research Center for Ecological Environment Internet of Things and Big Data Application Technology, Shijiazhuang 050035, China

Abstract: Acetylacetone spectrophotometry has good selectivity in determining formaldehyde in the air, but its sensitivity is low and it is not suitable for monitoring low concentrations of formaldehyde. In this study, acetylacetone spectrophotometry is improved by the following steps: After the special color reaction, the sample can emission fluorescence when it is excited by 410 nm light, uses the intensity of fluorescence as a analytical signal, replacing the absorbance signal. The improved method can get lower detection limit and higher sensitivity, the detection limit of the improved acetylacetone fluorescence method can be 0.0005 mg/m³, the relative standard deviation of parallel determination fluctuates between 1.1% and 4.9%, the relative error of standard sample determination fluctuates between 1.8% and 3.0%, and the recovery rate range is from 93.0% to 107%. Because the high precision and accuracy, the improved method can meet the needs of formaldehyde monitoring in ambient and indoor air.

Keywords: acetylacetone; spectrophotometry; fluorescence method; formaldehyde; improvement

甲醛是空气中的一项重要污染物。我国对室内空气中的甲醛规定了控制标准^[1-2], 而对于环境空气中的甲醛, 尚未制定控制标准。甲醛对人体健康有直接危害, 同时也是大气光化学反应的重要参与者, 在一定条件下可通过参与光化学反应产生臭氧等二次污染物^[3-4]。2021年, 我国339个地级及以上城市的平均环境空气质量超标天数

比例为12.5%, 其中以臭氧为首要污染物的超标天数占总超标天数的比例达到了34.7%, 臭氧成为仅次于PM_{2.5}的重要污染因子^[5]。有研究表明: 在众多的挥发性有机物中, 甲醛有着较高的臭氧生成潜势^[6]; 我国部分城市的大气含氧有机物中, 甲醛的含量总体较高^[4,7]。因此, 开展甲醛监测对于室内空气污染防治和大气臭氧污染防治均

收稿日期: 2023-07-21; 修订日期: 2023-11-14

第一作者简介: 赵长民(1980-), 男, 河南新乡人, 硕士, 高级工程师。

通讯作者: 潘本锋

有着重要的现实意义。

我国于2022年调整了对室内空气甲醛指标的限值要求,将标准限值由 0.10 mg/m^3 调整为 0.08 mg/m^3 ,并修订了对甲醛的测定方法要求,新增了高效液相色谱法^[2]。乙酰丙酮分光光度法^[8]的测定范围为 $0.5\sim 800\text{ mg/m}^3$,显然难以满足现行室内空气质量标准的监测要求。《民用建筑工程室内环境污染控制标准》(GB 50325—2020)^[9]规定,室内环境空气中甲醛的浓度限值为 0.07 mg/m^3 (此为I类标准,II类标准为 0.08 mg/m^3)。该标准采用的监测方法为AHMT分光光度法,其测量范围为 $0.01\sim 0.16\text{ mg/m}^3$,可以满足民用建筑工程室内环境污染监测要求。近年来,对环境空气中的甲醛的监测逐渐引起重视。有研究表明,我国山东省德州市某站点甲醛浓度(体积分数)范围为 $3.04\times 10^{-9}\sim 4.32\times 10^{-9}$ (换算为质量浓度为 $0.0037\sim 0.0053\text{ mg/m}^3$)^[10]。显然,适用于室内空气甲醛监测的AHMT分光光度法无法满足室外环境空气中甲醛监测的需要。高效液相色谱法虽然可以用于低浓度甲醛监测,但需要配备昂贵的专业设备。乙酰丙酮法虽然不适用于低浓度甲醛监测,但具有操作简单、选择性强、不受样品中较高浓度乙醛等干扰物的影响等优点。有研究表明,荧光分析法的灵敏度可比分光光度法高出2~3个数量级,并且具有更好的选择性^[4,11-12]。因此,本文对乙酰丙酮分光光度法进行了改进,将乙酰丙酮法与荧光分析法相结合,采用乙酰丙酮荧光法测定甲醛,以期使其适用于室内和室外环境空气中甲醛监测。

1 方法原理

乙酰丙酮荧光法是在现行分光光度法的基础上,引入了荧光分析法。其分析过程如下:采样时,用水吸收空气中的甲醛,随后将样品中的甲醛与乙酰丙酮在沸水浴加热条件下反应3 min,生成3,5-二乙酰基-1,4-二氢二甲基吡啶(DDL)。该化合物能够吸收410 nm的光,并能在受到激发后释放出510 nm的荧光,且荧光强度与甲醛含量成正比。通过测量样品在前述反应条件下的荧光强度,即可以计算出样品中的甲醛含量,进而结合所采集气体样品的体积,计算出空气中的甲醛浓度^[4,8]。

2 实验部分

2.1 仪器与试剂

2.1.1 仪器

荧光分光光度计(日本岛津,RF-6000),环境空气综合采样器(青岛崂应,2050),恒温水浴装置(天津泰斯特,DK-98-1),具塞比色管(天津天玻,25 mL)。

2.1.2 试剂

甲醛标准样品(生态环境部标准样品研究所,浓度 100 mg/L ,批号104132),甲醛质控样品(生态环境部标准样品研究所,浓度 $1.58\text{ mg/L}\pm 0.10\text{ mg/L}$,批号204538),乙酸铵(天津科密欧,优级纯),冰乙酸(天津科密欧,优级纯),乙酰丙酮(天津科密欧, $\rho = 0.975\sim 0.980\text{ g/mL}$,分析纯),实验用水(不含有机物的蒸馏水)。

2.2 仪器条件

标准曲线绘制方法为多点检测法。荧光分光光度计激发光波长为410.0 nm,发射光波长为510.0 nm;激发光带宽为5.0 nm,发射光带宽为5.0 nm;积分时间为10 ms;灵敏度设置为自动调节模式。

2.3 实验方法

参照《空气质量 甲醛的测定 乙酰丙酮分光光度法》(GB/T 15516—1995)^[8]中的要求,配制体积分数为0.25%的乙酰丙酮溶液和质量浓度为 $0.10、1.00\text{ }\mu\text{g/mL}$ 的甲醛标准溶液。按照《环境监测分析方法标准制订技术导则》(HJ 168—2020)^[13]的规定,测定方法的检出限、精密性、正确性等指标,并对方法进行综合评价。

3 结果与讨论

3.1 标准曲线绘制

取9支25 mL具塞比色管,其中第1~3支比色管中分别加入0.00、0.20、0.50 mL质量浓度为 $0.10\text{ }\mu\text{g/mL}$ 的甲醛标液,第4~9支比色管中分别加入0.10、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 mL质量浓度为 $1.00\text{ }\mu\text{g/mL}$ 的甲醛标液。随后,统一定容至10.0 mL,则各比色管中的甲醛浓度分别为0.000、0.002、0.005、0.010、0.020、0.040、0.060、0.080、0.100 $\mu\text{g/mL}$ 。分别在各比色管中加入0.25%的乙酰丙酮溶液0.50 mL,沸水浴加

热 3 min。冷却至室温后,使用 1 cm 比色皿,以水为参比,在激发波长为 410 nm、发射波长为 510 nm 的条件下测定各比色管中的试液的荧光强度,并以校准荧光强度(y ,扣除空白)为纵坐标、甲醛浓度(x ,单位为 mg/L)为横坐标绘制校准曲线。校准曲线绘制结果见图 1。

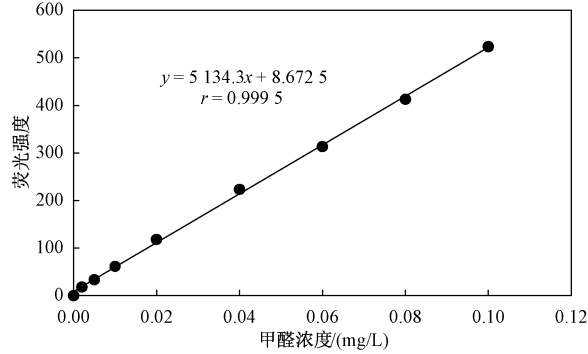


图 1 甲醛校准曲线

Fig. 1 Calibration curve of formaldehyde

3.2 检出限测试结果

采用 HJ 168—2020 中规定的方法对本方法进行检出限测试。配制 9 个浓度为 0.002 mg/L 的甲醛标准样品进行平行测定,计算其标准偏差,按公式(1)计算方法检出限。其中,当 $n=9$ 、置信度为 99% 时, $t_{(8,0.99)} = 2.896$ 。测定结果见表 1。

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

式中:MDL 为方法检出限, n 为样品平行测定次数, t 为自由度为 $n-1$ 、置信度为 99% 时的分布(单侧), S 为 n 次平行测定的标准偏差。

测试得到的方法检出限为 0.000 5 mg/L,试验样品的浓度为 0.002 mg/L,样品浓度在方法检出限的 3~5 倍之间,所以本测试测得的方法检出限合理。

表 1 检出限测试结果

Table 1 Detection limit test results

样品	荧光强度	浓度/(mg/L)
空白样品	39.791	—
1 [#] 标准样品	57.108	0.001 7
2 [#] 标准样品	56.462	0.001 6
3 [#] 标准样品	58.482	0.002 0
4 [#] 标准样品	56.787	0.001 6
5 [#] 标准样品	57.350	0.001 7
6 [#] 标准样品	58.446	0.001 9
7 [#] 标准样品	56.978	0.001 7
8 [#] 标准样品	57.558	0.001 8
9 [#] 标准样品	58.958	0.002 0
平均值	—	0.001 8
标准偏差	—	0.000 16
检出限	—	0.000 5

注:“—”表示不涉及。

对于气体样品,在流量为 1 L/min、采样时间为 50 min、采样参比体积为 50 L、吸收液定容体积为 50 mL 的条件下,本方法的检出限为 0.000 5 mg/m³,与液相色谱法^[2]的检出限(0.000 3 mg/m³)基本相当。

3.3 精密度测试结果

按照 HJ 168—2020 的要求,精密度验证要对有证标准物质和实际样品分别进行测试。由于无法获得适宜浓度的实际样品,本研究采用在纯水中添加标准样品的方式作为替代。

精密度验证分别使用低、中、高 3 个浓度的质控样品和加标样品,按照全程序方式对每个样品分别进行 6 次平行测定。其中,所用低、中、高 3 个浓度质控样品是将质控样品(1.58 mg/L±0.10 mg/L,批号 204538)分别稀释 80 倍、40 倍、20 倍所得,加标样品为在纯水中加入不同含量的标准样品(浓度 100 mg/L,批号 104132)所得。验证结果见表 2 和表 3。

表 2 标准物质精密度和正确度测试数据

Table 2 Precision and accuracy test data of reference materials

测试指标	平行样品 1	平行样品 2	平行样品 3
测定结果/(mg/L)	平行测定 1	0.020 1	0.082 1
	平行测定 2	0.020 1	0.081 5
	平行测定 3	0.019 9	0.080 1
	平行测定 4	0.020 3	0.079 8
	平行测定 5	0.019 7	0.081 3
	平行测定 6	0.020 6	0.080 9
平均值/(mg/L)	0.020 1	0.040 7	0.081 0
标准偏差/(mg/L)	0.000 31	0.000 72	0.000 87
相对标准偏差/%	1.5	1.8	1.1
保证值/(mg/L)	0.019 75	0.039 5	0.079
相对误差/%	1.8	3.0	2.5

表 3 加标样品精密度和正确度测试数据
Table 3 Precision and accuracy test data of spiked samples

测试指标	加标前	加标 1	加标 2	加标 3
加标浓度/(mg/L)	0.00	0.02	0.05	0.08
测定结果/(mg/L)	平行测定 1	未检出	0.021 1	0.052 4
	平行测定 2	未检出	0.020 9	0.053 2
	平行测定 3	未检出	0.021 4	0.051 5
	平行测定 4	未检出	0.018 6	0.052 1
	平行测定 5	未检出	0.019 8	0.051 8
	平行测定 6	未检出	0.020 3	0.052 6
平均值/(mg/L)	—	0.020 4	0.052 3	0.082 6
标准偏差/(mg/L)	—	0.001 0	0.000 61	0.001 6
相对标准偏差/%	—	4.9	1.2	1.9
加标回收率/%	—	93.0~107	103~107	99.7~106

注:“—”表示不涉及。

由表 2 和表 3 可知,本方法对 0.02~0.08 mg/L 浓度范围内的 3 个标准样品和 3 个加标样品分别进行 6 次平行测定的相对标准偏差为 1.1%~4.9%。

3.4 正确度测试结果

按照 HJ 168—2020 的要求,正确度验证要对有证标准物质和实际样品分别进行测试。由于无法获得适宜浓度的实际样品,本研究采用在纯水中添加标准样品的方式作为替代。

正确度验证分别用低、中、高 3 个浓度的质控样品和加标样品,按照全程序方式对每个样品分别进行 6 次平行测定。其中,所用低、中、高 3 个浓度质控样品是将质控样品(1.58 mg/L \pm 0.10 mg/L,批号 204538)分别稀释 80 倍、40 倍、20 倍所得,加标样品为在纯水中加入不同含量的标准样品(浓度 100 mg/L,批号 104132)所得。验证结果见表 2 和表 3。

由表 2 和表 3 可知,本方法对 0.02~0.08 mg/L 浓度范围内的 3 个标准样品和 3 个加标样品分别进行 6 次平行测定的相对误差为 1.8%~3.0%,加标回收率为 93.0%~107%。

4 实际样品测试

在郑州市中原区某室外开阔地和某写字楼室内各选取 1 个监测点位,以水为吸收液(20 mL),利用空气采样器和多孔玻板吸收管,分别于 2023 年 6 月、9 月各采样一次。室内空气采样参考《室内环境空气质量监测技术规范》(HJ/T 167—2004)^[14],室外空气采样参考《环境空气质量手工监测技术规范》(HJ 194—2017)^[15]。采样流量为 1.0 L/min,采样时长为 50 min,采样体积为 50 L,

采样开始时间分别为当日 08:00、10:00、12:00、14:00、16:00。在两个采样点共采集得到 10 个样品,首先分别用水稀释定容至 50 mL(根据样品浓度情况,也可以定容到 25 mL);然后分别取 10 mL 试样置于 25 mL 比色管中,按照曲线绘制方法进行甲醛含量测定;最终根据吸收液中甲醛的含量和所采集气体样品的体积计算出空气中甲醛的浓度。测试结果见图 2(2023 年 6 月样品)和图 3(2023 年 9 月样品)。

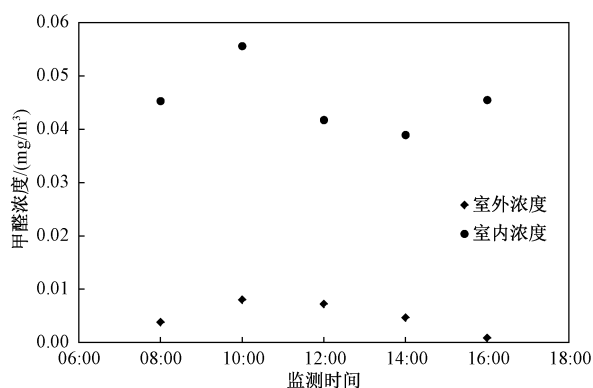


图 2 甲醛浓度测试结果
(2023 年 6 月样品)

Fig. 2 Formaldehyde concentration test results (June 2023 sample)

由测试结果可见,室外测试点位环境空气中甲醛的浓度(体积分数)范围为 $0.734 \times 10^{-9} \sim 6.53 \times 10^{-9}$,换算为质量浓度为 0.000 9~0.008 0 mg/m³(参比状态),与文献中的德州站点大气甲醛浓度范围($3.04 \times 10^{-9} \sim 4.32 \times 10^{-9}$)^[10]相当;室内测试点位空气中甲醛的浓度范围为 0.038 9~0.083 1 mg/m³(参比状态)。上述测试结果表明,乙酰丙酮荧光法可以满足室外空气和室内空气中甲醛监测的需求。

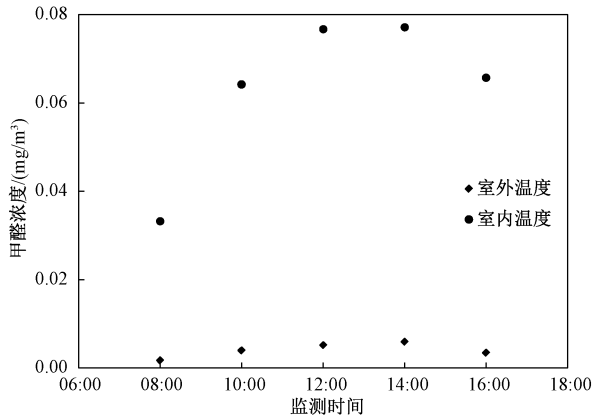


图3 甲醛浓度测试结果(2023年9月样品)

Fig. 3 Formaldehyde concentration test results (September 2023 sample)

5 结论

现行乙酰丙酮分光光度法虽然选择性较好,但存在检出限较高等问题,仅适用于对较高浓度甲醛的测定,不适用于低浓度甲醛监测。本研究对乙酰丙酮分光光度法进行了改进,引入了荧光分析法,采用乙酰丙酮荧光法测定甲醛。测试结果显示,该方法具有更低的检出限和更高的灵敏度。当以1 L/min的流量采样50 min,吸收液定容体积为50 mL时,该方法的检出限可达0.0005 mg/m³,平行测定的相对标准偏差范围为1.1%~4.9%,标准样品测定的相对误差范围为1.8%~3.0%,加标回收率为93.0%~107%。因此,该方法可以满足室外和室内环境空气中甲醛监测的需求。

参考文献 (References):

[1] 国家质量监督检验检疫总局. 室内空气质量标准: GB/T 18883—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[2] 国家卫生健康委员会. 室内空气质量标准: GB/T 18883—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[3] 姜加龙, 曾立民. 大气甲醛在线分析仪的设计与应用[J]. 环境科学学报, 2018, 38(9): 3 475-3 481.

JIANG Jialong, ZENG Limin. The Design and Application of an Online Gaseous Formaldehyde Analyzer[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(9): 3 475-3 481.

[4] 赵长民, 李莉娜, 简朝星, 等. 乙酰丙酮荧光法在线监测环境空气中的甲醛[J]. 中国环境监测, 2021,

37(4): 156-162.

ZHAO Changmin, LI Lina, JIAN Chaoping, et al. On-Line Monitoring Gaseous Formaldehyde in Ambient Atmosphere by Acetylacetone Fluorescence Method [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(4): 156-162.

- [5] 生态环境部. 2021 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. (2022-05-27) [2023-06-27]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202205/P020220608338202870777.pdf>.
- [6] 段玉森. 基于 SOA 和 O₃ 生成潜势的上海市 VOCs 优控物种研究 [J]. 中国环境监测, 2020, 36(2): 138-147.
- DUAN Yusen. Study on the Priority Species of VOCs Based on SOA and OFP [J]. Environmental Monitoring in China, 2020, 36(2): 138-147.
- [7] 陈曦, 李杏茹. 大气中挥发性含氧有机物研究进展 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 45-55.
- CHEN Xi, LI Xingru. Study Advance on Oxygenated Volatile Organic Compounds in Atmosphere [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2018, 39(3): 45-55.
- [8] 国家环境保护局. 空气质量 甲醛的测定 乙酰丙酮分光光度法: GB/T 15516—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [9] 住房和城乡建设部. 民用建筑工程室内环境污染控制标准: GB 50325—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [10] 姜加龙, 曾立民, 王文杰, 等. 华北地区冬季和夏季大气甲醛污染特征分析 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(6): 1 895-1 901.
- JIANG Jialong, ZENG Limin, WANG Wenjie, et al. Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Pollution in Winter and Summer in North China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(6): 1 895-1 901.
- [11] 陆州舜, 朱利中, 刘泽菊, 等. 荧光分析法在环境监测中的应用和进展 [J]. 环境科学进展, 1995, 3(3): 7-20.
- LU Zhoushun, ZHU Lizhong, LIU Zeju, et al. Application of Fluorescence Spectroscopy in Environmental Monitoring [J]. Advance in Environmental Science, 1995, 3(3): 7-20.
- [12] 陈兰化, 沈求一. 关于荧光分析法灵敏度和检出限的讨论 [J]. 淮北煤师院学报, 1995, 16(4): 52-54.
- CHEN Lanhua, SHEN Qiuyi. Discussion on the Sensitivity and Detection Limit of Fluorescence

- Analysis [J]. Journal of Huaibei Coal Mining Teachers College, 1995, 16(4): 52-54.
- [13] 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: 中国环境出版社, 2020.
- [14] 国家环境保护总局科技标准司. 室内环境空气质量监测技术规范: HJ/T 167—2004 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [15] 环境保护部. 环境空气质量手工监测技术规范: HJ 194—2017 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2017.

《中国环境监测》2023 年度优秀论文评审结果发布

为更好地引领环境监测科技创新发展,进一步提高期刊学术水平,激励环境监测科研人员撰写高水平科技论文,《中国环境监测》编辑部组织开展了 2023 年度优秀论文评审活动。

2023 年,《中国环境监测》共刊登论文 150 篇。依据《〈中国环境监测〉年度优秀论文评选办法(试行)》,经编辑部初筛推荐、专家分组评审、专家综合评议,一致推荐《国际温室气体监测量值传递与质量控制经验及启示》等 10 篇论文为《中国环境监测》2023 年度优秀论文,经公示无异议,现予以公布(名单见表 1,按刊发期次排序)。

表 1 《中国环境监测》2023 年度优秀论文

序号	标题	作者	工作单位
1	国际温室气体监测量值传递与质量控制经验及启示	徐驰 ¹ , 吕怡兵 ¹ , 李健军 ¹ , 毕哲 ² , 吴海 ² , 师耀龙 ^{1*}	1. 中国环境监测总站, 国家环境保护环境监测质量控制重点实验室 2. 中国计量科学研究院
2	基于复合 LSTM 模型的 PM _{2.5} 浓度预测	顾阔 ¹ , 焦瑞莉 ¹ , 薄宇 ² , 刘帅强 ³ , 王立志 ²	1. 北京信息科技大学信息与通信工程学院 2. 中国科学院大气物理研究所, 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室 3. 北京清创美科环境科技有限公司
3	成渝地区典型中小城市 VOCs 污染特征、臭氧生成潜势及来源分析	杨永安 ¹ , 许肖云 ^{2*} , 胡艳丽 ¹ , 敬安兵 ¹ , 刘兵 ³ , 张海柱 ⁴ , 唐兆军 ⁵	1. 西华师范大学环境科学与工程学院 2. 西华师范大学化学化工学院 3. 遂宁市生态环境安全应急中心 4. 四川省遂宁生态环境监测中心站 5. 四川省生态环境监测总站
4	典型燃煤电厂机组二氧化碳排放测试及核算研究	裴冰 ¹ , 刘通浩 ^{2*} , 杨文雨 ¹ , 孙毅 ¹ , 刘娟 ¹	1. 上海市环境监测中心 2. 中国环境监测总站, 国家环境保护环境监测质量控制国家重点实验室
5	河流生态环境健康评价技术体系构建及应用	古小超 ¹ , 王子璐 ² , 赵兴华 ² , 高锴 ¹ , 罗娜 ² , 梅鹏蔚 ¹ , 张震 ^{1*}	1. 天津市生态环境监测中心 2. 天津天滨瑞成环境技术工程有限公司
6	长江口-杭州湾生态环境监测点位优化布设及水质分析	张镔麒, 王艳, 徐香勤, 吕旭波, 雷坤 [*]	中国环境科学研究院水生态环境研究所
7	基于遥感影像的木兰溪水质参数反演	胡晴晖 ¹ , 宋金玲 ^{2*} , 黄达 ³ , 丁琳 ⁴ , 林琢 ² , 胡家诚 ⁵	1. 福建省近岸海域环境监测站 2. 河北科技师范学院数学与信息科技学院, 河北省农业数据智能感知与应用技术创新中心 3. 河北科技大学经济管理学院 4. 中国科学院空天信息创新研究院 5. 莆田市河务管理中心
8	太阳山湿地浮游植物优势功能群季节演替特征及驱动因子分析	李霖 ¹ , 赵睿智 ¹ , 邱小琮 ^{2*}	1. 宁夏大学土木与水利工程学院 2. 宁夏大学生命科学学院
9	基于区域环境空气质量和碳排放数据的减污降碳协同效果评估	夏峥 ^{1,2} , 俞洁 ^{1,2*} , 徐益杰 ³ , 葛好晴 ⁴ , 施行之 ⁴ , 赵虎彪 ⁴ , 徐冰焯 ^{1,2}	1. 浙江省生态环境监测中心 2. 浙江省生态环境大数据重点实验室 3. 浙江省青田县环境监测站 4. 浙江省低碳发展中心
10	山西省大气污染特征及对公众健康的空间影响	贾艳青 ¹ , 兰杰 ^{2*} , 刘秀丽 ³	1. 韩山师范学院地理科学与旅游学院 2. 山西省生态环境监测和应急保障中心 3. 山西财经大学资源型经济转型发展研究院

注:“*”表示通讯作者。