·检验技术·

工作场所空气中草酸二甲酯和草酸二乙酯溶液吸收–高效液相色谱法建立

陈志亮[1,2]，江金凤[1]，宋为丽[1]

1. 武汉市职业病防治院，武汉 430015；
2. 武汉科技大学职业危害识别与控制湖北省重点实验室，武汉 430065
通信作者：宋为丽，E-mail：449836307@qq.com

【摘　要】目的 建立工作场所空气中草酸二甲酯和草酸二乙酯的溶液吸收–高效液相色谱法。**方法** 用装有吸收液的多孔玻板吸收管采集空气样品，经 C18 色谱柱分离，在 210 nm 波长下检测，以保留时间定性，峰面积定量。**结果** 在 2.0～100.0 μg/mL 范围内，草酸二甲酯和草酸二乙酯的线性良好。草酸二甲酯回归方程为 y=1 964.2x+2 383.8，r>0.999，检出限为 0.28 μg/mL，定量下限为 0.94 μg/mL，批内精密度为 0.50%～5.77%，批间精密度为 0.83%～5.83%，加标回收率为 98.44%～99.86%；草酸二乙酯回归方程为 y=2 214.5x+2 633.9，r>0.999，检出限为 0.53 μg/mL，定量下限为 1.76 μg/mL，批内精密度为 0.68%～6.40%，批间精密度为 1.02%～6.59%，加标回收率为 98.93%～100.63%；草酸二甲酯和草酸二乙酯的采样效率均为 100%；草酸二甲酯的吸收容量为 37.97 mg（5.0 mL 吸收液），草酸二乙酯的吸收容量为 24.97 mg（5.0 mL 吸收液）；吸收液在 4 ℃冰箱可保存 3 d。**结论** 本方法准确可靠、快速便捷，各项指标均满足规范要求，在保障职业接触人群健康方面具有良好的应用价值。

【关键词】 草酸二甲酯；草酸二乙酯；溶液吸收；高效液相色谱法；工作场所

Determination of dimethyl oxalate and diethyl oxalate in workplace air by solution absorption-high performance liquid chromatography

CHEN Zhiliang[1,2], JIANG Jinfeng[1], SONG Weili[1] (*1. Wuhan Prevention and Treatment Center for Occupational Diseases*, *Wuhan* 430015, *China*; *2. Hubei Province Key Laboratory of Occupation Hazard Identification and Control*, *Wuhan University of Science and Technology*, *Wuhan* 430065, *China*)
Corresponding author: SONG Weili, E-mail: 449836307@qq.com

【Abstract】 Objective To develop a solution absorption-high performance liquid chromatography method for the determination of dimethyl oxalate and diethyl oxalate in workplace air. **Methods** Air samples were collected by porous glass plate absorption tubes filled with the absorption liquid, separated by a C18 chromatographic column, and detected at the wavelength of 210 nm. The retention time was employed for qualitative analysis, while the peak area was utilized for quantitative analysis. **Results** The concentration-signal response of dimethyl oxalate and diethyl oxalate demonstrated satisfactory linearity within the concentration range of 2 to 100 μg/mL. The results for dimethyl oxalate indicate a regression equation of y = 1 964.2x + 2 383.8 (r > 0.999). The limits of detection and quantitation were 0.28 μg/mL and 0.94 μg/mL, respectively. The intra-assay precision ranged from 0.50% to 5.77%, and the inter-assay precision ranged from 0.83% to 5.83%. The recovery rate of standard additions varied between 98.44% and 99.86%. For diethyl oxalate, the regression equation was y = 2 214.5x + 2 633.9 (r > 0.999). The limits of detection and quantitation were 0.53 μg/mL and 1.76 μg/mL, respectively. The intra-assay precision ranged from 0.68% to 6.40%, while the inter-assay precision ranged from 1.02% to 6.59%. The recovery rate of standard additions varied between 98.93% and 100.63%. Sampling efficiencies for both dimethyl oxalate and diethyl oxalate were 100%. The absorption capacity of dimethyl oxalate was measured at 37.97 mg per 5.0 mL of absorption solution, while that of diethyl oxalate was 24.97 mg per 5.0 mL of absorption solution. The samples can be stored at 4 °C for at least three days. **Conclusions** This method is accurate, reliable, fast, and convenient, and the analytical performance meets the relevant requirements, which indicate that it has good potential for application in safeguarding the health of people occupationally exposed to dimethyl oxalate and diethyl oxalate.

【Keywords】 dimethyl oxalate; diethyl oxalate; solution absorption; high performance liquid chromatography; workplace

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0 DOI：10.11847/zgggws1146444
基金项目：中国疾病预防控制中心公共卫生领域卫生健康标准化前期研究项目（BZ2022-Q017）；武汉科技大学职业危害识别与控制湖北省重点实验室开放基金（OHIC2023Y12）
第一作者：陈志亮（1989—），主管技师，博士，研究方向：职业卫生理化检验。
收稿日期：2024-11-09　修回日期：2025-05-09　录用日期：2025-11-10
利益冲突：不存在　伦理审查：免除审查　出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

草酸二甲酯作为重要的化工原料，已广泛用于医药、农药、增塑剂等有机合成[1–3]。截至 2020 年，国内煤制草酸二甲酯产能已经达到了 2 000 万吨/年[4]。劳动者在生产过程中接触的草酸二甲酯可通过吸入、食入、经皮吸收等途径侵入体内，不仅对眼、皮肤、吸收道黏膜等产生刺激作用，也对中枢神经产生麻痹作用。2013—2020 年，国内报道了 6 起草酸二甲酯急性中毒事件，导致中毒 21 例、死亡 2 例，其中毒的主要临床表现为急性肾损伤[5–10]。草酸二乙酯是一种与草酸二甲酯性质类似的化合物，常作为有机合成溶剂。草酸二乙酯能够损害黏膜和皮肤，引起咳嗽、头痛、恶心呕吐。通过中国知网、万方知识服务平台、维普期刊资源整合服务平台等数据库进行检索，截至 2025 年 5 月国内有 1 例草酸二乙酯误服中毒的报道[11]。查阅相关文献，发现草酸二甲酯和草酸二乙酯的检测方法有液相色谱法和气相色谱质谱法，主要用于测定生产过程中产生的草酸二甲酯和草酸二乙酯[12–14]，而相关职业卫生检测方法尚未制定。因此，亟需建立工作场所空气中草酸二甲酯和草酸二乙酯的检测方法，为职业接触者健康提供保障。本研究依据 GBZ/T 210.4—2008《职业卫生标准制定指南第 4 部分：工作场所空气中化学物质测定方法》[15] 的相关要求，建立了工作场所空气中草酸二甲酯和草酸二乙酯的溶液吸收–高效液相色谱法，该方法准确、可靠、灵敏、操作简便，具有良好的推广价值。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂　高效液相色谱仪（e2695，美国 Waters 公司），紫外–可见光分光光度计（TU-1901，北京普析通用仪器有限公司），电子天平（BS223S，德国 Sartorius 公司），空气采样器（EM-300，深圳国技仪器有限公司），低温转运箱（Y40，广东英得尔实业发展有限公司）。针头式过滤器（有机相，0.22 μm）、草酸二甲酯（99.0%）、草酸二乙酯（98.0%）、乙腈（HPLC）均购于上海安谱实验科技股份有限公司，多孔玻板吸收管购于南通金南玻仪五金厂，实验用水为超纯水（电阻率≥18.25 MΩ·cm）。自制采样发生装置：包括三口烧瓶、水浴锅、冷凝回流装置、硅胶软管、空气采样器和加湿器；将冷凝回流装置与三口烧瓶连接，置于水浴锅中，取适量的草酸二甲酯、草酸二乙酯标准品于三口烧瓶中，通过设置不同加热温度和加湿器档位模拟不同浓度和湿度条件下采样。将串联的装有吸收液的多孔玻板吸收管通过硅胶软管分别连接三口烧瓶出气口与空气采样泵，进行样品采集。

1.2 色谱条件　C18 色谱柱（5 μm，4.6 mm×250 mm）；流动相为乙腈/水（45:55，*v*/*v*），流速 1.0 mL/min；柱温 30 ℃；进样量 10.0 uL；紫外检测波长 210 nm。

1.3 样品的采集、运输和保存　按照《工作场所空气中有害物质监测的采样规范：GBZ 159—2004》[16] 要求进行现场采样。短时间采样：在采样点，用装有 5.0 mL 吸收液的多孔玻板吸收管，以 200 mL/min 流量采集 15 min；长时间采样：在采样点，用装有 5.0 mL 吸收液的多孔玻板吸收管，以 100 mL/min 流量采集≤120 min，同时制作样品空白。采样后，立即封闭吸收管的进出气口，在低温转运箱中（4 ℃）运输和保存，样品在 4 ℃ 条件下可保存 3 d。

1.4 分析步骤　（1）标准曲线的绘制：分别准确称取一定量的草酸二甲酯和草酸二乙酯至 10 mL 容量瓶中，加入适量流动相溶解，定容至刻度，此溶液为混合标准贮备液，临用前，用流动相稀释成 500.0 μg/mL 的混合标准应用液。取 5 支 10 mL 容量瓶，分别加入 0.0～2.0 mL 混合标准应用液，加入流动相至刻度，配制成浓度为 2.0、10.0、20.0、50.0、100.0 μg/mL 的混合标准系列溶液。将仪器调节至最佳状态，进样 10.0 μL，分别测定标准系列各浓度的峰面积，以各物质的浓度（μg/mL）及其对应的峰面积绘制标准曲线。（2）样品处理及测定：用吸收管中的吸收液洗涤进气管内壁 3 次，将吸收液全部吹入比色管中，用空白吸收液补充至 5 mL，混匀，样品经过滤后测定。在仪器最佳条件下，测定样品溶液和空白溶液，测得的峰面积值依据标准曲线分别获得样品溶液中草酸二甲酯和草酸二乙酯的浓度。

1.5 计算公式　根据以下公式进行计算：

$$C = \frac{c_0 v}{V_0}$$

其中，C 为工作场所空气中草酸二甲酯或草酸二乙酯的浓度，mg/m³；c_0 为测得样品溶液中草酸二甲酯或草酸二乙酯的浓度（减去样品空白），μg/mL；v 为样品溶液的体积，mL，本方法体积为 5.0 mL；V_0 为标准采样体积，L。

2 结　果

2.1 仪器条件的选择

2.1.1 紫外检测波长　利用紫外–可见光分光光度计对草酸二甲酯和草酸二乙酯溶液分别进行全波长扫描，发现草酸二甲酯和草酸二乙酯的最大吸收波长均在 210 nm 处，故选择 210 nm 作为最佳检测波长。

2.1.2 色谱程序　根据草酸二甲酯和草酸二乙酯的理化性质对色谱条件进行优化。选择通用的

C18 色谱柱作为分离柱，对流动相进行优化选择。实验过程中发现，草酸二甲酯在乙醇溶液中、草酸二乙酯在甲醇溶液中均不稳定，最终选用乙腈和水作为流动相，且流速为 1.0 mL/min。分别对乙腈（30%～55%）和水（70%～45%）进行优化，根据峰形、分离效果和保留时间，确定流动相为乙腈/水（45:55，*v*/*v*）。因此，本方法选择 C18 色谱柱为分离柱，紫外检测波长 210 nm，流动相为乙腈/水（45:55，*v*/*v*），流速 1.0 mL/min，等度洗脱，柱温 30 ℃，进样量 10.0 μL。

2.2 采样介质的选择 为满足“时间加权平均容许浓度”（permissible concentration-time weighted average, PC-TWA）的要求，首先选取硅胶管、活性炭管、XAD-2 复合管和 XAD-7 复合管等固体吸附剂进行筛选。结果表明，XAD-2 和 XAD-7 复合管介质中存在较多杂峰，易干扰目标物；活性炭管吸附能力较硅胶管低；硅胶管采样效率高、空白干扰少。因此建立了硅胶管采集、乙腈解吸的液相色谱法[17]，但在方法验证过程中发现草酸二甲酯的解吸效率不甚理想（解吸效率为 68.2%～78.9%）。因此，本方法进一步改进了草酸二甲酯和草酸二乙酯的溶液吸收–高效液相色谱法，选取流动相乙腈/水（45:55，*v*/*v*）作为吸收液，每只多孔玻板吸收管中装 5.0 mL，同时采集工作场所空气中的草酸二甲酯和草酸二乙酯。

2.3 方法验证

2.3.1 方法的线性范围、检出限及定量下限 按照标准曲线绘制方法配制混合标准系列溶液，在仪器最优条件下测定，以各物质的浓度及其对应的峰面积计算回归方程，在 2.0～100.0 μg/mL 的范围内，草酸二甲酯：y=1 964.2x+2 383.8，r>0.999；草酸二乙酯：y=2 214.5x+2 633.9，r>0.999。配制浓度为 1.50 μg/mL 的草酸二甲酯和草酸二乙酯混合溶液，在仪器最佳测定条件下，连续测定 10 次，以峰面积的 3 倍标准差对应的浓度作为检出限，10 倍标准差对应的浓度为定量下限。由表 1 可知，草酸二甲酯的检出限为 0.28 μg/mL，定量下限为 0.94 μg/mL，最低检出浓度（以 12 L 计）为 0.12 mg/m^3，最低定量浓度（以 12 L 计）为 0.39 mg/m^3；草酸二乙酯的检出限为 0.53 μg/mL，定量下限为 1.76 μg/mL，最低检出浓度（以 12 L 计）为 0.22 mg/m^3，最低定量浓度（以 12 L 计）为 0.73 mg/m^3。

表 1 检出限及定量下限实验结果
Table 1 Limit of detection and limit of quantitation

化合物	检出限/（μg/mL）	定量下限/（μg/mL）	最低检出浓度（以12 L计，mg/m³）	最低定量浓度（以12 L计，mg/m³）
草酸二甲酯	0.28	0.94	0.12	0.39
草酸二乙酯	0.53	1.76	0.22	0.73

2.3.2 方法精密度 利用空白吸收液将在发生装置内采集的草酸二甲酯和草酸二乙酯溶液稀释成低、中、高三种浓度的样品，每组 6 支，在 3～5 d 内进行 6 次重复测定，分别计算批内精密度和批间精密度。结果表明（表 2），草酸二甲酯的批内精密度为 0.50%～5.77%，批间精密度为 0.83%～5.83%；草酸二乙酯的批内精密度为 0.68%～6.40%，批间精密度为 1.02%～6.59%。

表 2 方法精密度结果（μg/mL）
Table 2 Method precision (μg/mL)

化合物	组别		测得值						均值	精密度/%
			1	2	3	4	5	6		
草酸二甲酯	批内	3.20	3.150	3.329	3.472	3.003	3.395	3.083	3.239	5.77
		42.00	40.196	42.027	42.965	42.817	42.436	42.326	42.128	2.39
		92.00	93.451	93.421	92.558	92.628	92.866	93.645	93.095	0.50
	批间	3.20	3.472	3.003	3.274	3.113	3.116	2.985	3.161	5.83
		42.00	40.196	42.027	41.575	41.874	44.548	43.891	42.352	3.77
		92.00	93.451	93.421	92.324	91.596	93.103	93.488	92.897	0.83
草酸二乙酯	批内	2.40	2.160	2.225	2.503	2.439	2.535	2.406	2.378	6.40
		33.00	31.853	31.890	33.091	33.664	33.085	33.016	32.767	2.23
		72.00	72.936	73.413	72.32	72.697	73.336	72.254	72.826	0.68
	批间	2.40	2.406	2.439	2.634	2.289	2.727	2.614	2.518	6.59
		33.00	33.091	33.664	33.706	33.033	35.334	35.394	34.037	3.13
		72.00	72.936	73.413	72.997	73.439	74.455	74.706	73.658	1.02

2.3.3 方法加标回收率　用吸收液分别配制低、中、高三种不同浓度的草酸二甲酯和草酸二乙酯混合溶液，在仪器最佳条件下各测定 3 次，由平均值计算加标回收率。结果表明（表 3），草酸二甲酯的加标回收率为 98.44%～99.86%，草酸二乙酯的加标回收率为 98.93%～100.63%。

表 3 方法加标回收率结果（μg/mL）
Table 3 Method recovery rate of standard addition (μg/mL)

物质	加标浓度	测得值			均值	加标回收率/%
		第1次	第2次	第3次		
草酸二甲酯	3.17	3.113	3.209	3.175	3.166	99.86
	42.18	42.779	41.396	42.178	42.118	99.85
	95.05	93.548	93.756	93.386	93.563	98.44
草酸二乙酯	2.42	2.414	2.437	2.331	2.394	98.93
	32.16	30.843	33.105	33.033	32.327	100.52
	72.46	72.674	72.771	73.296	72.914	100.63

2.3.4 采样效率和穿透容量　取一定量的草酸二甲酯和草酸二乙酯于带有冷凝管的三口烧瓶中，85 ℃ 加热，空气湿度≥80%。将三角烧瓶的另两个口分别连接串联了各装 5.0 mL 吸收液的多孔玻板吸收管，再连接采样泵，以 200 mL/min 流量采集 15 min，以 100 mL/min 流量采集 120、240 min。采集结束后，将多孔玻板吸收管前、后管中的吸收液分别移至比色管中，定容至 5.0 mL，其中采集 240 min 的吸收液损失约 2.0 mL，将定容后的溶液过滤，测定。结果表明，以 200 mL/min 流量采集 15 min，100 mL/min 流量采集 240 min，后管吸收液中均未检出草酸二甲酯，采样效率为 100%。计算 5.0 mL 吸收液对草酸二甲酯的吸收容量为 37.97 mg，换算成空气中浓度为 1 582.1 mg/m^3。同样，以 200 mL/min 流量采集 15 min，100 mL/min 流量采集 240 min，后管吸收液中均未检出草酸二乙酯，采样效率为 100%。计算 5.0 mL 吸收液对草酸二乙酯的吸收容量为 24.97 mg，换算成空气中浓度为 1 040.4 mg/m^3。

2.3.5 样品稳定性　配制了低、中、高 3 种浓度的草酸二甲酯和草酸二乙酯混合吸收液，各取 5.0 mL 置于多孔玻板吸收管中，在室温、4 ℃ 冰箱分别保存，于当天、第 1 天、第 3 天、第 5 天、第 7 天各测定 1 组，以当天测定结果为 100%，分别计算不同保存时间的下降率，以下降率不大于 10% 者为保存天数。结果表明，室温条件下存放第 1 天低浓度组的草酸二甲酯和草酸二乙酯浓度下降率均超过 10%，因此，室温条件不宜存放。而保存在 4 ℃ 冰箱中的低浓度组草酸二甲酯和草酸二乙酯在第 5 天时浓度下降率超过 10%，因此，吸收液在 4 ℃ 冰箱可保存 3 d。

2.3.6 干扰实验　根据生产工艺和使用情况，在草酸二甲酯、草酸二乙酯的生产和使用现场中可能共存的物质有草酸、碳酸二甲酯、丙二酸二乙酯[18–19]。依照本方法条件对草酸二甲酯、草酸二乙酯和上述干扰物质同时进行测定，实验发现，草酸、碳酸二甲酯在本方法条件下无色谱峰出现，丙二酸二乙酯的色谱峰能与目标物有效分离（图 1：草酸二甲酯色谱峰保留时间 3.66 min，草酸二乙酯色谱峰保留时间 5.87 min，丙二酸二乙酯色谱峰保留时间 6.44 min）。因此共存干扰物不影响草酸二甲酯、草酸二乙酯的测定。

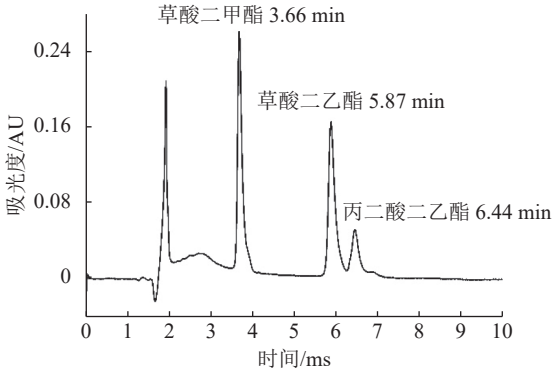


图 1 草酸二甲酯、草酸二乙酯及干扰物分离图谱
Fig. 1 Separation chromatogram of dimethyl oxalate, diethyl oxalate, and interference substance

3 讨　论

作为重要的化工原料，草酸二甲酯和草酸二乙酯通过吸入、食入、经皮吸收等途径侵入体内，对眼、皮肤、吸收道黏膜等产生刺激作用，对中枢神经产生麻痹作用[20]，已造成了多起急性中毒事件[5–11,20]。本研究通过优化色谱条件和采样介质，建立了工作场所空气中草酸二甲酯和草酸二乙酯的溶液吸收–高效液相色谱法，为保护劳动者健康提供了技术保障。在色谱条件优化过程中，分别使用了甲醇、乙醇、乙腈等有机相，实验发现，草酸二甲酯在乙醇溶液中、草酸二乙酯在甲醇溶液中均不稳定。选用乙腈和水作为流动相，C18 色谱柱能较好地分离草酸二甲酯、草酸二乙酯及其干扰物[12,17]。在采样介质优化过程中，发现 XAD-2 和 XAD-7 复合管介质中存在较多杂峰，易干扰目标物；而活性炭管吸附能力相对较弱；硅胶管吸附能力较强，但其中草酸二甲酯的解吸效率不甚理想。因此，选取流动相乙腈/水（45:55，*v*/*v*）作为吸收液。该方法的各项指标均符合《GBZ/T 210.4—2008：职业卫生标准制定指南 第 4 部分：工作场所空气中化学物质测定方法》[15]的相关要求。

本研究以乙腈/水溶液采集，C18 色谱柱分

离，紫外检测器测定，建立了工作场所空气中草酸二甲酯和草酸二乙酯的溶液吸收–高效液相色谱法。本方法准确可靠、快速便捷，各项指标均满足规范要求，适用于工作场所空气中草酸二甲酯和草酸二乙酯的采集与测定，具有良好的应用价值。

数据可用性声明 本研究中所有的数据均已在论文中得以全面展示。

参考文献

[1] 彭敏. 用草酸二甲酯替代草酸二乙酯合成磺胺甲恶唑 [J]. 中国医药指南, 2012, 10(14): 73-75.

[2] 杨业伟. 反应精馏合成草酸二甲酯的工艺研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2019.

[3] Zhu J, Sun W D, Wang S, et al. A Ni-foam-structured $MoNi_4$-MoO_x nanocomposite catalyst for hydrogenation of dimethyl oxalate to ethanol[J]. Chemical Communications, 2020, 56(5): 806-809.

[4] 陈芳菊, 冯俊, 李进, 等. 棒状 MgO 催化草酸二甲酯酯交换法合成草酸二乙酯的研究 [J]. 天然气化工-C1 化学与化工, 2022, 47(4): 138-144.

[5] 岳维梅, 方绍峰, 杨玉霞, 等. 急性草酸二甲酯中毒病例分析 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2014, 32(11): 855-856.

[6] 崔守明, 刘纪青, 杨玉新, 等. 一起急性草酸二甲酯中毒事故调查分析 [J]. 中国工业医学杂志, 2016, 29(4): 317.

[7] 余溱, 吴歌. 职业性急性草酸二甲酯中毒致急性肾损伤 5 例 [J]. 中国职业医学, 2018, 45(3): 355-358, 362.

[8] 徐沙, 凌瑞杰, 汪毅. 职业性急性草酸二甲酯中毒性肾病临床分析 [J]. 中国职业医学, 2018, 45(4): 489-491.

[9] 刘鲁川. 急性草酸二甲酯中毒致急性肾衰竭 4 例报告 [J]. 内科急危重症杂志, 2019, 25(3): 259-260.

[10] 邵金金, 许巧丽, 姚舒蕾, 等. 急性草酸二甲酯中毒致急性肾损伤四例 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2021, 39(6): 447-449.

[11] 高宪梅, 徐振华, 杨杰. 幼儿误服草酸二乙酯致急性肾损伤 1 例报道 [J]. 中国工业医学杂志, 2022, 35(4): 337-338.

[12] 石蕾, 李伟松, 师浩淳, 等. 草酸二甲酯和草酸的反相高效液相色谱分析 [J]. 化学工业与工程, 2016, 33(2): 91-95.

[13] Wen C, Cui Y Y, Dai W L, et al. Solvent feedstock effect: the insights into the deactivation mechanism of Cu/SiO_2 catalysts for hydrogenation of dimethyl oxalate to ethylene glycol[J]. Chemical Communications, 2013, 49(45): 5195-5197.

[14] 李继博. 气相色谱法分析草酸二甲酯纯度方法改进研究 [J]. 山西化工, 2024, 44(6): 90-91, 94.

[15] 中华人民共和国卫生部. 职业卫生标准制定指南 第 4 部分: 工作场所空气中化学物质测定方法: GBZ/T 210.4—2008[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2008.

[16] 中华人民共和国卫生部. 工作场所空气中有害物质监测的采样规范: GBZ 159—2004[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2006.

[17] 陈志亮, 王敏, 江金凤, 等. 工作场所空气中草酸二甲酯和草酸二乙酯同时测定的高效液相色谱法 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2024, 42(3): 199-202.

[18] 苗杰, 魏灵朝. 草酸二甲酯下游及碳酸二甲酯产品工艺技术综述与市场分析 [J]. 山东化工, 2018, 47(15): 77-78.

[19] 谷豹, 刘刚, 尹科科, 等. 草酸二甲酯的合成及应用研究进展 [J]. 应用化工, 2023, 52(4): 1248-1252.

[20] 黄秀, 焦楠, 张蕊, 等. 急性草酸二甲酯中毒文献病例分析 [J]. 工业卫生与职业病, 2024, 50(6): 565-567.