

doi: 10.12452/j.fxcxb.250517364

基于GC-MS研究水性印油印痕中挥发组分历时性变化规律及边缘扩散现象

张祉悦, 赵鹏程*, 叶 祯, 崔 岚, 宋 辉

(中国刑事警察学院 刑事科学技术学院, 辽宁 沈阳 110035)

摘要: 采用气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)对5种水性印油印痕及其边缘外1 mm处的挥发性溶剂组分进行定性定量分析。通过周期性追踪测试, 利用内标法测定样品中挥发组分的含量, 计算单位长度印痕的挥发性溶剂含量。5种印油印痕样品中以甘油、三甘醇为主要挥发组分, 根据定量分析数据绘制了挥发成分含量的历时性变化曲线。曲线显示: 印痕区域的挥发组分含量随盖印时间延长先衰减后趋于稳定, 甘油的拐点出现于第7个月, 稳定含量约20 ng/mm, 三甘醇则于第9个月达到拐点, 稳定含量约12 ng/mm; 距离印痕边缘1 mm处的挥发组分含量呈现先快速增加后缓慢减少的动态特征, 甘油和三甘醇的峰值含量分别出现在30 d(约25 ng/mm)和60 d(约16 ng/mm), 最终分别稳定于约4 ng/mm和2 ng/mm。研究进一步揭示了印痕中甘油、三甘醇的历时性变化规律, 初步总结了其在印痕外边缘的扩散规律, 推断了影响挥发组分边缘扩散现象的各类因素, 为印痕形成时间的科学判定及边缘扩散干扰校正提供了实验依据。

关键词: 印油; 挥发组分; 盖印时间; 气相色谱-质谱联用; 扩散

中图分类号: O657.63; D919.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2025)12-2607-07

Research on the Change Rule with Time of Volatile Components in Water-based Stamp Ink Imprints and Edge Diffusion Phenomenon Based on GC-MS

ZHANG Zhi-yue, ZHAO Peng-cheng*, YE Zhen, CUI Lan, SONG Hui

(College of Criminal Science and Technology, Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110035, China)

Abstract: In order to investigate the identification of seal stamping time in court science, this study used gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) to qualitatively and quantitatively analyze the volatile solvent fractions in the imprints of five types of water-based stamp inks and 1 mm outside their edges. The volatile solvent content (C , ng/mm) per unit length of the imprints was calculated by periodic tracking test, and the content of volatile components in the samples was determined by the internal standard method. Glycerol and triethylene glycol were the main volatile components in the five kinds of stamp ink imprints, and a time curve of the volatile components was plotted on the basis of the quantitative data. The curve showed that the volatile component content in the stamped area firstly declined and then stabilized with the extension of stamping time, and the inflection point of glycerol appeared in the 7th month, with a stabilized content of about 20 ng/mm, while that of triethylene glycol reached the inflection point in the 9th month, with a stabilized content of about 12 ng/mm; the content of volatile components in the region of 1 mm away from the edge of the stamped area showed the dynamic characteristics of firstly increasing rapidly and then decreasing slowly, and the peak content of glycerol and triethylene glycol appeared in 30 days (about 25 ng/mm) and 60 days (about 16 ng/mm), and finally stabilized at about 4 ng/mm and 2 ng/mm. The study further reveals the change rule with time of glycerol and triethylene glycol in the imprint, and initially summarizes the diffusion rule at the outer edge of the imprint, and analyzes and deduces the factors affecting the edge diffusion phenomenon of the volatile components in the study, which provides an experimental basis for the scientific

收稿日期: 2025-05-17; 修回日期: 2025-06-06

基金项目: 公安部科技强警基础专项项目(2023JC05, 2022JC03)

* 通讯作者: 赵鹏程, 博士, 教授, 研究方向: 法庭科学微量物证检验, E-mail: zhaopengcheng@cipuc.edu.cn

网络首发时间: 2025-07-10

determination of the formation time of the imprint and the correction of the edge diffusion interference.

Key words: stamp ink; volatile components; stamping time; gas chromatography-mass spectrometry; diffusion

印章作为法律文件、合同签署及日常办公的重要凭证,其色痕的真实性与形成时间的准确性直接关系到司法公正与社会信任体系的维护^[1-2]。在当代科技进步的背景下,利用仿制印章实施欺诈的案件数量持续上升,对公共安全与社会秩序造成了严重影响^[3],印章色痕形成时间的准确判定成为鉴别印章真伪的关键依据,因此有必要对相关检验方法进行更深入的研究^[4]。

印油的组成一般包括色料、溶剂、树脂和其他添加剂^[5-8],成分结构与中性笔油墨具有相似性。其中溶剂体系通常包括水、烃类、醇类、植物油或矿物油等,基于溶剂差异,目前市面上常见的印油主要分为油性印油与水性印油两类,前者溶剂组成以植物油、矿物油、烃类及酯类为主,后者则以水与多元醇类为主。近年来,随着环保法规的推进与印刷技术的革新,水性印油因低碳环保、成本低廉、干燥迅速等优势,逐步替代传统油性印油,成为印章盖印使用的主流材料^[9]。水性印油的色料与树脂成分表现出较高的稳定性,其含量随时间的变化不显著,溶剂中的多元醇类物质在纸张上经历的挥发与扩散现象较明显,使得印章色痕中挥发组分的历时性变化规律成为推断盖印时间的关键依据。

气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)凭借其高效分离能力、丰富的信息量及微量样本需求,常应用于油墨挥发组分的检测以确定色痕形成时间^[10-12]。Stewart^[13]通过GC-MS系统分析了油墨挥发成分,推动了该领域的研究进展;Weyermann等^[14]则利用热解吸-GC-MS联用法对油墨中部分溶剂成分含量随时间的变化进行了研究;邹积鑫等^[15]结合人工与自然老化实验,通过GC-MS根据印油印痕中溶剂组分在纸上的残留时间筛选出适用于短期与长期盖印时间鉴定的特征溶剂。此外,光谱分析^[16-18]、气相色谱^[19]及质谱技术^[20-23]等多种方法也被用于油墨成分的检测研究。

在司法实践中普遍存在印章印文与笔迹重叠的情形,由于挥发组分在色痕边缘存在扩散现象,两者重叠处边缘的挥发组分含量会受扩散现象影响,这种情况下通过色痕处挥发组分含量判断形成时间时,若仅考虑挥发现象,所得结果可能偏离实际日期,准确性较差。目前,国内外关于挥发组分边缘扩散现象的研究较少,对此仍缺乏深入理解。因此,深入研究印油挥发组分边缘扩散现象具有重要意义与现实价值。

本研究基于GC-MS对5种不同品牌水性印油在纸上形成的色痕中主要挥发组分含量进行分析,总结挥发组分的历时性变化规律,并针对其中1种印油样品,分析印章色痕边缘外1 mm处的挥发组分含量,初步研究印油挥发组分边缘扩散规律,以期对水性印油的法庭科学鉴定提供多维度依据,提升复杂环境下文件真伪鉴定的可靠性。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

Trace1300-ISQ型气相色谱-质谱联用仪(Thermo Fisher Scientific公司);Harris micro-punch型0.5 mm打孔器(美国Ted Pella公司)。

甲醇(色谱纯,山东禹王和天下新材料有限公司),苯甲酸乙酯(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。提取剂:5 $\mu\text{g/mL}$ 苯甲酸乙酯的甲醇溶液。甘油、三甘醇混合标准溶液(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);50 $\mu\text{g/mL}$,内含5 $\mu\text{g/mL}$ 苯甲酸乙酯,稀释剂为甲醇。

1.2 实验方法

1.2.1 实验材料 A4打印纸(得力集团有限公司);市售5种常用不同品牌红色水性印油,详细信息见表1。

1.2.2 仪器工作条件 GC采用HP-INNOWAX色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm);载气为高纯氦气,纯度99.99%,流速为1 mL/min;进样量0.3 μL ;进样口温度230 $^{\circ}\text{C}$;不分流进样;程序升温条件:初始温度60 $^{\circ}\text{C}$,保持1 min,以15 $^{\circ}\text{C/min}$ 升至230 $^{\circ}\text{C}$,保持15 min。

MS采用电子轰击源(EI),离子源温度260 $^{\circ}\text{C}$;质谱传输线温度260 $^{\circ}\text{C}$;溶剂延迟时间3 min;电子轰击能量为70 eV;采集模式为全扫描模式,扫描范围为质荷比(m/z)29~300 amu。

表1 样品信息
Table 1 Sample information

Number	Branding	Model name	Manufacturer
S1	Comix	B3747	Shenzhen Comix Group Co. , Ltd.
S2	Deli	NO. 9875	Deli Group Co. , Ltd.
S3	Shachihata	ESA-2N	Shachihata (Changzhou) Stationery Ltd.
S4	Simaa	NO. 9813	Beijing Simma Guozheng Technology Development Co.
S5	Trodat	7011	Trodatr Stamp Equipment (Xiamen) Co.

1.2.3 样品的制备与提取 选取以上 5 种不同品牌印油样本，使用方形空白橡胶印章均匀蘸取后在 A4 打印纸上压制形成清晰的印章色痕样品，实验全过程由固定操作人员执行。针对每种印油，平行制备 6 份样本，每月制备 1 次，累计收集 18 个月的样本。所有样本独立封装于文件袋内，并于抽屉内室温避光条件下储存。

对于用于研究印章色痕样品中挥发组分的样品，采用 0.5 mm 打孔器在制备的印章色痕上均匀截取 10 个样本点；对于用于分析印油中挥发组分在印章色痕边缘扩散现象的样品，采用 0.5 mm 打孔器在印章色痕四周距离色痕边缘 1 mm 处均匀截取 10 个样本点。将采集的样本点装于 0.2 mL 离心管中，加入 10 μL 提取剂，室温静置浸提 20 min，每个样本平行提取 3 次，取上清液进行 GC-MS 检测。

2 结果与讨论

2.1 样品中挥发组分的定性分析

通过 GC-MS 对印油印痕样本中的挥发组分进行定性分析，5 种印油样品的总离子流色谱图与质谱数据见图 1 与图 2。通过 NIST 质谱数据库对各色谱峰进行谱库匹配，并参照标准品的保留时间与特征离子碎片，在 5 种水性印油样品中检测到 2 种主要挥发组分甘油和三甘醇。

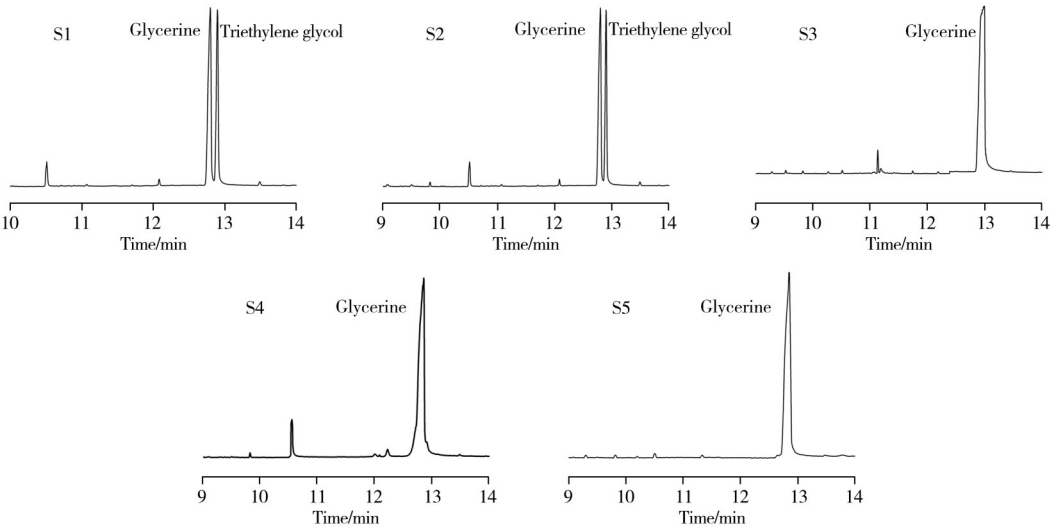


图1 5种样品的总离子流图
Fig. 1 Total ion chromatograms(TIC)of five samples

2.2 样品中挥发组分定量分析

对样品挥发组分及内标物相应的离子色谱峰进行峰面积手动积分，通过标准溶液中溶剂峰与内标物峰面积的比值计算印章色痕样品中挥发组分的含量，以单位长度色痕的挥发组分含量(C , ng/mm)作为定量参数，按公式(1)进行计算。

$$C = \frac{A_{Ss}/A_{Si}}{A_{Rs}/A_{Ri}} \times C_s \times \frac{V}{L}$$

(1)

式中： A_{Ss} 和 A_{Si} 分别表示样品提取液中溶剂与内标物的色谱峰面积； A_{Rs} 和 A_{Ri} 分别表示标准溶液中溶剂与内标物的色谱峰面积； C_s 表示标准溶液中挥发性溶剂的质量浓度(ng/μL)； V 为提取剂体积(μL)； L 为取样总长度(mm)。

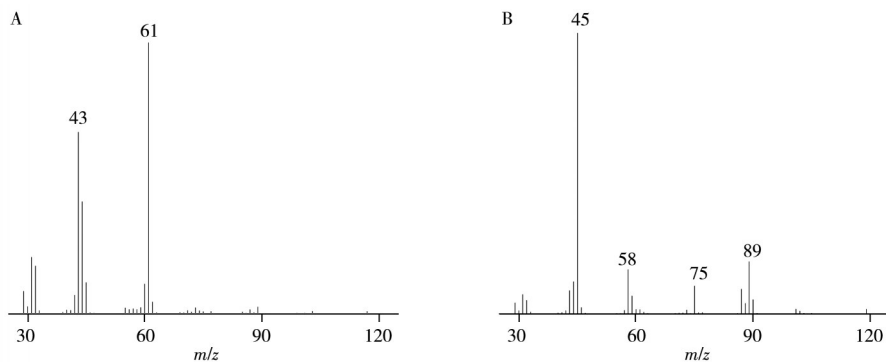


图2 甘油(A)和三甘醇(B)的质谱图

Fig. 2 Mass spectra of glycerol(A) and triethylene glycol(B)

2.3 印痕中挥发组分含量历时性变化规律

在18个月内每隔1个月对样品进行定量检测。利用Origin软件,以印文制成时间 t (0~18个月)为横坐标, C 值(ng/mm)为纵坐标,采用单指数函数 $C=a \cdot e^{-\lambda t}+b$ 对各样品中挥发组分的动态变化数据进行拟合,构建各样品中挥发组分的历时性变化曲线,拟合结果见图3与图4。5种印油挥发组分的单指数曲线函数及其拟合优度见表2。

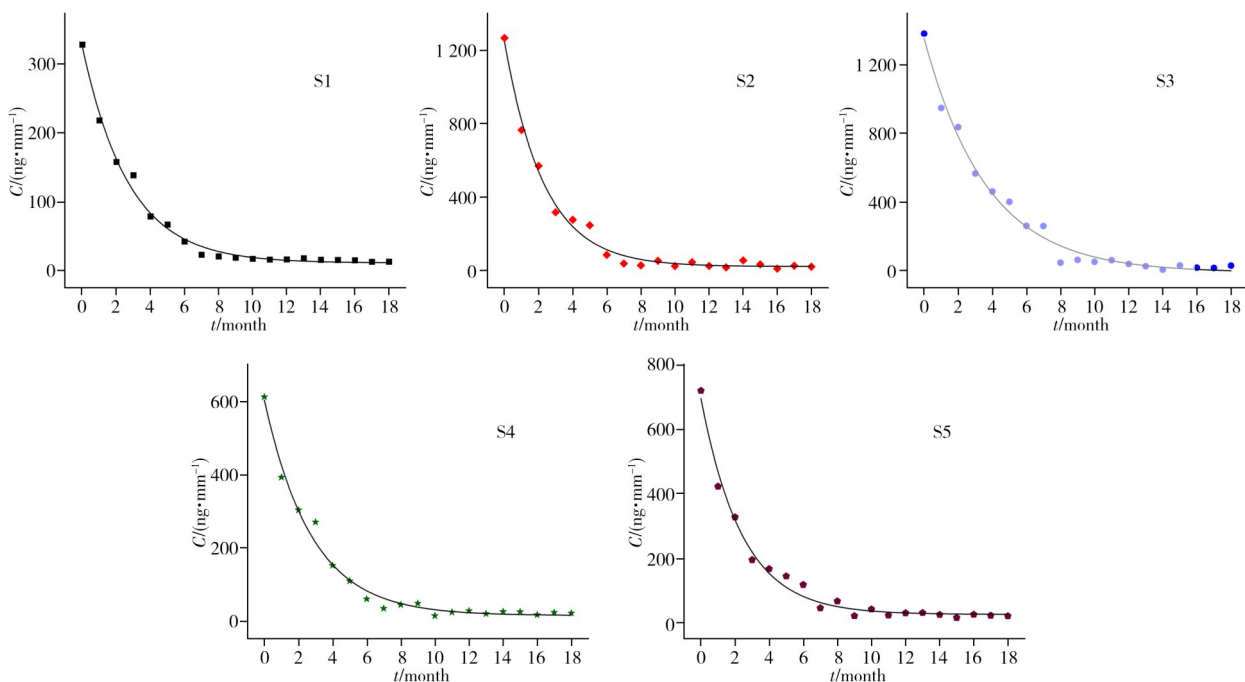


图3 S1~S5中甘油含量的历时性变化曲线

Fig. 3 Variation curves of glycerol content in S1~S5 with time

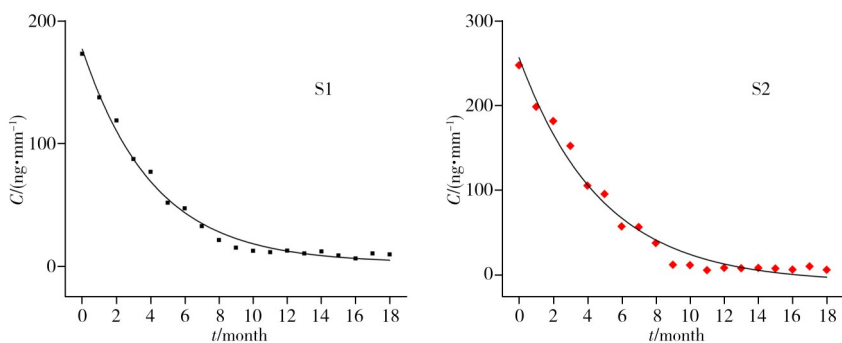


图4 S1和S2中三甘醇含量的历时性变化曲线

Fig. 4 Variation curves of triethylene glycol content in S1 and S2 with time

表2 S1~S5 印油挥发组分的单指数拟合曲线
Table 2 Mono-exponential fitting curves of volatile components of S1-S5 stamp ink

Number	Component	Equation	r^2	Adjusted r^2
S1	Glycerine	$C=11.19+314.48e^{-0.36t}$	0.993	0.992
	Triethylene glycol	$C=2.40+174.45e^{-0.24t}$	0.992	0.991
S2	Glycerine	$C=21.18+1227.46e^{-0.43t}$	0.990	0.989
	Triethylene glycol	$C=-8.66+265.15e^{-0.21t}$	0.982	0.979
S3	Glycerine	$C=-9.01+1363e^{-0.27t}$	0.988	0.986
S4	Glycerine	$C=15.22+588.73e^{-0.36t}$	0.987	0.986
S5	Glycerine	$C=26.93+669.15e^{-0.41t}$	0.988	0.986

由图3与图4可知，随着时间增长，5种印油中挥发组分的曲线均呈现先迅速递减后趋于平缓的趋势。通过分析曲线图的斜率，可得甘油的曲线斜率大于三甘醇，即甘油含量的下降速率大于三甘醇。根据数据分析，推测两挥发组分与纸张之间的相互作用主要受范德华力的影响。甘油的分子量较小，其范德华力相对较弱，导致其与纸张纤维间的结合强度较低，因此更易脱离纸张表面并挥发；而三甘醇分子量较大，范德华力更强，与纸张的相互作用更显著，这阻碍了其脱离纸张的进程，延缓其挥发。

尽管相同种类的挥发成分初始含量不同，其历时性曲线的拐点时间具有一致性，甘油的拐点时间均集中于第7个月左右，含量趋近于20 ng/mm；三甘醇的拐点则集中在第9个月左右，含量趋近于12 ng/mm。

2.4 印油挥发组分边缘扩散现象分析

2.4.1 边缘扩散规律 选择主要挥发组分为甘油与三甘醇的S1样品进行色痕边缘挥发组分含量的测定，以印文制成时间(0~180 d)为横坐标，单位长度挥发组分含量为纵坐标，绘制挥发组分含量的历时性变化曲线。结果如图5所示。

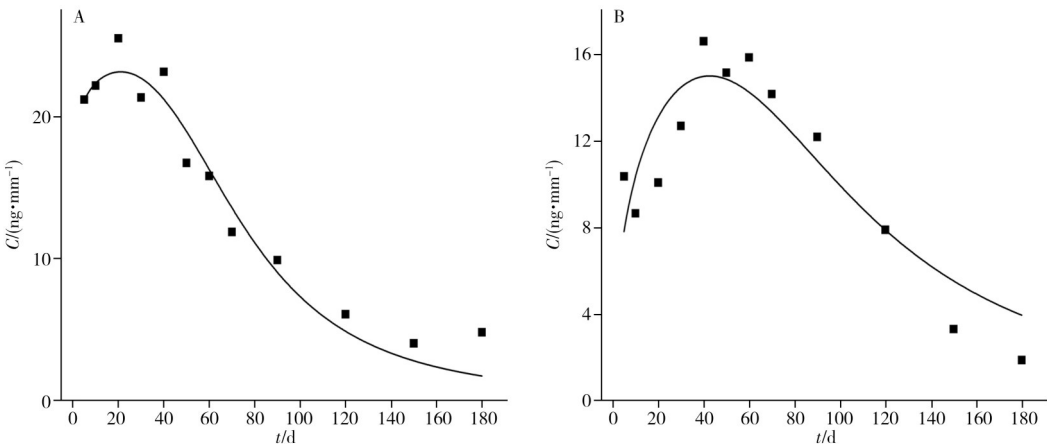


图5 S1 样品印痕边缘外 1 mm 处甘油(A)和三甘醇(B)的 C 值历时性变化曲线
Fig. 5 Variation curves of C values of glycerol(A) and triethylene glycol(B) at 1 mm outside the edge of the imprint of S1 sample with time

由图5可知，在样品边缘 1 mm 处的甘油与三甘醇含量均呈现先迅速上升再下降最后趋于平缓的现象。0~1 个月是甘油的扩散主导阶段，由于其分子量较小，扩散速率快，在距离色痕边缘 1 mm 处的含量快速上升，约 1 个月达到峰值(25 ng/mm)，此时可推测甘油的扩散与挥发作用达到动态平衡，而在 1 个月后挥发处于主导，甘油含量开始迅速下降，并于 6 个月后至 4 ng/mm，符合前文得出的挥发性溶剂时间变化的规律曲线。而三甘醇的扩散主导阶段为 0~2 个月，因其分子量较大，扩散系数低，迁移速率较甘油小，在 2 个月左右达到峰值(16 ng/mm)，并在 2 个月后至挥发主导阶段，于 6 个月含量降至 2 ng/mm。

2.4.2 边缘扩散影响因素 鉴于印痕边缘扩散检测数据的离散程度相对较高，其精密度低于印痕主体部分挥发组分含量的测定结果，推测纸上印痕边缘扩散现象更易受外界因素影响。同时，由于被测扩散部分的挥发组分含量远低于印痕主体部分，影响因素对检测结果的作用更显著。因此，对可能影

响印章色痕中挥发组分边缘扩散现象的多种因素进行了推断。

纸张的物理特性显著影响挥发组分的迁移行为,如纤维排列方向、密度及纸张材质等,可能对扩散速率产生直接影响。溶剂分子沿纤维排列方向迁移时,可利用纤维间的连续通道实现快速扩散,而垂直于纤维方向的扩散则因纤维屏障的频繁阻隔,迁移阻力增大,导致扩散速率显著降低,可能导致印痕边缘挥发组分的分布呈现非对称性特征。纤维排列疏松的纸张因其内部孔隙率较高,可为溶剂分子提供更多迁移通道,从而加速边缘扩散,而纤维紧密的纸张则可能通过毛细作用限制溶剂的横向迁移,导致扩散范围受限。此外,纸张材质中木质素与纤维素的含量差异可能改变其亲疏水性,进而影响多元醇类溶剂与纸张基底的相互作用,高吸水性纸张可能通过快速吸附溶剂分子抑制其进一步扩散,而疏水性较强的纸则可能因表面张力差异促使溶剂沿纤维间隙向外迁移。

环境温湿度是另一重要影响因素。温度升高可通过增强溶剂分子的热运动促进其扩散与挥发,在高温条件下,挥发速率的提升可能缩短溶剂在纸张表面的驻留时间,削弱扩散的累积效应。高湿度环境中纸张的吸水量增加可能导致纤维膨胀,进而缩小孔隙尺寸,阻碍溶剂的自由扩散;而低湿度条件下纸张的干燥程度较高,可能通过增强毛细作用加速挥发组分的迁移。

印油中树脂成分可能对挥发组分的扩散过程具有干扰作用。树脂在干燥过程中形成的交联网络结构可能包裹溶剂分子,限制其自由迁移,导致扩散峰值的延迟或降低。此外,树脂与溶剂分子间的极性相互作用也可能改变扩散动力学,部分树脂中的羧基或酯基可能与多元醇类溶剂形成氢键或范德华力,进一步延缓溶剂的脱离与迁移。

3 结 论

本文通过GC-MS分析了5种不同品牌水性印油印痕中挥发组分甘油和三甘醇的历时性变化规律及其边缘扩散现象。印痕中挥发组分的含量随时间呈现先下降后趋于稳定的趋势,其中甘油和三甘醇的拐点分别出现在第7个月和第9个月左右,最终稳定含量约为20 ng/mm和12 ng/mm。边缘扩散分析显示,距离印痕边缘1 mm处的挥发组分含量先快速上升后逐渐下降,甘油的扩散峰值出现在30 d(25 ng/mm),三甘醇则在60 d达到峰值(16 ng/mm),最终均趋于低含量稳定状态,根据这一规律可初步判断印油中挥发溶剂在打印纸上的扩散过程。相较于印痕主体部分,边缘扩散部分受外部影响较大,因此对可能存在的影响因素进行了推测。本研究为法庭科学中印章形成时间的鉴定提供了定量分析方法,明确了水性印油挥发组分的动态特征,有助于提升复杂场景下文件真伪鉴定的准确性。同时,对边缘扩散现象的初步探索为重叠印文或笔迹的干扰校正提供了理论依据。当前,国内外对印痕边缘挥发溶剂扩散影响因素的研究尚显不足。为明确相关影响因素的存在性、具体作用机制及其影响程度,需进一步通过设计对照实验针对不同具体条件进行深入考察。此外,基于GC-MS的检测方法需破坏性取样且操作误差较大,未来可通过发展原位质谱、质谱成像等无损技术优化检测流程,结合化学计量学进行数据解析,进一步推动法庭科学鉴定技术的精准化和高效化。

参考文献:

- [1] Zhou Y, Zheng J, Hu H, Wang Y. *Appl. Sci.*, **2021**, 11(13): 5867.
- [2] Ni Y, He N, Lü Y, Zou N, Song H, Zhao P C. *Forensic Sci. Int.*, **2020**, 311: 110296.
- [3] Luo Z, Wang W, Pang X, Zhang J, Sun C, Zhou X, He J. *Talanta*, **2021**, 235: 122804.
- [4] Qi Y, Lv X, Ma J, Lei L, Feng C, Lu W, Ji Z, Wang Y C, Wang Y C, Li X B. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2024**, 416(5): 1293.
- [5] Li K K. *J. Forensic Sci.*, **2018**, 64(3): 897-906.
- [6] Akhmerova D, Krylova A, Stavrianidi A, Shpigun O, Robin I. *Chromatographia*, **2017**, 80(11): 1701-1709.
- [7] Tian L C, Jiang H, Chen T Z, Wang Y L, Duan B, Liu F, Xu S H. *Appl. Laser* (田陆川, 姜红, 陈坦之, 王艺霖, 段斌, 刘峰, 徐少辉. 应用激光), **2022**, 42(5): 151-161.
- [8] Ouyang G L, Li B, Zhao P N, Guo X F. *J. Forensic Sci.*, **2019**, 64(4): 1203-1212.
- [9] Zhang Z Y, Zhao P C, Nan C, Wang Y F, Wang Z X. *J. Appl. Chem.* (张祉悦, 赵鹏程, 南策, 王逸飞, 王宗兴. 应用化学), **2024**, 41(8): 1085-1097.
- [10] Su H T, Tian J, Wu D H, You J D, Yang J Y, Cao S R. *Sci. Technol. Innov.* (苏泓滔, 田洁, 巫端浩, 游嘉德, 杨进友, 曹淑瑞. 科学技术创新), **2023**, (3): 216-219.

- [11] He H Y, Zhao P C, He N, Ding W. *Phys. Test. Chem. Anal.; Chem. Anal.* (何海洋, 赵鹏程, 何宁, 丁炜. 理化检验-化学分册), **2021**, 57(9): 769-775.
- [12] Wang Q Y, Zhao P C, Cui L, Song H, Li Y D, Zhang Z Y. *J. Instrum. Anal.* (王千羽, 赵鹏程, 崔岚, 宋辉, 李扬动, 张祉悦. 分析测试学报), **2024**, 43(6): 858-865, 874.
- [13] Stewart L F. *J. Forensic Sci.*, **1985**, 30(2): 405-411.
- [14] Weyermann C, Kirsch D, Vera C C, Spengler B. *Forensic Sci. Int.*, **2007**, 168(2): 119-127.
- [15] Zou J X, Shen C, Qi F L, Lian Z, Wang W X. *Chin. J. Anal. Lab.* (邹积鑫, 沈畅, 齐凤亮, 廉哲, 王蔚昕. 分析试验室), **2018**, 37(8): 902-905.
- [16] Li K K, Su D B. *Spectrosc. Spectral Anal.* (李开开, 苏东斌. 光谱学与光谱分析), **2023**, 43(S1): 163-164.
- [17] Su D, Li K. *Microchem. J.*, **2023**, 190: 108727.
- [18] Khofar P N A, Karim U K A, Elias E, Safian M F, Halim M I A. *Indonesian J. Chem.*, **2022**, 22(4): 1144-1154.
- [19] Zhao P C, Shi X F, Wen W. *Chin. J. Forensic Sci.* (赵鹏程, 史晓凡, 温雯. 中国司法鉴定), **2012**, (3): 49-51.
- [20] Onat B, Rosales-solano H, Ferrier L, Pawliszyn J. *J. Chromatogr.*, **2021**, 1641: 461934.
- [21] Liu Y, Qian X, Xing J, Li N, Li J L, Su Q Y, Chen Y X, Zhang B L, Zhu B Q. *J. Agric. Food Chem.*, **2022**, 70(6): 1971-1983.
- [22] Li Z H, Wang W X, Shi G J, Liang L N, Guang X L, Qi F L, Lian Z, Zhang J, Zou J X. *Forensic Sci. Technol.* (李志豪, 王蔚昕, 石高军, 梁鲁宁, 光晓俐, 齐凤亮, 廉哲, 张健, 邹积鑫. 刑事技术), **2022**, 47(4): 342-346.
- [23] Sun Q R, Luo Y W, Wang Y C, Zhang Q H. *J. Forensic Sci.*, **2022**, 67(5): 2062-2072.

(责任编辑: 丁 岩)

(上接第 2606 页)

- [19] Zhao C X, Xin H F, Wu D, Sun Z. *J. Instrum. Anal.* (赵成兄, 辛慧芳, 伍丹, 孙赞. 分析测试学报), **2025**, 44(3): 429-437.
- [20] Liu J H, Wu Y L, Shang Z Y, Wang Y, Zhang C, Meng Q T, Zhang Z Q. *J. Instrum. Anal.* (刘建华, 伍玉林, 尚主业, 王月, 张程, 孟庆涛, 张志强. 分析测试学报), **2025**, 44(7): 1299-1306.
- [21] Wang Z, Liu Q, Cai S, Liu C, He S, Zhao L, Zeng X, Gong J. *Dyes Pigm.*, **2022**, 203: 110382.
- [22] Zhang S, Chen D, Yan L, Xie Y, Mu X, Zhu J. *Microchem. J.*, **2020**, 157: 105066.
- [23] Huang Y, Liang J, Fan Z. *Dyes Pigm.*, **2023**, 213: 111164.
- [24] Xu W, Li X, Han M, Zhou T, Yang Y, Li W. *Spectrochim. Acta A*, **2020**, 228: 117754.
- [25] Du M, Zhang Y, Xu Z, Dong Z, Zhao S, Du H, Zhao H. *Molecules*, **2023**, 28(9): 3896.
- [26] Luo L, Cheng J, Chen S, Zhang P, Chen S, Tang Z, Zeng R, Xu M, Hao Y. *Spectrochim. Acta A*, **2023**, 296: 122692.
- [27] Yan F, Zhang H, Li X, Sun X, Jiang Y, Cui Y. *Talanta*, **2021**, 223: 121779.
- [28] Jiang J H, Zhang Z H, Qu J, Wang J Y. *Anal. Methods*, **2022**, 14(1): 17-21.
- [29] Wang B, Yang R, Zhao W. *J. Hazard. Mater.*, **2021**, 406: 124589.
- [30] Yang C, Wang X. *J. Cell Biol.*, **2021**, 220(6): e202102001.
- [31] Bajaj L, Lotfi P, Pal R, Ronza A D, Sharma J, Sardiello M. *J. Neurochem.*, **2019**, 148(5): 573-589.
- [32] Tafazoli S, Mashregi M, O' Brien P J. *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, **2008**, 229(1): 94-101.

(责任编辑: 盛文彦)