

## · 综 述 ·

## 打印复印设备释放污染物与健康效应\*



吕利枝, 段淑敏, 王云

【摘要】打印复印设备广泛应用于现代工作生活之中, 其在运行过程中会释放大量的组成复杂的污染物, 包括颗粒物、挥发性有机物、臭氧等。这些释放物与室内空气污染紧密相关, 可对人类健康产生影响。本文总结了近 20 年国内外对打印复印设备释放物中颗粒物、挥发性有机物、臭氧的现场及实验室监测结果, 并对打印复印设备释放物诱导的呼吸系统损伤、机体氧化应激与炎症反应、遗传毒性作用等健康效应研究进行了综述, 为指导人们安全有效使用打印复印设备提供参考。

【关键词】打印复印; 污染物; 呼吸系统; 氧化应激; 炎症; 遗传毒性

中图分类号: R 134 文献标志码: A 文章编号: 1001-0580(2020)10-1523-06 DOI: 10.11847/zggws1122236

## Pollutants released by printing and copying equipment operations and their health effects

LÜ Li-zhi, DUAN Shu-min, WANG Yun (Department of Occupational and Environmental Health, School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China)

【Abstract】Printing and copying equipments are widely used in modern work and life. During their operations, a large number of pollutants with complex components could be released, including particulate matter, volatile organics, ozone, etc. The emissions are closely related to indoor air pollution, which exert impacts on human health. To provide a references for guiding the safely and effectively use of printing and copying equipments, this paper reviews monitoring outcomes of particulate matter, volatile organic compounds, and ozone from the printing and copying equipment emission in the field and laboratory, and researches on health effects including respiratory system damage, oxidative stress and inflammatory reaction, as well as genotoxicity induced by emissions of printing and copying equipments published during last 20 years.

【Key words】printing and copying; pollutants; respiratory system; oxidative stress; inflammation; genotoxicity

人类至少 70% 以上的时间在室内度过, 而城市人口在室内度过的时间超过了 90%, 使得室内空气质量与人群健康息息相关<sup>[1-2]</sup>。打印复印设备作为现代生活不可或缺的办公设备, 被广泛应用于人们的日常工作和生活中<sup>[3-4]</sup>。研究显示打印复印设备在运行过程中释放的颗粒物、挥发性有机物、臭氧等<sup>[4-6]</sup>, 已成为室内空气污染的重要来源<sup>[7-9]</sup>。本文对近 20 年关于打印复印设备释放物中颗粒物、挥发性有机物、臭氧的监测结果及打印复印设备释放物的健康影响进行综述, 为指导人们创建良好室内办公环境提供参考。

## 1 打印复印设备释放污染物的来源、组成和水平

除了墨粉泄露以及产生极低频率的电磁场外, 打印复印设备对环境健康的影响还表现在释放大量颗粒物、挥发性有机物、臭氧等污染物<sup>[3-6, 10-12]</sup>。暴露水平是决定外源性化学物对机体是否产生毒作用的重要因素, 打印复印设备释放物暴露水平随打印机型号及使用时间<sup>[4, 8, 13]</sup>、碳粉覆盖<sup>[4]</sup>、墨盒类型及使用时间<sup>[4, 13]</sup>、印刷速度<sup>[13]</sup>、纸张类型<sup>[13-14]</sup>、

复印量<sup>[9]</sup>、通风<sup>[9]</sup>的变化而不同<sup>[10]</sup>。为了科学评估打印复印设备释放物的健康效应, 必须监测真实环境中打印复印设备释放物的暴露水平。广泛使用打印复印设备的复印中心和办公场所成为理想的监测地点。此外, 实验室模拟研究因其能控制周围环境对现场监测结果的影响, 也被广泛用于准确评估打印复印设备运行过程中释放物的情况, 包括释放速率、组成成分、粒径分布情况等<sup>[2, 7-8, 15]</sup>。下面从来源、组成、水平等方面对打印复印设备释放物中的颗粒物、挥发性有机物、臭氧的情况进行总结。

## 1.1 颗粒物 (表 1)

1.1.1 来源及组成 打印复印设备释放的颗粒物并不是直接由墨粉颗粒产生的, 而是打印复印设备在运行过程中发出的雾化墨粉与挥发性有机物反应生成的复杂化学混合物<sup>[5, 7]</sup>, 且多为超细或纳米颗粒 (粒径 < 100 nm)<sup>[5, 7]</sup>。其成分包括半挥发性有机物、碳黑和金属氧化物 (尤其是二氧化钛、气相二氧化硅和氧化铁) 及其他组分, 如盐类等<sup>[3, 16]</sup>。元素分析显示颗粒物中除碳、钙、磷、硫、钠和钾外, 还含有较为丰富的铁、锌、铝、钛和铜<sup>[17]</sup>。

\* 基金项目: 国家自然科学基金青年基金(31400863); 北京市自然科学基金(7172116)

作者单位: 北京大学公共卫生学院劳动卫生与环境卫生学系, 北京 100191

作者简介: 吕利枝(1994-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 硕士在读, 研究方向: 职业与环境有害因素对健康的影响。

通信作者: 王云, E-mail: wangyun@bjmu.edu.cn

数字出版日期: 2019-04-29 19:25

数字出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1234.R.20190429.1925.012.html>

表 1 打印复印设备颗粒物监测结果

年份	地区	场所	指标	背景数量	平均数量	峰值数量	背景质量	平均质量	峰值质量	参考 文献
				浓度(P/cm <sup>3</sup> )	浓度(P/cm <sup>3</sup> )	浓度(P/cm <sup>3</sup> )	浓度(μg/m <sup>3</sup> )	浓度(μg/m <sup>3</sup> )	浓度(μg/m <sup>3</sup> )	
2007	澳大利亚	办公室	TSP	(1.2 ± 0.9) × 10 <sup>3</sup>	(6.5 ± 8.2) × 10 <sup>3</sup>	38.2 × 10 <sup>3</sup>				[4]
2007	台湾	12个复印中心	PM <sub>2.5</sub>				30 ~ 77	10 ~ 83		[11]
2011	澳大利亚	办公室(107台 打印机)	TSP	1.7 × 10 <sup>3</sup> ~ 1.2 × 10 <sup>4</sup>	2.8 × 10 <sup>1</sup> ~ 4.0 × 10 <sup>3</sup>	3.3 × 10 <sup>3</sup> ~ > 1.0 × 10 <sup>5</sup>				[19]
2012	德国	63个办公室	TSP					19.1 ~ 231		[5]
2013	美国	复印中心	TSP	1.5 × 10 <sup>3</sup> a	9.5 × 10 <sup>3</sup> a	1.9 × 10 <sup>5</sup>				[16]
2013	印度	5个复印中心	PM <sub>2.5</sub>				128.1 ± 21.4	168.2 ± 34.6		[20]
			PM <sub>10</sub>				241.7 ± 44.2	376.4 ± 63.8		[20]
2015	美国	8个复印中心	PM <sub>0.1</sub>	8.8 × 10 <sup>2</sup> ~ 1.6 × 10 <sup>4</sup> b	3.7 × 10 <sup>3</sup> ~ 3.4 × 10 <sup>4</sup> b	4.6 × 10 <sup>3</sup> ~ 1.4 × 10 <sup>6</sup>		1.8 ~ 6.4		[14]
2015	中国	复印中心	TSP	2.4 × 10 <sup>4</sup> a		3.3 × 10 <sup>4</sup>				[8]
2017	美国	3个复印中心	TSP		1.6 × 10 <sup>4</sup> , 1.5 × 10 <sup>4</sup> , 2.2 × 10 <sup>4</sup>	4.6 × 10 <sup>4</sup> , 6.3 × 10 <sup>4</sup> , 1.4 × 10 <sup>5</sup>				[17]
			PM <sub>0.1</sub>					4.5, 2.2, 2.2		
2017	美国	15个复印中心	TSP	1.2 × 10 <sup>3</sup> ~ 8.1 × 10 <sup>3</sup> b	1.8 × 10 <sup>3</sup> ~ 2.38 × 10 <sup>4</sup> b	4.1 × 10 <sup>3</sup> ~ 2.17 × 10 <sup>5</sup>				[9]
2017	葡萄牙	复印中心	PM <sub>10</sub>					55.8 ± 7.50, 63.5, 67.6		[18]
								51.3 ± 9.35		

注: a中位数; b几何均数。

1.1.2 水平 颗粒物暴露水平的常见评价指标为颗粒物浓度,包括颗粒物数量浓度、颗粒物质量浓度、峰值浓度。打印复印设备的数量、印刷速度、空气变化率和其他排放源等可能会影响到室内环境中的颗粒物浓度<sup>[11,13]</sup>。当打印工作开始时,颗粒物浓度会急剧的增长,而随着打印工作的持续进行,其释放的粒子数将会减少,这种现象为“首发效应”<sup>[5,8]</sup>。多项研究表明打印过程中排放颗粒物数量浓度、质量浓度、峰值浓度增加,尤其是超细颗粒物<sup>[4-5,8-9,11,16,18]</sup>,如表1所示,部分地区甚至超过规定阈值,如台湾12个复印中心的8h平均PM<sub>2.5</sub>浓度范围为10~83 μg/m<sup>3</sup>、均值为40 μg/m<sup>3</sup>,其中2个复印中心24h室内PM<sub>2.5</sub>浓度超过了台湾环境保护局推荐的标准100 μg/m<sup>3</sup><sup>[11]</sup>。葡萄牙阿威罗的2个复制中心(A和B)的平均PM<sub>10</sub>水平分别为(55.8 ± 7.50) μg/m<sup>3</sup>和(51.3 ± 9.35) μg/m<sup>3</sup><sup>[18]</sup>,均超过葡萄牙法规定的保护限值50 μg/m<sup>3</sup>。这些高水平的颗粒物可能对人类健康产生不良影响。

浓度虽然是评价颗粒物的良好指标,但不同研究中打印机的数量、类型、打印量、打印速度等存在差异,难以对不同研究进行比较,因此提出以打印1页纸释放的粒子浓度来直观地评价打印机对外部环境的影响<sup>[8]</sup>。He等<sup>[4]</sup>对办公大楼中62台不同型号打印机分别产生的亚微米颗粒释放物进行研究,根据打印机打印1页纸后即刻测量到的粒子浓度与办公室背景浓度的比值(ratio),将打印机按其粒子排放水平分为4类:非排放源(ratio ≤ 1)、低排放源(1 < ratio ≤ 5)、中排放源(5 < ratio ≤ 10)、高排放源(ratio > 10),研究发现,大约60%(37台)打印机没有发出亚微米的微粒,而40%(25台)打印机释放出粒子,27%(17台)是高水平粒子发射器,提示人们可以通过合理选择打印机类型来降低对

打印机释放颗粒物的暴露水平。

## 1.2 挥发性有机物

1.2.1 来源及组成 打印复印设备在运行过程中,高温促使墨粉、墨水、纸张中的有机成分挥发,产生挥发性有机物<sup>[21]</sup>。目前在打印复印设备使用环境中检出的挥发性有机物已高达54种<sup>[12]</sup>。如在德黑兰4个复印中心的区域样品中检测到19种不同的挥发性有机物,包括乙酸丁酯、苯、二甲苯、癸烷、丙酮、甲苯、正己烷、己烯、柠檬烯、四氯化碳、三氟三氯乙烷、正庚烷、环己烷、1,2,4-三甲苯、壬烷、戊烷、乙苯、四氯乙烯、苯乙烯等<sup>[1]</sup>。在阿根廷的复印中心检出了甲基环乙烷、甲苯、对二甲苯、正癸烷、正十二烷等挥发性有机物<sup>[22]</sup>。

1.2.2 水平 现场监测结果表明打印复印设备释放物中挥发性有机物水平较低。美国学者采用气相色谱和质谱法分析了美国3个复印中心的个人和区域样品,在区域样本和个人样品中分别发现了挥发性有机物54种、38种<sup>[12]</sup>。然而,其暴露量至少比现有标准低100倍,最大浓度是允许暴露限值的0.3%。台湾12个复印中心苯、甲苯、乙苯、二甲苯和苯乙烯(benzene, methylbenzene, ethylbenzene, xylene, styrene, BTEXS)的测量结果表明,甲苯在所有复印中心的浓度最高,而其他四种化合物的浓度在12个复印中心中各不相同,BTEXS的浓度低于台湾标准(5、100、100、100和50 μL/L)和美国政府工业卫生员会议(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)规定的域限值(threshold limit value, TLA)(0.5、50、100、100和20 μL/L)<sup>[11]</sup>。Khatri<sup>[16]</sup>的研究显示打印机运行期间总挥发性有机物浓度低于0.1 μL/L。葡萄牙的1项研究也显示挥发性有机化合物的总浓度相对较低,通常为约190~300 nL/L<sup>[18]</sup>。

尽管打印复印设备释放的挥发性有机物浓度较低,仍不能忽视其对健康的有害作用。台湾 1 项研究评估了暴露于 BTEXS 的工人的终生癌症风险和非肿瘤健康风险,结果显示:7 个复印中心的终生癌症风险均超过可接受范围  $1 \times 10^{-6}$  (范围从  $2.5 \times 10^{-3} \sim 8.5 \times 10^{-5}$ )<sup>[23]</sup>;对于非肿瘤健康风险,所有复印中心的甲苯、乙苯、二甲苯和苯乙烯含量均低于参考水平,但是,由于复印中心的苯含量较高,所有复印中心的危险指数均超过 1.0 (范围 1.8 ~ 26.2)<sup>[23]</sup>。

### 1.3 臭氧

1.3.1 来源 打印复印设备运行过程中,在高压静电和紫外线作用下形成臭氧,其中以硒鼓和纸张的充电和放电过程中高压电荷电离空气中的氧气产生的臭氧为主<sup>[2,18]</sup>。

1.3.2 水平 时间序列图显示,打印复印设备工作过程中室内臭氧浓度逐渐升高<sup>[6]</sup>。Lee 等<sup>[11]</sup>在复印中心的监测结果显示,复印机运行过程中平均臭氧浓度从 4 nL/L 上升至约 40 nL/L,最高为 70 nL/L,一些复印中心工作期间的平均臭氧水平可能会超过台湾环保署建议的值 (50 nL/L)。葡萄牙 1 项研究也显示当复印机开始工作时,2 个复印中心的臭氧水平都有所增加,营业时间内在复印中心 A 和 B 的平均臭氧水平分别为  $(0.055 \pm 0.005)$  和  $(0.048 \pm 0.006)$   $\mu\text{L/L}$ ,可能超过工作场所推荐的标准 (0.05  $\mu\text{L/L}$ ),这可能会对员工健康造成不良影响<sup>[18]</sup>,2 个中心的室内与室外臭氧浓度比均  $> 1$ ,表明室内排放源释放出臭氧。Barrese 等<sup>[10]</sup>的研究也证实打印过程中臭氧浓度从 15 ~ 20 nL/L 上升至 40 ~ 45 nL/L,但在打印结束后迅速回到背景值水平。

另一些研究则显示尽管打印复印设备运行过程中臭氧浓度会上升,但浓度较低。Kagi 等<sup>[7]</sup>检测到有激光打印机、喷墨打印机的会议室 (容积: 120  $\text{m}^3$ ; 温度: 25 $^{\circ}\text{C}$ ; 空气交换率: 2.1/h) 在打印过程中臭氧浓度由 1.5 nL/L 上升至 6 nL/L。Bello 等<sup>[3]</sup>的研究表明在打印机运行过程中实时监测的臭氧浓度很低,范围为 5 ~ 20 nL/L。德里 1 项研究表明地下室复印中心和底层复印中心中臭氧的每小时平均浓度分别在为 1.8 ~ 10.0 nL/L 和 5.3 ~ 45.8 nL/L 的范围内,低于美国环境保护署 (United States Environmental Protection Agency, USEPA) 允许的限值 (75.0 nL/L)<sup>[6]</sup>。造成不同地点臭氧浓度差异的原因有复印强度、复印数量、复印机数量和类型以及稀释因子等<sup>[6]</sup>。

臭氧在不同空间中的分布也有很大差异,1 项研究表明当复印机周围的臭氧平均浓度为  $(185 \pm 56)$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  时,靠近天花板处为  $(55 \pm 4)$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,地面处为  $(13 \pm 15)$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,表明大量臭氧扩散到上方;水平分布上,随着复印机距离的增加,臭氧浓度降低,复印机附近平均臭氧浓度为  $(280 \pm 63)$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  时,距离复印机 1.5 米处的臭氧浓度在  $(90 \pm 20)$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>[2]</sup>。在距离复印机 0.5 米的距离处,臭氧浓度降低了一半,因此,使用复印机的人应该与臭氧源保持足够

远的距离,以减少其对健康的影响。此外,通风设备能降低室内臭氧浓度<sup>[2]</sup>。

## 2 打印复印设备释放物与健康效应

早期学者们对打印复印设备使用墨粉的健康效应进行了广泛探讨,但是研究发现打印复印设备释放物的物理化学性质与墨粉存在显著差异,对墨粉健康效应的研究不能用来评估打印复印释放物的健康效应<sup>[3,24-25]</sup>。因此近年来逐渐开始关注打印复印释放物与健康效应研究,主要集中在打印复印设备释放物对呼吸系统的影响,诱导机体炎症反应、氧化应激和遗传损伤等。主要的评价方法有实验研究 (细胞实验、动物实验、人体暴露试验) 和流行病学研究 (横断面研究、队列研究)。

2.1 打印复印设备释放物对呼吸系统的影响 打印复印设备在运行过程中释放出颗粒物、挥发性有机物、臭氧等物质,这些释放物主要以吸入方式进入人体,因此呼吸系统损害备受关注。为了提高图像质量,打印复印设备墨粉颗粒粒径趋于变小<sup>[26]</sup>,这使得颗粒物更易沉积于肺泡而诱导机体损伤。

2.1.1 细胞实验 主要使用呼吸道上皮细胞、免疫细胞来初步探索打印复印设备释放物的呼吸系统毒性作用。Khatri 等<sup>[27-28]</sup>发现从复印中心收集的空气中  $\text{PM}_{0.1}$ 、 $\text{PM}_{0.25-2.0}$  能够在 THP-1 巨噬细胞、原代鼻上皮细胞和原代小气道上皮细胞中诱导几种促炎细胞因子和细胞凋亡。Pirela 等<sup>[29]</sup>将人小气道上皮细胞 (small airway epithelial cells, SAECs)、THP-1 巨噬细胞和 TK6 淋巴母细胞暴露于 0.5 ~ 100  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的打印机释放  $\text{PM}_{0.1}$  中,结果显示打印机释放  $\text{PM}_{0.1}$  可破坏细胞膜完整性,诱导活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 及促炎细胞因子水平上升。Sisler<sup>[30]</sup>用人小气道上皮细胞 (SAEC) 和人微血管内皮细胞 (human microvascular endothelial cells, HMVEC) 建立体外肺泡-毛细管共培养模型,该模型仅 SAEC 直接暴露于低浓度的打印机释放颗粒物 (0.5 和 1.0  $\text{mg}/\text{mL}$ ),引起了 SAEC 单层内皮内肌动蛋白重塑和间隙形成的形态变化, HMVEC 中 ROS 和血管生成增加,提示低水平暴露的打印机释放颗粒物可引起肺泡-毛细管共培养模型中的细胞级联反应。但 Tang 等<sup>[15]</sup>通过 WST-1 测定法 (WST-1 assay) 测定 5 种低到中通量激光打印机在待机和运行期间释放物对 A549 细胞的毒作用,没有发现打印机释放物导致细胞毒性。上述细胞实验的结果不一致,可能与使用的细胞类型、染毒方式、剂量不同有关,但仍提示需要关注打印复印设备释放物的呼吸系统毒性。

2.1.2 动物实验 动物实验主要是采集打印复印中心空气中颗粒物或通过实验装置收集打印机释放颗粒物,经气管滴注染毒评价其对呼吸系统损伤,而经呼吸道吸入直接暴露于打印机释放污染物的动物实验目前尚未见报道。Pirela 等<sup>[31-32]</sup>将从复印中心收集的颗粒物物质提取得到的  $\text{PM}_{0.1}$  和  $\text{PM}_{0.1-2.5}$

及通过实验装置收集的激光打印机释放纳米颗粒物经气管滴注到 Balb/c 小鼠体内, 24 h 后进行体内毒理学分析, 结果表明暴露于复印机发射的纳米粒子可能会诱发小鼠肺损伤、炎症及免疫应答。

**2.1.3 流行病学研究** 探究打印复印设备释放物对呼吸系统的影响的流行病学研究以横断面研究为主, 少数为队列研究。(1) 研究表明打印复印设备释放物能引起呼吸系统不适症状<sup>[20, 33]</sup>。Jaakkola 等<sup>[33]</sup>发现在使用复印机的人群中, 鼻部症状与复印量之间存在显著的关系, 特别是鼻腔刺激。伊朗西南部 1 项回顾性队列研究显示: 复印和印刷工人(暴露组)与办公室职员(非暴露组)之间的呼吸系统症状(咳嗽和喘息)有显著的差异, *OR* 值分别为 2.61(95% *CI* = 1.21 ~ 5.62) 和 2.92(95% *CI* = 1.25 ~ 6.84)<sup>[34]</sup>。但台湾的 1 项研究表明 74 名复印工人(暴露组)的慢性呼吸系统症状和急性刺激症状与 69 名工作人员(对照组)没有明显差异<sup>[35]</sup>。(2) 肺功能也常常用于评估化学物质对呼吸系统的毒作用。Elango 等<sup>[20]</sup>采用呼吸量测定法对印度 5 个复印中心的 81 名复印机操作员的肺功能进行评估, 发现暴露组与对照组的肺功能相似。上述研究表明打印复印设备释放物能引起呼吸系统症状, 尚未造成肺功能损伤。但鉴于以上研究的打印复印操作工人的工龄都不长, 有关长期接触打印复印设备释放物对呼吸系统的慢性毒性作用尚未可知。

**2.2 打印复印设备释放物诱导机体炎症反应与氧化应激** 氧化应激、炎症反应是多种疾病的早期表现, 故多从打印复印设备释放污染物诱导机体氧化应激与炎症反应入手探讨其健康危害。上述探究打印复印设备对呼吸系统影响的细胞实验、动物实验同时证实了打印复印设备释放物可引起炎症反应、氧化应激。人体暴露试验及流行病学研究也有类似发现。

**2.2.1 人体暴露试验** 当前对打印复印设备释放物诱导机体炎症反应与氧化应激作用的研究结果并不一致。Khatri 等<sup>[16]</sup>将 9 个健康的受试者暴露于复印中心 6 h, 分析结果显示: 与暴露前相比, 暴露后 8-羟基脱氧鸟苷(8-hydroxydeoxyguanosine, 8-OH-dG)、白细胞介素-6(interleukin-6, IL-6)、白细胞介素-8(interleukin-8, IL-8)、肿瘤坏死因子(tumor necrosis factor, TNF)、白细胞介素-1 $\beta$ (interleukin-1 beta, IL-1 $\beta$ )、粒细胞集落刺激因子(granulocyte colony-stimulating factor, G-CSF)、上表皮生长因素(epidermal growth factor, EGF)、白细胞介素-10(interleukin-10, IL-10)、单核细胞趋化蛋白 1(monocyte chemoattractant protein, MCP1)、趋化因子、血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)等促炎细胞因子浓度提高了 2 ~ 10 倍, 提示复印机释放的纳米颗粒可能引起了上呼吸道炎症和氧化应激, 但这些改变大约在 24 h 后回到基线水平, 因此认为这是一种暂时性反应, 不太可能对健康个体产生任何显著的不良影响。Karrasch 等<sup>[36]</sup>首次控制了暴露水平, 以

标准化随机交叉的方式将 23 个健康的受试者、14 个轻微的稳定型哮喘患者和 15 个报告了与激光打印设备释放物相关症状的人暴露于不同浓度激光打印设备释放物(低水平: 3 000 P/cm<sup>3</sup>; 高水平: 100 000 P/cm<sup>3</sup>)中 75 min, 仅发现 IL-6 水平在低水平和高水平暴露后均升高, 但低水平暴露组的变化更为显著, 这与预期结果不同, 尚不清楚其中的机制; 嗜酸性阳离子蛋白(eosinophilic cationic protein, ECP)和 IgE 仅在高暴露组中升高。

**2.2.2 流行病学研究** 多项横断面研究发现复印机暴露与氧化应激、炎症相关。Elango 等<sup>[20]</sup>的研究表明: 与健康对照组相比, 在复印机操作人员中, 血清珠蛋白、硫代巴比妥酸反应物质(thio-barbituric acid reactive substances, TBARS)显著增高, 而白蛋白、总铁还原抗氧化能力(total ferric reducing antioxidant capacity, FRAC)降低, 血浆 IL-8、白细胞三烯 B<sub>4</sub>(leukotriene B<sub>4</sub>, LTB<sub>4</sub>)、细胞间粘附分子-1(intercellular adhesion molecule 1, ICAM-1)和 ECP 显著升高, 其他炎性因子在两组中无差异, 提示长期暴露于复印机的释放物引起了高氧化应激和全身炎症。Awodele 等<sup>[37]</sup>采用超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、丙二醛(malondialdehyde, MDA)、还原型谷胱甘肽(reduced glutathione, GSH)、谷胱甘肽转硫酶(glutathione S-transferase, GST)评估复印机操作人员血液样本中氧化应激水平, 同样发现复印机操作员的氧化应激水平有所提高。Khatri 等<sup>[17]</sup>在长期暴露于纳米颗粒的复印机操作人员中, 观察到慢性上呼吸道炎症和全身氧化应激。

**2.3 打印复印设备释放物的遗传毒性** 细胞实验、动物实验、流行病学研究中均发现打印复印设备释放物具有遗传毒性。

**2.3.1 细胞实验、动物实验** 体内外试验均提示打印复印设备释放物具有遗传毒性。在细胞实验中, Tang 等<sup>[15]</sup>通过人 A549 肺细胞中的微核试验测定五种低到中通量激光打印机在待机和运行期间的释放物的遗传毒作用, 2 台打印机的释放物诱导了微核的形成( $P < 0.001$ )。但是 THP-1、原代鼻上皮细胞和原代小气道上皮细胞暴露于打印机释放 PM<sub>0.1</sub>、PM<sub>0.25-2.0</sub> 后, 均未见 DNA 损伤<sup>[27-28]</sup>。Lu 等<sup>[38]</sup>的研究显示暴露于打印机释放纳米颗粒的 BALB/c 小鼠肺组织、小鼠肺巨噬细胞、人 SAEC 细胞中 8-氧鸟嘌呤核苷(8-oxo-7, 8-dihydro-2'-deoxyguanosine, 8-oxo-G)、血红素加氧酶-1(heme oxygenase 1, Hmox1)上调, 体内、体外实验均提示打印机释放纳米颗粒物可能导致 DNA 氧化损伤, 并可以在小鼠实验模型中诱导表观遗传改变。

**2.3.2 流行病学研究** 流行病学研究发现, 复印机操作者外周血淋巴细胞的彗星拖尾长度大于对照组, DNA 损伤显著增加及 DNA 修复效率下降<sup>[39-40]</sup>。Kleinsorge 等<sup>[41]</sup>对阿根廷 5 个复印中心的 26 名工作人员的生物样本分析, 与对照组相比, 暴露组中彗星分析损伤指数(damage index by comet assay, DICA)和含微

核细胞(buccal cells with micronuclei, BCMN)的数量分别增加了 134% 和 100% ( $P < 0.05$ ), 提示暴露于复印机可能带来 DNA 损伤。多项研究表明这种遗传毒性随工作时长具有积累效应<sup>[41-43]</sup>。Goud 等<sup>[44]</sup>对 98 名复印工作者以及 90 名对照人群进行了口腔上皮细胞微核试验、外周血单核细胞分裂块微核(cytokinesis block micronucleus, CBMN)分析和染色体畸变分析, 结果表明, 与对照组相比, 暴露组口腔上皮细胞和外周血淋巴细胞的微核频率显著增加, 染色体畸变显著增加, 常见的染色体畸变是间隙、断裂、无着丝点片段和非整倍细胞, 提示打印复印设备释放物中致突变物质可能会诱导持久突变。Gadhia 等<sup>[45]</sup>对 12 个工作时间超过 5 年的复印机操作员的染色体畸变(chromosomal aberrations, CAs)和姐妹染色单体交换频率(sister chromatid exchange frequencies, SCEs)的发生率进行评估, 发现暴露组的异常细胞百分比、总畸变、以及不包括染色单体裂隙的总畸变率比对照组显著增加, 但 SCE 分析结果与对照组相比没有显著差异。在伊拉克、印度的两项研究也显示复印机工作人员外周淋巴细胞中染色体畸变率增加<sup>[46-47]</sup>。

综上, 细胞实验、动物实验、流行病学研究均提示打印复印设备释放物会导致遗传损伤, 但还缺乏关于其毒理学机制的研究, 需要在未来的研究中进一步明确。

2.4 其他健康影响 Lee 等<sup>[48]</sup>检测到复印机发射的亚细胞毒性水平的纳米颗粒可以增强淀粉样蛋白- $\beta$  (amyloid- $\beta$ , A $\beta$ )对 C57BL/6 小鼠胚胎皮质神经元中突触信号的干扰。Herbig 等<sup>[49]</sup>发现打印机释放超细颗粒物对心理和认知功能的影响很小。还有研究显示非裔美国人结石病发病率与曾经使用复印机( $OR = 1.74$ , 95%  $CI = 1.23 \sim 2.46$ )、不断更换复印机墨粉或进行复印机维护( $OR = 2.88$ , 95%  $CI = 1.83 \sim 4.54$ )相关<sup>[50]</sup>。

### 3 展望

打印复印设备在运行过程中产生颗粒物、挥发性有机物、臭氧等<sup>[3-6, 10-12]</sup>, 这些物质与室内空气污染密切相关<sup>[7-9]</sup>。评估打印复印设备释放物健康效应的首要工作是监测有打印复印设备的场所的释放物成分及其水平, 因打印复印设备释放物水平受多种因素影响, 所以不同地区监测结果不相一致。但现有研究提示在打印复印设备运行过程中释放的颗粒物、挥发性有机物、臭氧可超过限定阈值<sup>[51]</sup>, 从而对接触人群健康产生不良影响。实验室模拟研究能控制这些影响因素, 准确评估打印复印设备运行过程中释放物的情况, 包括释放速率、组成成分、粒径分布情况等<sup>[2, 7-8, 15]</sup>。现场监测和实验室模拟研究相结合可以更好地评价打印复印设备运行过程中释放物的水平。

在实验研究方面, 目前对“真实世界”打印复印设备释放的污染物毒性的研究仍局限在打印复印

设备释放物中的颗粒物, 而不是本身释放的混合物<sup>[28-29, 31-32]</sup>。未来研究中应充分考虑打印复印设备释放的污染物的综合作用, 更准确评估其健康效应。关于打印复印设备释放物健康效应的流行病学研究以横断面研究居多, 仅有少数队列研究。虽然横断面研究提示暴露于打印复印设备释放的污染物可能会导致氧化应激、炎症、呼吸损伤、遗传毒性, 但缺乏更有力的证据, 今后应多开展相关方面的队列研究、病例对照研究等。另外, 有研究发现打印复印设备释放纳米颗粒对小鼠神经系统有影响, 提示应关注打印复印设备释放物的神经系统毒性<sup>[48]</sup>。

综上所述, 打印复印设备在运行过程中会释放颗粒物、挥发性有机物、臭氧等污染物, 进而影响室内空气质量, 并危害人体健康。但目前有关打印复印设备使用场所的空气污染物暴露研究有限, 尚需全面了解职业工人的暴露水平; 且由于打印复印设备释放污染物的成分复杂, 现有研究成果尚不足以评价其健康危害程度。鉴于打印复印设备释放物可引发机体氧化应激和炎症反应, 诱导遗传毒性和呼吸系统损伤, 有必要加强其毒性机制研究, 并同时探讨打印复印设备释放污染物对心血管、神经、免疫等系统的健康危害, 以促进相关职业接触限值的制定, 保障人民健康。

### 参考文献

- [1] Sarkhosh M, Mahvi AH, Zare MR, et al. Indoor contaminants from hardcopy devices: characteristics of vocs in photocopy centers[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 63(63): 307-312.
- [2] Valuntaite V, Girgždiene R. Investigation of ozone emission and dispersion from photocopying machines[J]. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2007, 15(2): 61-67.
- [3] Bello D, Martin J, Santeufemio C, et al. Physicochemical and morphological characterisation of nanoparticles from photocopiers: implications for environmental health[J]. *Nanotoxicology*, 2013, 7(5): 989-1003.
- [4] He C, Morawska L, Taplin L. Particle emission characteristics of office printers[J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41(17): 6039-6045.
- [5] Tang T, Hurrass J, Gminski R, et al. Fine and ultrafine particles emitted from laser printers as indoor air contaminants in german offices[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(9): 3840-3849.
- [6] Singh BP, Kumar A, Singh D, et al. An assessment of ozone levels, UV radiation and their occupational health hazard estimation during photocopying operation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 275: 55-62.
- [7] Kagi N, Fujii S, Horiba Y, et al. Indoor air quality for chemical and ultrafine particle contaminants from printers[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(5): 1949-1954.
- [8] Shi XF, Chen R, Huo LL, et al. Evaluation of nanoparticles emitted from printers in a clean chamber, a copy center and office rooms: Health risks of indoor air quality[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2015, 15(12): 9554-9564.
- [9] Martin J, Demokritou P, Woskie S, et al. Indoor air quality in photocopy centers, nanoparticle exposures at photocopy workstations, and the need for exposure controls[J]. *Annals of Work Exposures and Health*, 2017, 61(1): 110-122.
- [10] Barrese E, Giofrè A, Scarpelli M, et al. Indoor pollution in work office: VOCs, formaldehyde and ozone by printer[J]. *Occupational Diseases and Environmental Medicine*, 2014, 2(03): 49-55.
- [11] Lee CW, Hsu DJ. Measurements of fine and ultrafine particles formation in photocopy centers in Taiwan[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(31): 6598-6609.

- [ 12 ] Stefaniak AB, Breyse PN, Murray MP, et al. An evaluation of employee exposure to volatile organic compounds in three photocopy centers[J]. *Environmental Research*, 2000, 83(2): 162 – 173.
- [ 13 ] Byeon JH, Kim JW. Particle emission from laser printers with different printing speeds[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 54: 272 – 276.
- [ 14 ] Martin J, Bello D, Bunker K, et al. Occupational exposure to nanoparticles at commercial photocopy centers[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 298: 351 – 360.
- [ 15 ] Tang T, Gminski R, Konczol M, et al. Investigations on cytotoxic and genotoxic effects of laser printer emissions in human epithelial A549 lung cells using an air/liquid exposure system[J]. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 2012, 53(2): 125 – 135.
- [ 16 ] Khatri M, Bello D, Gaines P, et al. Nanoparticles from photocopiers induce oxidative stress and upper respiratory tract inflammation in healthy volunteers[J]. *Nanotoxicology*, 2013, 7(5): 1014 – 1027.
- [ 17 ] Khatri M, Bello D, Martin J, et al. Chronic upper airway inflammation and systemic oxidative stress from nanoparticles in photocopier operators: mechanistic insights[J]. *NanoImpact*, 2017, 5: 133 – 145.
- [ 18 ] Vicente ED, Ribeiro JP, Custodio D, et al. Assessment of the indoor air quality in copy centres at Aveiro, Portugal[J]. *Air Quality Atmosphere and Health*, 2017, 10(2): 117 – 127.
- [ 19 ] McGarry P, Morawska L, He CR, et al. Exposure to particles from laser printers operating within office workplaces[J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(15): 6444 – 6452.
- [ 20 ] Elango N, Kasi V, Vembhu B, et al. Chronic exposure to emissions from photocopiers in copy shops causes oxidative stress and systematic inflammation among photocopier operators in India[J]. *Environ Health*, 2013, 12(1): 78.
- [ 21 ] Kowalska J, Szewczynska M, Posniak M. Measurements of chlorinated volatile organic compounds emitted from office printers and photocopiers[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(7): 5241 – 5252.
- [ 22 ] Lerner JEC, Sanchez EY, Sambeth JE, et al. Characterization and health risk assessment of VOCs in occupational environments in Buenos Aires, Argentina[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 55: 440 – 447.
- [ 23 ] Lee CW, Dai YT, Chien CH, et al. Characteristics and health impacts of volatile organic compounds in photocopy centers[J]. *Environmental Research*, 2006, 100(2): 139 – 149.
- [ 24 ] Kitamura H, Terunuma N, Kurosaki S, et al. A cohort study on self-reported respiratory symptoms of toner-handling workers: cross-sectional and longitudinal analysis from 2003 to 2008[J]. *Biomed Research International*, 2014, 2014: 826757.
- [ 25 ] Kitamura H, Terunuma N, Kurosaki S, et al. A cohort study using pulmonary function tests and x-ray examination in toner-handling workers: cross-sectional and longitudinal analyses from 2003 to 2008[J]. *Hum Exp Toxicol*, 2015, 34(4): 345 – 356.
- [ 26 ] Furukawa Y, Aizawa Y, Okada M, et al. Negative effect of photocopier toner on alveolar macrophages determined by *in vitro* magnetometric evaluation[J]. *Ind Health*, 2002, 40(2): 214 – 221.
- [ 27 ] Khatri M, Bello D, Pal AK, et al. Toxicological effects of pm<sub>0.25</sub> – 2.0 particles collected from a photocopy center in three human cell lines[J]. *Inhal Toxicol*, 2013, 25(11): 621 – 632.
- [ 28 ] Khatri M, Bello D, Pal AK, et al. Evaluation of cytotoxic, genotoxic and inflammatory responses of nanoparticles from photocopiers in three human cell lines[J]. *Part Fibre Toxicol*, 2013, 10: 42.
- [ 29 ] Pirela SV, Miousse IR, Lu XY, et al. Effects of laser printer-emitted engineered nanoparticles on cytotoxicity, chemokine expression, reactive oxygen species, DNA methylation, and DNA damage: a comprehensive *in vitro* analysis in human small airway epithelial cells, macrophages, and lymphoblasts[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2016, 124(2): 210 – 219.
- [ 30 ] Sisler JD, Pirela SV, Friend S, et al. Small airway epithelial cells exposure to printer-emitted engineered nanoparticles induces cellular effects on human microvascular endothelial cells in an alveolar-capillary co-culture model[J]. *Nanotoxicology*, 2015, 9(6): 769 – 779.
- [ 31 ] Pirela SV, Lu X, Miousse I, et al. Effects of intratracheally instilled laser printer-emitted engineered nanoparticles in a mouse model: a case study of toxicological implications from nanomaterials released during consumer use[J]. *NanoImpact*, 2016, 1: 1 – 8.
- [ 32 ] Pirela S, Molina R, Watson C, et al. Effects of copy center particles on the lungs: a toxicological characterization using a balb/c mouse model[J]. *Inhal Toxicol*, 2013, 25(9): 498 – 508.
- [ 33 ] Jaakkola MS, Jaakkola JJK. Office equipment and supplies: a modern occupational health concern?[J]. *American Journal of Epidemiology*, 1999, 150(11): 1223 – 1228.
- [ 34 ] Karimi A, Eslamizad S, Mostafae M, et al. Restrictive pattern of pulmonary symptoms among photocopier and printing workers: a retrospective cohort study[J]. *Journal of Research in Health Sciences*, 2016, 16(2): 81 – 84.
- [ 35 ] Yang CY, Haung YC. A cross-sectional study of respiratory and irritant health symptoms in photocopier workers in Taiwan[J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health – Part A – Current Issues*, 2008, 71(19): 1314 – 1317.
- [ 36 ] Karrasch S, Simon M, Herbig B, et al. Health effects of laser printer emissions: a controlled exposure study[J]. *Indoor Air*, 2017, 27(4): 753 – 765.
- [ 37 ] Awodele O, Akindele AJ, Adebowale GO, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon, haematological and oxidative stress levels in commercial photocopier operators in Lagos, Nigeria[J]. *Ghana Med J*, 2015, 49(1): 37 – 43.
- [ 38 ] Lu XY, Miousse IR, Pirela SV, et al. *In vitro* epigenetic effects induced by engineered nanomaterials: a case study of copper oxide and laser printer-emitted engineered nanoparticles[J]. *Nanotoxicology*, 2016, 10(5): 629 – 639.
- [ 39 ] Manikantan P, Balachandar V, Sasikala S, et al. DNA damage in workers occupationally exposed to photocopying machines in Coimbatore South India, using comet assay[J]. *Internet J Toxicol*, 2009, 7(2): 1 – 9.
- [ 40 ] Goud KI, Shankarappa K, Vijayashree B, et al. DNA damage and repair studies in individuals working with photocopying machines[J]. *International Journal of Human Genetics*, 2001, 1(2): 139 – 143.
- [ 41 ] Kleinsorge EC, Erben M, Galan MG, et al. Assessment of oxidative status and genotoxicity in photocopier operators: a pilot study[J]. *Biomarkers*, 2011, 16(8): 642 – 648.
- [ 42 ] Javed H, Ghani N. Cytogenetic damage in the buccal cells of photocopying workers in Lahore, Pakistan[J]. *Journal of the Pakistan Medical Association*, 2017, 67(2): 275 – 279.
- [ 43 ] Kasi V, Elango N, Ananth S, et al. Occupational exposure to photocopiers and their toners cause genotoxicity[J]. *Human and Experimental Toxicology*, 2017, 37(2): 205 – 217.
- [ 44 ] Goud KI, Hasan Q, Balakrishna N, et al. Genotoxicity evaluation of individuals working with photocopying machines[J]. *Mutation Research – Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2004, 563(2): 151 – 158.
- [ 45 ] Gadhia P, Patel D, Solanki K, et al. A preliminary cytogenetic and hematological study of photocopying machine operators[J]. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2005, 9(1): 22 – 25.
- [ 46 ] Balakrishnan M, Das A. Chromosomal aberration of workers occupationally exposed to photocopying machines in Sullur, South India[J]. *Int J Pharma Bio Sci*, 2010, 1(4): B-303 – B-307.
- [ 47 ] Sulaiman K. Chromosomal aberrations in peripheral blood lymphocytes of photocopy machine workers in Erbil city/Iraqi Kurdistan region[J]. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*, 2017, 28(6): 41 – 48.
- [ 48 ] Lee S, Sohal IS, Therrien MA, et al. Additive impairment of synaptic signaling in cultured cortical neurons by exogenously-applied oligomerized amyloid-beta and airborne nanoparticles generated during photocopying[J]. *Journal of Alzheimers Disease*, 2015, 47(1): 49 – 54.
- [ 49 ] Herbig B, Jörres RA, Schierl R, et al. Psychological and cognitive effects of laser printer emissions: a controlled exposure study[J]. *Indoor Air*, 2018, 28: 112 – 124.
- [ 50 ] Rybicki BA, Amend KL, Maliarik MJ, et al. Photocopier exposure and risk of sarcoidosis in African-American sibs[J]. *Sarcoidosis Vasc Diffuse Lung Dis*, 2004, 21(1): 49 – 55.
- [ 51 ] 潘祥凯, 高衍新, 王德军, 等. 室内激光打印机污染物的释放特性[J]. *环境与职业医学*, 2017, 34(11): 953 – 957.