

# 打印机释放颗粒物的特征与影响因素

吕利枝<sup>1a</sup>, 刘林<sup>1a</sup>, 苏明阳<sup>1a</sup>, 陈晔<sup>1a</sup>, 陈曦<sup>1a</sup>, 姜萍<sup>1a</sup>, 王伽婷<sup>1a</sup>, 何丽华<sup>1a</sup>, 赵茜<sup>1a</sup>, 余灿清<sup>1b</sup>, 徐钰<sup>2</sup>, 王云<sup>1a</sup>

1. 北京大学公共卫生学院 a. 劳动卫生与环境卫生学系 b. 流行病与卫生统计学系, 北京 100191  
2. 北京大学人民医院呼吸科, 北京 100044

## 摘要:

**[背景]** 打印复印设备在工作中会释放大量颗粒物, 从而危害人体健康, 但目前国内对打印店内细小粒径颗粒物浓度及粒径分布、打印机释放颗粒物水平影响因素的研究不足。

**[目的]** 分析打印店内颗粒物浓度与粒径分布特征, 探讨打印机工作过程中颗粒物释放的影响因素。

**[方法]** 采用便携式气溶胶谱仪在北京某学校内3家打印店(A、B、C)进行连续12h以上的多粒径(0.25~32.00 μm)颗粒物数量浓度和质量浓度的动态监测。在室内场所展开实验, 分别探究室内温度、室内相对湿度、纸张定量、硒鼓类型对打印机释放粒径≤1 μm的颗粒物(PM<sub>1</sub>)的数量浓度峰值的影响。

**[结果]** 3家打印店的颗粒物数量粒径分布相同, 96%以上颗粒物粒径≤0.50 μm(PM<sub>0.5</sub>); 其数量浓度随粒径变小而升高, PM<sub>0.5</sub>数量浓度可高达11.36×10<sup>5</sup> P·cm<sup>-3</sup>; 3家打印店的颗粒物质量粒径主要分布在0.25~0.65 μm和1.30~7.50 μm。打印机释放颗粒物是打印店内颗粒物污染的主要来源, 同时工作的打印机数量和室外PM<sub>2.5</sub>浓度会影响打印店内颗粒物水平。模拟实验显示, 当室内温度为15、23、27℃时, 打印过程中释放PM<sub>1</sub>的数量浓度峰值分别为(1.76±1.33)×10<sup>4</sup>、(1.95±0.64)×10<sup>4</sup>、(3.20±3.00)×10<sup>4</sup> P·cm<sup>-3</sup>, 差异无统计学意义(F=0.58, P>0.05); 当室内相对湿度为30%、45%、60%时, 打印过程中释放PM<sub>1</sub>的数量浓度峰值分别为(1.95±0.64)×10<sup>4</sup>、(0.96±0.26)×10<sup>4</sup>、(0.79±0.11)×10<sup>4</sup> P·cm<sup>-3</sup>, 差异具有统计学意义(F=9.65, P<0.05); 使用70、80 g·m<sup>-2</sup>的标准A4打印纸时, 打印过程中释放PM<sub>1</sub>的数量浓度峰值分别为(1.95±0.64)×10<sup>4</sup>、(5.25±1.07)×10<sup>4</sup> P·cm<sup>-3</sup>, 差异具有统计学意义(t=-4.59, P<0.05); 当硒鼓类型为国产兼容硒鼓、国产灌墨硒鼓和原装进口硒鼓时, 打印过程中释放PM<sub>1</sub>的数量浓度峰值分别为(1.95±0.64)×10<sup>4</sup>、(1.90±1.22)×10<sup>4</sup>、(9.85±4.70)×10<sup>4</sup> P·cm<sup>-3</sup>, 差异具有统计学意义(F=7.44, P<0.05)。

**[结论]** 打印店内释放粒径≤0.50 μm的颗粒物为主, 且颗粒物数量浓度和瞬时颗粒物质量浓度较高。室内相对湿度、纸张定量和硒鼓类型可影响打印机释放PM<sub>1</sub>的数量浓度。

**关键词:** 颗粒物; 粒径分布; 打印机; 室内空气污染; 影响因素

**Characteristics and influencing factors of particulate matters released from printers** LÜ Li-zhi<sup>1a</sup>, LIU Lin<sup>1a</sup>, SU Ming-yang<sup>1a</sup>, CHEN Wei-ye<sup>1a</sup>, CHEN Xi<sup>1a</sup>, JIANG Ping<sup>1a</sup>, WANG Jia-ting<sup>1a</sup>, HE Li-hua<sup>1a</sup>, ZHAO Qian<sup>1a</sup>, YU Can-qing<sup>1b</sup>, XU Yu<sup>2</sup>, WANG Yun<sup>1a</sup> (1.a.Department of Occupational and Environmental Health b.Department of Epidemiology and Biostatistics, Peking University School of Public Health, Beijing 100191, China; 2.Department of Respiratory Medicine, Peking University People's Hospital, Beijing 100044, China)

## Abstract:

**[Background]** Printing and copying equipment in operation will likely release a large amount of particulate matters, thereby endangering human health. However, at present, there is insufficient research on the concentration and size distribution of fine particles in domestic print shops and the factors affecting the level of particles released by printers.

**[Objective]** This study is designed to analyze the characteristics of particle concentration and particle size distribution in print shops, and explore the influencing factors of particle emission during printer operation.

**[Methods]** The number concentration and mass concentration of particles with multiple particle

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2020.20176

## 基金项目

国家自然科学基金(31971313)

## 作者简介

吕利枝(1994—), 女, 硕士生;  
E-mail: lizhiliyu@bjmu.edu.cn

## 通信作者

王云, E-mail: wangyun@bjmu.edu.cn

利益冲突 无申报

收稿日期 2020-04-17

录用日期 2020-07-17

文章编号 2095-9982(2020)09-0833-07

中图分类号 R122.2

文献标志码 A

## ►引用

吕利枝, 刘林, 苏明阳, 等. 打印机释放颗粒物的特征与影响因素[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(9): 833-839.

## ►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20176

## Funding

This study was funded.

## Correspondence to

WANG Yun, E-mail: wangyun@bjmu.edu.cn

**Competing interests** None declared

**Received** 2020-04-17

**Accepted** 2020-07-17

## ►To cite

LÜ Li-zhi, LIU Lin, SU Ming-yang, et al. Characteristics and influencing factors of particulate matters released from printers[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2020, 37(9): 833-839.

## ►Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20176

sizes (0.25–32.00  $\mu\text{m}$ ) were dynamically monitored using a portable aerosol spectrometer for more than 12 h in three print shops (A, B, and C) in a school in Beijing. Besides, experiments were carried out indoor to explore effects of indoor temperature, indoor relative humidity, paper grammage, and toner cartridge types on the peak concentrations of particles  $\leq 1 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) released by the printers.

**[Results]** The particle number size distributions in the three print shops were basically identical, and more than 96% of the particles were  $\leq 0.50 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{0.5}$ ). The number concentration increased as the particle size became smaller, and the  $\text{PM}_{0.5}$  number concentration was as high as  $11.36 \times 10^5 \text{ P}\cdot\text{cm}^{-3}$ . The particle size distributions in the three print shops were largely between 0.25–0.65  $\mu\text{m}$  and 1.30–7.50  $\mu\text{m}$ . The particulate matters released by printers were the main source of indoor particulate matter pollution in the print shops, and the number of printers in operation and outdoor  $\text{PM}_{2.5}$  concentration affected the level of particles in the print shops. The experiments showed that when the indoor temperature was 15, 23, and 27  $^{\circ}\text{C}$ , the peak value of  $\text{PM}_{10}$  number concentration during printing was  $(1.76 \pm 1.33) \times 10^4$ ,  $(1.95 \pm 0.64) \times 10^4$ , and  $(3.20 \pm 3.00) \times 10^4 \text{ P}\cdot\text{cm}^{-3}$ , respectively, and the difference among them was not statistically significant ( $F=0.58$ ,  $P>0.05$ ); when the indoor relative humidity was 30%, 45%, 60%, the peak value of  $\text{PM}_{10}$  number concentration during printing was  $(1.95 \pm 0.64) \times 10^4$ ,  $(0.96 \pm 0.26) \times 10^4$ , and  $(0.79 \pm 0.11) \times 10^4 \text{ P}\cdot\text{cm}^{-3}$ , respectively, and the difference among them was statistically significant ( $F=9.65$ ,  $P<0.05$ ); when using standard A4 printing paper weighted 70 and 80  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , the peak value of  $\text{PM}_{10}$  number concentration during printing was  $(1.95 \pm 0.64) \times 10^4$  and  $(5.25 \pm 1.07) \times 10^4 \text{ P}\cdot\text{cm}^{-3}$ , respectively, and the difference between them was statistically significant ( $t=-4.59$ ,  $P<0.05$ ); when using domestic compatible toner cartridges, domestic refillable toner cartridges, and imported original toner cartridges, the peak value of  $\text{PM}_{10}$  number concentration during printing was  $(1.95 \pm 0.64) \times 10^4$ ,  $(1.90 \pm 1.22) \times 10^4$ , and  $(9.85 \pm 4.70) \times 10^4 \text{ P}\cdot\text{cm}^{-3}$ , respectively, and the difference among them was statistically significant ( $F=7.44$ ,  $P<0.05$ ).

**[Conclusion]** The size of particles in the selected print shops is mainly  $\leq 0.50 \mu\text{m}$ , and the particle number concentration and instantaneous particle mass concentration are high. Indoor relative humidity, paper grammage, and toner cartridge type are the factors that affect the number concentration of  $\text{PM}_{10}$  emitted by printers.

**Keywords:** particulate matter; size distribution; printer; indoor air pollution; influencing factor

打印复印设备作为现代社会必不可少的办公设备,被广泛应用于生活和工作中<sup>[1]</sup>。但打印复印设备在工作过程中亦会释放大量颗粒物、臭氧和挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs),影响室内空气质量并危害人体健康,如引起机体炎症和氧化应激反应,进而导致呼吸系统损伤与遗传损伤等<sup>[2-5]</sup>。实验研究发现打印复印设备释放的颗粒物以细小粒径的颗粒物为主,而颗粒物粒径越小,其比表面积越大,表面吸附化学污染物的能力越强,对人体的潜在危害越大<sup>[6-8]</sup>。然而,现在有关于打印复印工作场所的颗粒物浓度监测以  $\text{PM}_{2.5}$  (空气动力学直径  $\leq 2.5 \mu\text{m}$  的颗粒物)、 $\text{PM}_{10}$  (空气动力学直径  $\leq 10.0 \mu\text{m}$  的颗粒物) 和总悬浮颗粒物 (空气动力学直径  $\leq 100 \mu\text{m}$  的颗粒物) 为主<sup>[2, 4, 9]</sup>,缺少对细小粒径颗粒物浓度及粒径分布的监测数据。此外,打印复印设备释放颗粒物的水平受多种因素影响,如打印机型号及使用时间、墨粉覆盖率、印刷速度、通风等<sup>[3-4, 8]</sup>。明确打印复印设备释放污染物的影响因素,对于提出切实可行的控制措施以降低颗粒物暴露水平有重要意义。本研究通过持续监测打印店内颗粒物浓度和粒径分布特征,揭示打印店颗粒物的真实暴露水平,并通过现场实验研究从室内温度、湿度、纸张定量和硒鼓类型的角度,探讨其对打印机释放颗粒物水平的影响,以期为从事打印复印相关工作人员的健康防护提供科学指导与依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要材料与仪器设备

A4 打印纸 (亚速旺, 日本), 国产兼容硒鼓 (格之格, 中国), 国产灌墨硒鼓 (迈思, 中国), 原装进口硒鼓 (HP, 美国), 激光打印机 (HP, 美国)。

GRIMM 11-A 便携式气溶胶粒径谱仪 (GRIMM, 德国), 电子温湿度仪 (柏奥易杰, 中国), P-TRAK 8525 超细粒子计数器 (TSI, 美国)。

### 1.2 打印店内颗粒物粒径分布与浓度监测

于 2019 年 12 月 23 日–2020 年 1 月 3 日, 选择位于北京市海淀区某高校内 3 家打印店, 记录各场所基本信息, 并开展室内颗粒物浓度与粒径分布监测工作。监测点设置在人员经常活动的地点, 于距离地面 1.0 m 高度, 采用 GRIMM 11-A 便携式气溶胶粒径谱仪实时连续监测颗粒物数量浓度 (单位以颗粒每立方厘米表示,  $\text{P}\cdot\text{cm}^{-3}$ )<sup>[10]</sup> 和质量浓度 (单位为  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 设定每 6 s 或每 1 min 测定一次。该粒径谱仪共 31 个粒径通道, 粒径测量范围覆盖 0.25~32.00  $\mu\text{m}$ , 可实时输出 31 个粒径通道的颗粒物数量浓度、质量浓度和  $\text{PM}_{10}$  (空气动力学直径  $\leq 10 \mu\text{m}$  的颗粒物)、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  的质量浓度。

采用电子温、湿度仪测量室内温度和相对湿度, 每小时记录一次。同时记录打印店内处于工作状态的打印机数量, 每分钟记录一次。室外颗粒物浓度采用该日北京市海淀区万柳监测站公布的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度数值。室内外  $\text{PM}_{2.5}$  的质量浓度比 (ratio of indoor and

outdoor PM<sub>2.5</sub> mass concentration, I/O) 采用每小时室内 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度均值除以每小时室外 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度均值进行计算获得<sup>[11]</sup>。

### 1.3 打印机释放颗粒物的影响因素模拟实验方法

**1.3.1 实验条件设置** 将一台激光打印机置于体积为 93.24 m<sup>3</sup> (6.39 m×5.98 m×2.44 m) 的办公室内, 实验时关闭门窗以控制通风影响, 采用空调和加湿器调节室内温度和湿度使其达到要求时, 才开始打印实验。采用黑白单面打印, 打印机进纸速度为每分钟 20 页, 打印内容为字母 a (每页 27 行, 每行 77 个字符, 字号小四, 字体 Times New Roman), 每次实验打印 20 页。采用 P-TRAK 8525 超细粒子计数器测定 PM<sub>1</sub> 数量浓度。经多次实验验证, 选择将仪器探针放置于距离出纸口 17 cm 处, 从打印开始前 2 min 到打印结束后 10 min 进行持续监测, 以打印工作前测定的 PM<sub>1</sub> 数量浓度平均值作为本底值, 使用打印工作中所测得的室内 PM<sub>1</sub> 数量浓度峰值减去该本底值作为实际打印过程中释放 PM<sub>1</sub> 的数量浓度峰值。相邻两次实验间隔时间超过 30 min, 并开窗通风, 以保证下一次实验开始时实验室的颗粒物浓度降至背景水平, 且每次打印工作前控制打印机加热辊的温度为 (22±4) °C。

**1.3.2 室内温度对打印机释放 PM<sub>1</sub> 的影响** 分别在 3 个不同的室内温度 (15、23、27°C) 下, 控制室内相对湿度为 26%~33%, 选用国产兼容硒鼓、70 g·m<sup>-2</sup> 的标准 A4 打印纸, 按照上述实验条件进行打印及 PM<sub>1</sub> 数量浓度的监测。实验至少重复 3 次。

**1.3.3 室内相对湿度对打印机释放 PM<sub>1</sub> 的影响** 分别在 3 个不同的室内相对湿度 (30%、45%、60%) 下, 控制

室内温度为 20~24°C, 选用国产兼容硒鼓、70 g·m<sup>-2</sup> 的标准 A4 打印纸, 按照上述实验条件进行打印及 PM<sub>1</sub> 数量浓度的监测。实验至少重复 3 次。

**1.3.4 纸张定量对打印机释放 PM<sub>1</sub> 的影响** 分别选用 2 种不同定量的纸张 (70 g·m<sup>-2</sup> 的标准 A4 打印纸、80 g·m<sup>-2</sup> 的标准 A4 打印纸), 控制室内温度 20~24°C、相对湿度 26%~33%, 选用国产兼容硒鼓, 按照上述实验条件进行打印及 PM<sub>1</sub> 数量浓度的监测。实验至少重复 3 次。

**1.3.5 硒鼓类型对打印机释放 PM<sub>1</sub> 的影响** 分别选用 3 种不同的硒鼓 (国产兼容硒鼓、国产灌墨硒鼓、原装进口硒鼓), 控制室内温度 20~24°C、相对湿度 26%~33%, 选用 70 g·m<sup>-2</sup> 的标准 A4 打印纸, 按照上述实验条件进行打印及 PM<sub>1</sub> 数量浓度的监测。实验至少重复 3 次。

### 1.4 统计学分析

采用 EXCEL 2019 进行数据录入, 采用 Stata 15.0 进行统计分析。正态分布和近似正态分布的计量资料采用均数±标准差进行描述, 两组间比较采用独立样本 *t* 检验, 多组间比较采用方差分析, 多组间的两两比较采用 Bonferroni 法; 非正态分布计量资料采用中位数 (*M*) 和百分位数 (*P*<sub>25</sub>~*P*<sub>75</sub>) 描述, 多组间比较采用 Kruskal-Wallis 检验, 多组间两两比较时直接采用 Wilcoxon 秩和检验, 并用 Bonferroni 法调整检验水准为 0.017。检验水准  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 打印店内颗粒物粒径分布与浓度

表 1 展示了 3 家打印店的基本情况。打印店 A、B、C 不同粒径颗粒物质量浓度的中位数: PM<sub>10</sub> 分别是

表 1 打印店基本信息和颗粒物水平

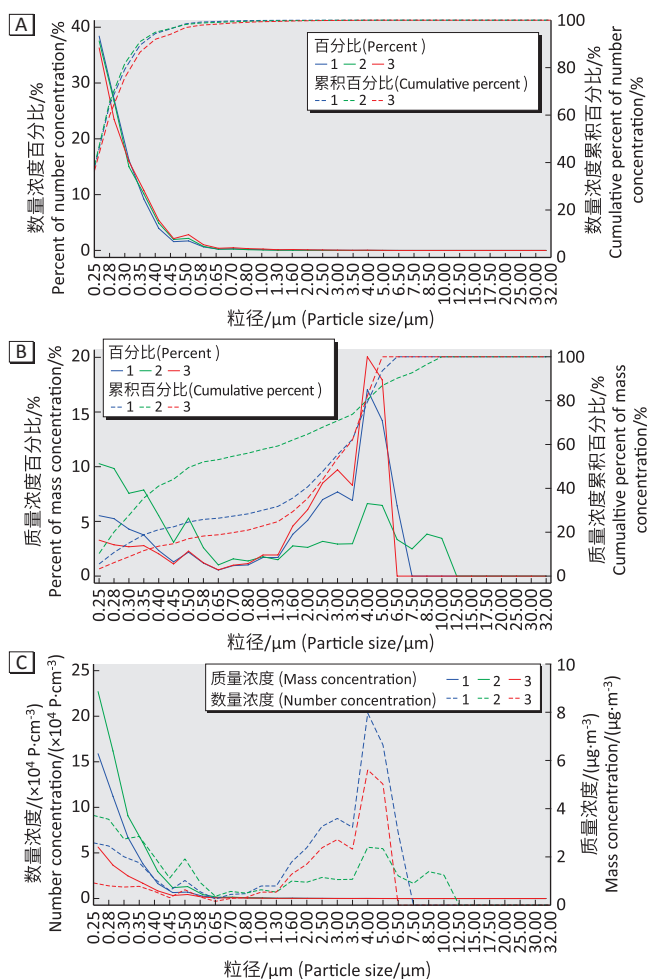
Table 1 Basic information and particle concentration of three print shops

| 项目 (Item)                                                                                                                   | 打印店 A (Print shop A)                                                        | 打印店 B (Print shop B)                                                                                       | 打印店 C (Print shop C)                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 楼层 (Floor)                                                                                                                  | 1                                                                           | -1 [下沉广场 (Sunken plaza)]                                                                                   | 1                                                              |
| 室内体积 / m <sup>3</sup> (Indoor volume / m <sup>3</sup> )                                                                     | 38.7                                                                        | 114.5                                                                                                      | 31.2                                                           |
| 打印机类型 (Printer type)                                                                                                        | 喷墨 (Ink-jet)                                                                | 激光 (Laser)                                                                                                 | 激光 (Laser)                                                     |
| 打印机数 (No. of printers)                                                                                                      | 6                                                                           | 7                                                                                                          | 5                                                              |
| 营业时间 (Business hours)                                                                                                       | 0:00—24:00                                                                  | 8:30—20:30                                                                                                 | 7:30—21:50                                                     |
| 温度 / °C (Temperature / °C)                                                                                                  | 20.40~22.40                                                                 | 18.70~25.50                                                                                                | 19.90~23.90                                                    |
| 相对湿度 / % (Relative humidity / %)                                                                                            | 13~18                                                                       | 10~15                                                                                                      | 16~19                                                          |
| 监测时室内通风情况 (Indoor air ventilation)                                                                                          | 窗关闭, 门开放 (有门帘)<br>Windows are closed, and doors<br>are open (with curtains) | 门窗关闭, 人员出入时门短暂开放<br>Doors and windows are closed, and doors are<br>open only when customers enter and exit | 半开放式, 与其他空间相连<br>Semi-open space, connected to<br>other spaces |
| 监测时长 / h (Monitoring time / h)                                                                                              | 14                                                                          | 12                                                                                                         | 15                                                             |
| 监测频率 / (s·次 <sup>-1</sup> ) [Monitoring frequency / (s·record <sup>-1</sup> )]                                              | 6                                                                           | 60                                                                                                         | 6                                                              |
| 监测次数 (No. of monitoring)                                                                                                    | 8367                                                                        | 671                                                                                                        | 8830                                                           |
| PM <sub>10</sub> 质量浓度 <sup>a</sup> / (μg·m <sup>-3</sup> ) [ <i>M</i> ( <i>P</i> <sub>25</sub> ~ <i>P</i> <sub>75</sub> )]  | 71.90 (59.20~84.20)                                                         | 69.30 (38.90~82.80)                                                                                        | 38.80 (32.80~47.30)                                            |
| PM <sub>2.5</sub> 质量浓度 <sup>b</sup> / (μg·m <sup>-3</sup> ) [ <i>M</i> ( <i>P</i> <sub>25</sub> ~ <i>P</i> <sub>75</sub> )] | 38.70 (30.40~45.70)                                                         | 39.90 (30.30~68.50)                                                                                        | 19.10 (16.90~20.90)                                            |
| PM <sub>1</sub> 质量浓度 <sup>c</sup> / (μg·m <sup>-3</sup> ) [ <i>M</i> ( <i>P</i> <sub>25</sub> ~ <i>P</i> <sub>75</sub> )]   | 28.20 (21.40~34.10)                                                         | 36.30 (27.10~62.50)                                                                                        | 11.40 (10.40~12.20)                                            |

[注 (Note)] Kruskal-Wallis 检验 (Kruskal-Wallis rank sum tests), a:  $\chi^2=9144.28$ ,  $P<0.05$ ; b:  $\chi^2=13058.68$ ,  $P<0.05$ ; c:  $\chi^2=13497.50$ ,  $P<0.05$ 。



71.90、69.30、38.80  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  分别是 38.70、39.90、19.10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{10}$  分别是 28.20、36.30、11.40  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。3 家打印店  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  的质量浓度差异有统计学意义 ( $P<0.05$ ), 两两比较差异有统计学意义 ( $P<0.017$ )。  $\text{PM}_{10}$  质量浓度大小顺序表现为打印店 A>B>C,  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  质量浓度大小顺序表现为打印店 B>A>C。如图 1 所示, 3 家打印店内颗粒物的数量粒径分布基本相同, 粒径  $\leq 0.50\mu\text{m}$  的颗粒物数量占 96% 以上 (图 1A), 且颗粒物数量比例随粒径变小而不断增多 (图 1A、图 1C), 其中  $\text{PM}_{0.5}$  数量浓度的变化范围为  $(1.01\sim 11.36)\times 10^5\text{P}\cdot\text{cm}^{-3}$  [ $M$  为  $2.21\times 10^5\text{P}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $P_{25}\sim P_{75}$  为  $(1.51\sim 4.13)\times 10^5\text{P}\cdot\text{cm}^{-3}$ ],  $\text{PM}_{10}$  数量浓度的变化范围为  $(1.03\sim 11.61)\times 10^5\text{P}\cdot\text{cm}^{-3}$  [ $M$  为  $2.26\times 10^5\text{P}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $P_{25}\sim P_{75}$  为  $(1.55\sim 4.19)\times 10^5\text{P}\cdot\text{cm}^{-3}$ ], 大小顺序表现为



[注] 1、2、3 分别代表打印店 A、B、C。

[Note] 1, 2, and 3 represent print shop A, B, and C.

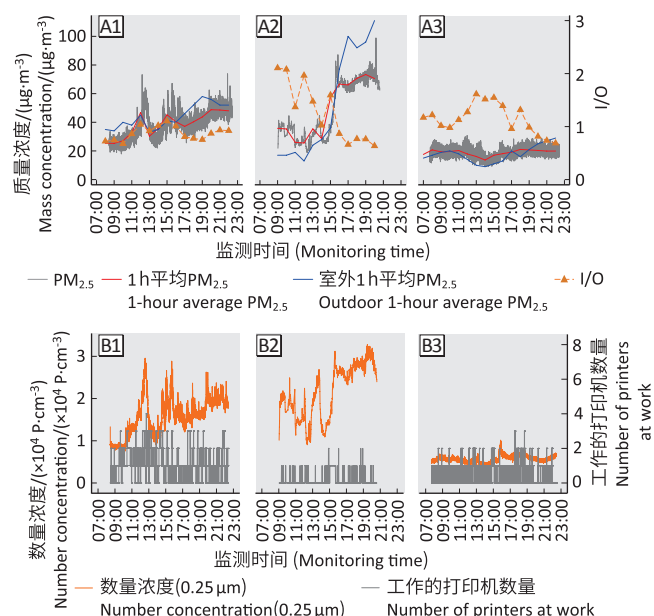
图 1 3 家打印店内颗粒物粒径分布 (A)、颗粒物质量粒径分布 (B)、不同粒径下颗粒物的浓度 (C)

Figure 1 The particle number size distribution (A), particle mass size distribution (B), and concentration of particles under different particle sizes (C) in three print shops

打印店 B>A>C; 3 家打印店的颗粒物质量粒径分布表现出双峰, 主要分布在  $0.25\sim 0.65\mu\text{m}$  和  $1.30\sim 7.50\mu\text{m}$ , 其中打印店 B 中  $0.25\sim 0.65\mu\text{m}$  小粒径颗粒物的质量占比略高, 而打印店 A 和 C 中  $1.30\sim 7.50\mu\text{m}$  的颗粒物质量占比略高 (图 1B、图 1C)。

## 2.2 打印店颗粒物浓度变化的影响因素分析

进一步分析打印店工作时间、同时工作的打印机数量和室外大气颗粒物污染对打印店内颗粒物浓度变化的影响。鉴于仅报告室外  $\text{PM}_{2.5}$  1h 质量浓度均值, 故计算打印店内  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度均值与之比较, 以增加室内外  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度可比性, 并计算 I/O 值。图 2A1~3 显示, 打印店 A、B、C 室内  $\text{PM}_{2.5}$  的瞬时质量浓度峰值分别为 73.80、98.80、30.70  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。随着工作时间的延长, 打印店 A 和 B 室内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度呈现波动上升的趋势, 打印店 C 的室内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在工作时间内较为稳定; 打印店室内外  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的变化趋势较一致。打印店 A 的 I/O 值较为稳定, 比打印店 B 和 C 的波动小, 打印店 B 的波动最大。3 家打印店的室内外  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的 I/O 值差异有统计学意义 ( $P<0.05$ ), 两两比较显示, 打印店 A 的 I/O 值小于打印店 B 的 I/O 值 ( $P<0.05$ ), 其他两两比较差异无统计学意义, 且打印店 B 和 C 的 I/O 值大于 1 (表 2)。图 2B1~3 显示, 在



[注] A:  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度随时间变化图; B:  $0.25\mu\text{m}$  颗粒物数量浓度随时间变化图。1、2、3 分别代表打印店 A、B、C。

[Note] A:  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration changes with time; B:  $0.25\mu\text{m}$  particle number concentration change with time. 1, 2, and 3 represent print shop A, B, and C.

图 2 3 家打印店室内颗粒物浓度随时间变化图

Figure 2 Indoor particle concentration changes over time in three print shops

打印店 A、B、C 中，当同时工作的打印机数量上升时，室内颗粒物的数量浓度也相应升高。

表 2 3 家打印店 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度 I/O 均值及变化范围  
Table 2 Mean and range of I/O of PM<sub>2.5</sub> mass concentration in three print shops

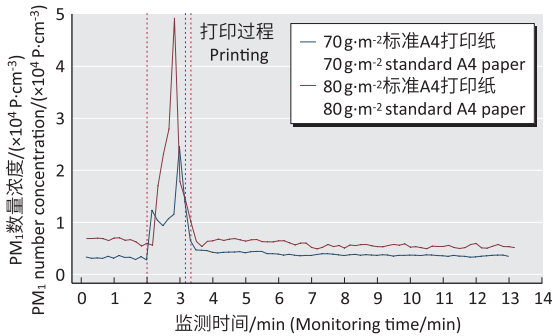
| 打印店 (Print shop) | I/O ( $\bar{x}\pm s$ ) | 最小值 (Min) | 最大值 (Max) | F    | P    |
|------------------|------------------------|-----------|-----------|------|------|
| A                | 0.88±0.13              | 0.68      | 1.10      | 4.61 | 0.02 |
| B                | 1.28±0.56*             | 0.64      | 2.11      |      |      |
| C                | 1.15±0.29              | 0.69      | 1.61      |      |      |

[注] \*：与打印店 A 比较， $P<0.05$ 。

[Note] \*: Compared with print shop A,  $P<0.05$ .

2.3 打印机释放颗粒物的影响因素分析

如图 3 所示，打印机释放颗粒物呈现出明显的“首峰效应”，即自打印工作开始之后颗粒物大量释放达到峰值，打印工作结束后迅速衰减，逐步恢复至本底值。打印工作过程中 PM<sub>1</sub> 数量浓度峰值远远高于本底值，说明打印机工作可以释放大量颗粒物，并对室内 PM<sub>1</sub> 数量浓度产生较大影响。此外，本研究还观察到当打印内容和页数均相同时，使用 80 g·m<sup>-2</sup> 的标准 A4 打印纸花费的总打印时间大于使用 70 g·m<sup>-2</sup> 的标准 A4 打印纸。



[注] 虚线部分为打印过程，红线表示 80 g·m<sup>-2</sup> 标准 A4 打印纸的打印过程，蓝线表示 70 g·m<sup>-2</sup> 标准 A4 打印纸的打印过程。

[Note] The dotted line is the printing process, red for 80 g·m<sup>-2</sup> standard A4 printing paper, and blue for 70 g·m<sup>-2</sup> standard A4 printing paper.

图 3 打印作业中的 PM<sub>1</sub> 数量浓度

Figure 3 PM<sub>1</sub> number concentration during selected printing jobs

表 3 显示不同实验条件下打印过程中释放 PM<sub>1</sub> 数量浓度峰值的情况，结果显示：室内相对湿度、纸张定量和硒鼓类型是打印过程中释放 PM<sub>1</sub> 的数量浓度峰值的影响因素 ( $P<0.05$ )。随着室内相对湿度的升高，打印过程中释放的 PM<sub>1</sub> 的数量浓度峰值有降低的趋势，且室内相对湿度为 30% 时打印过程中释放 PM<sub>1</sub> 的数量浓度峰值高于室内相对湿度为 45% 和 60% 时的峰值 ( $P<0.05$ )。使用 80 g·m<sup>-2</sup> 标准 A4 打印纸打印过程

中释放 PM<sub>1</sub> 的数量浓度峰值高于使用 70 g·m<sup>-2</sup> 标准 A4 打印纸的峰值 ( $P<0.05$ )。使用原装进口硒鼓时打印过程中释放的 PM<sub>1</sub> 的数量浓度峰值高于使用国产兼容硒鼓和国产灌墨硒鼓的峰值 ( $P<0.05$ )。此外，还观察到随着室内温度的升高，打印过程中释放的 PM<sub>1</sub> 的数量浓度峰值有升高的趋势，但 3 个不同温度组间差异没有统计学意义 ( $P>0.05$ )。

表 3 不同实验条件下打印过程中释放的 PM<sub>1</sub> 的数量浓度峰值  
Table 3 Peak values of PM<sub>1</sub> number concentration during printing under selected experimental conditions

| 实验条件<br>Experimental condition                                       | 实验次数<br>Number of test | PM <sub>1</sub> 数量浓度峰值 / ( $\times 10^4$ P·cm <sup>-3</sup> )<br>Peak number concentration of PM <sub>1</sub> / ( $\times 10^4$ P·cm <sup>-3</sup> ) | F/t   | P    |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|
| 室内温度 / °C<br>Indoor temperature / °C                                 |                        |                                                                                                                                                      |       |      |
| 15                                                                   | 4                      | 1.76±1.33                                                                                                                                            | 0.58  | 0.58 |
| 23                                                                   | 3                      | 1.95±0.64                                                                                                                                            |       |      |
| 27                                                                   | 3                      | 3.20±3.00                                                                                                                                            |       |      |
| 室内相对湿度 / %<br>Indoor relative humidity / %                           |                        |                                                                                                                                                      |       |      |
| 30                                                                   | 3                      | 1.95±0.64                                                                                                                                            | 9.65  | 0.01 |
| 45                                                                   | 4                      | 0.96±0.26*                                                                                                                                           |       |      |
| 60                                                                   | 4                      | 0.79±0.11*                                                                                                                                           |       |      |
| 纸张定量 / (g·m <sup>-2</sup> )<br>Paper grammage / (g·m <sup>-2</sup> ) |                        |                                                                                                                                                      |       |      |
| 70                                                                   | 3                      | 1.95±0.64                                                                                                                                            | -4.59 | 0.02 |
| 80                                                                   | 3                      | 5.25±1.07                                                                                                                                            |       |      |
| 硒鼓类型<br>Toner cartridge                                              |                        |                                                                                                                                                      |       |      |
| 国产兼容硒鼓<br>Domestic compatible toner cartridge                        |                        |                                                                                                                                                      |       |      |
|                                                                      | 3                      | 1.95±0.64*                                                                                                                                           | 7.44  | 0.01 |
| 国产灌墨硒鼓<br>Domestic refillable toner cartridge                        |                        |                                                                                                                                                      |       |      |
|                                                                      | 3                      | 1.90±1.22*                                                                                                                                           |       |      |
| 原装进口硒鼓<br>Imported original toner cartridge                          |                        |                                                                                                                                                      |       |      |
|                                                                      | 5                      | 9.85±4.70                                                                                                                                            |       |      |

[注] #：与室内相对湿度 30% 组相比， $P<0.05$ ；\*：与原装进口硒鼓相比，均  $P<0.05$ 。

[Note] #: Compared with 30% indoor relative humidity group,  $P<0.05$ ；\*：Compared with imported original toner cartridge group,  $P<0.05$ .

3 讨论

3 家打印店的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度中位数低于 GB 3095—2012《环境空气质量标准》<sup>[12]</sup> 所规定的 PM<sub>2.5</sub> 24 h 平均限值 (75 μg·m<sup>-3</sup>)，但打印店 B 的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度峰值高于该限值，这与高琰钧等<sup>[13]</sup> 的研究结果一致，提示应关注打印店室内瞬时高质量浓度颗粒物污染问题。澳大利亚昆士兰科技大学国际空气质量与健康研究所推荐的办公场所 PM<sub>1</sub> 接触阈值为

$2 \times 10^4 \text{ P} \cdot \text{cm}^{-3}$  [6], 本研究打印店中  $\text{PM}_{10}$  数量浓度范围为  $(1.03 \sim 11.61) \times 10^5 \text{ P} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 已经远远超过该接触阈值, 可见打印机释放小粒径颗粒物已对室内空气造成严重污染, 应当加强对打印店内细小粒径颗粒物的暴露水平监测, 并关注其对人体健康的影响。此外, 3 家打印店的颗粒物数量粒径分布一致, 且以粒径  $\leq 0.50 \mu\text{m}$  的颗粒物为主, 提示使用细小颗粒物数量浓度有利于比较不同打印店的颗粒物浓度水平。上述结果反映了颗粒物数量浓度是评估打印店室内污染的良好指标。

打印店内颗粒物来源包括打印机工作释放的颗粒物和室外大气颗粒物污染。打印机释放的颗粒物以小粒径颗粒物为主, 主要影响打印店内颗粒物数量浓度; 而室外大气颗粒物污染以微米颗粒物为主, 主要影响打印店内颗粒物质量浓度。打印店内颗粒物水平受工作时间的的影响相对较小, 但随工作的打印机数量增加而升高, 并与店内通风情况密切相关。本研究中打印店 A 在监测期间一直处于开门状态, 虽有门帘遮挡, 但密闭性差, 有利于室内外气体交换; 打印店 C 为半开放式, 与其他空间相连, 密闭性一般, 气体易于扩散至整个空间; 打印店 B 位于负一层下沉广场, 监测期间门窗均关闭, 仅在人员出入时大门短暂开启, 室内外气体交换相对较少, 因此监测期间 I/O 值大小表现为打印店  $A < C < B$ 。打印店 B 和 C 的 I/O 值大于 1, 可见打印店 B 和 C 室内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度高于室外  $\text{PM}_{2.5}$  浓度, 提示打印机释放的颗粒物是室内颗粒物污染的主要来源。但室外  $\text{PM}_{2.5}$  浓度对打印店内颗粒物水平有影响, 表现为通风较好的打印店 A 和 C 以粒径  $(1.30 \sim 7.50) \mu\text{m}$  的颗粒物质量占比较高 (受室外大颗粒物污染); 但通风情况最差的打印店 B 以粒径  $(0.25 \sim 0.65) \mu\text{m}$  的颗粒物质量浓度占比较大 (打印机释放小颗粒物为主)。3 家打印店的颗粒物数量浓度和  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  质量浓度大小顺序亦都表现为打印店  $B > A > C$ , 亦提示通风情况是影响打印店内颗粒物浓度水平的重要因素。

打印复印设备释放的颗粒物是打印复印设备在运行过程中发出的雾化墨粉与 VOCs 反应生成的复杂化学混合物, 这一过程受多种因素影响 [3-4, 14]。本研究通过实验揭示了室内相对湿度、纸张定量、硒鼓类型是打印机释放颗粒物的影响因素。随着室内相对湿度的升高, 打印过程中释放的  $\text{PM}_{10}$  峰值浓度有下降趋势, 主要原因是相对湿度上升会促进颗粒物凝聚发生沉降, 从而使颗粒物数量浓度下降 [15]。使用  $80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  的

标准 A4 打印纸打印过程中释放  $\text{PM}_{10}$  的数量浓度峰值高于使用  $70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  的标准 A4 打印纸, 而且相同打印工作量时使用  $80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  的标准 A4 打印纸所花费的时间大于  $70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  的标准 A4 打印纸, 一方面可能是  $80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  的标准 A4 打印纸在激光打印的定影过程中, 由于纸张更厚, 需要更长的时间才能将纸张加热到所需温度, 从而导致打印时间延长, 延长的加热定影过程使得纸张吸附的墨粉更易脱落释放, 从而造成所释放的  $\text{PM}_{10}$  的数量浓度峰值升高; 另一方面, 纸张也是打印机释放颗粒物来源之一 [16], 较厚纸张本身也可能有更多颗粒物释放, 但确切原因仍需要进一步深入研究验证。使用不同硒鼓时打印机释放颗粒物浓度有差异, 国产灌墨硒鼓、国产兼容硒鼓和原装进口硒鼓释放  $\text{PM}_{10}$  的数量浓度峰值依次增高, 而且原装进口硒鼓时打印过程中释放的  $\text{PM}_{10}$  的数量浓度峰值远远高于使用国产兼容硒鼓和国产灌墨硒鼓。造成这些差异的可能原因有: ①不同制造商的硒鼓中所含墨粉的来源、成分与含量不同, 使得打印过程中产生的雾化墨粉、残余墨粉与 VOCs 不同, 进而影响颗粒物形成与释放水平; ②不同制造商的硒鼓制造工艺不同, 造成其在打印过程中的残余墨粉、雾化墨粉含量不同, 从而导致使用不同硒鼓时打印机释放颗粒物浓度间的差异, 具体原因尚需在更多类型的硒鼓中进一步探究。此外, 研究结果显示随着室内温度升高, 打印过程中释放  $\text{PM}_{10}$  的数量浓度峰值有增高的趋势, 但差异未现统计学意义。

本研究存在一些不足之处。首先, 在打印店颗粒物浓度监测期间, 受限于测试仪器不足, 未能同时监测室外颗粒物浓度。采用室外监测站点的数据与室内颗粒物监测结果进行比较, 发现室外颗粒物污染对打印店内颗粒物水平有影响, 提示在未来研究中应同时进行室内外浓度监测, 获得实时可比的数据。其次, 使用的气溶胶粒径谱仪测定粒径范围  $(0.25 \sim 32.00 \mu\text{m})$  偏大, 考虑到打印店释放粒径  $\leq 0.50 \mu\text{m}$  的颗粒物为主, 今后应选用测量更小粒径范围的气溶胶粒径谱仪, 如纳米颗粒粒径谱仪, 进行打印店内颗粒物浓度监测。另外, 仅对 3 家打印店分别进行了 1 d 的颗粒物浓度实时监测, 且未同时关注打印机释放臭氧和 VOCs 对空气的污染问题。今后可以在不同季节分别对多家不同特征打印店的颗粒物、臭氧和 VOCs 浓度进行长期监测, 全面评估打印店内空气污染情况, 了解作业人员暴露水平。此外, 在打印机释放颗粒物影响因素的研究中, 仅关注了 4 个影响因素, 且单个实验条件



下重复实验次数相对较少,使得测试数据的标准差偏大。考虑到打印店内工作环境温度多处于15~27℃,故本实验设置了15、23、27℃,以侧重现实意义,但也存在温度间距小的问题,这可能也是本研究观察到打印机释放PM<sub>1</sub>的数量浓度峰值随室温升高有增高的趋势,但未达到差异有统计学意义水平的原因之一。以后的研究中可以增大温度间距,深入探讨温度对打印机释放颗粒物的影响。

综上所述,打印店内颗粒物数量粒径分布情况一致,以粒径≤0.50 μm的颗粒物数量最多,且颗粒物数量浓度和颗粒物质量浓度峰值较高,提示应关注打印店内细小颗粒物的污染水平及其对健康的危害效应,并推荐使用颗粒物数量浓度来评价打印店室内颗粒物污染水平。改善打印店内通风情况,室内保持一定相对湿度,选择合适定量的纸张和适宜硒鼓,将有助于降低打印店内颗粒物污染水平,从而保护劳动者与接触人群的身体健。在未来研究中,还应同时关注打印机释放污染物(包括颗粒物、臭氧和VOCs)之间的相互作用。

## 参考文献

- [1] HE C, MORAWSKA L, TAPLIN L. Particle emission characteristics of office printers [J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41 (17): 6039-6045.
- [2] VICENTE ED, RIBEIRO JP, CUSTÓDIO D, et al. Assessment of the indoor air quality in copy centres at Aveiro, Portugal [J]. *Air Qual Atmos Health*, 2017, 10 (2): 117-127.
- [3] 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]. *Ann Work Expo Health*, 2017, 61 (1): 110-122.
- [4] 吕利枝, 段淑敏, 王云. 打印复印设备释放污染物与健康效应 [EB/OL]. [2020-05-29]. <http://www.zgggws.com/cn/article/doi/10.11847/zgggws1122236? viewType=HTML>.
- [5] SHI X, CHEN R, HUO L, 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]. *J Nanosci Nanotechnol*, 2015, 15 (12): 9554-9564.
- [6] 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.
- [7] 朱维斌, 胡楠, 尹招琴. 室内打印机颗粒污染物特性的测量与分析 [J]. *环境科学与技术*, 2011, 34 (5): 104-107.
- [8] WENSING M, SCHRIPP T, UHDE E, et al. Ultra-fine particles release from hardcopy devices: Sources, real-room measurements and efficiency of filter accessories [J]. *Sci Total Environ*, 2008, 407 (1): 418-427.
- [9] 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.
- [10] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 工作场所空气中粉尘测定 第6部分: 超细颗粒和细颗粒总数量浓度 [EB/OL]. [2020-03-17]. <http://www.nhc.gov.cn/wjw/pyl/201807/8e4e4ce9ba9f4f9d9087181ed748ddb8.shtml>.
- [11] 石晶金, 陈非儿, 时文明, 等. 上海市居民住宅室内外颗粒物浓度及其影响因素研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2018, 35 (8): 667-671.
- [12] 环境空气质量标准: GB 3095—2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [13] 高琰钧, 魏玉虾, 陈俏, 等. 打印店内PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>1</sub>的特征与影响因素分析 [J]. *中华预防医学杂志*, 2019, 53 (3): 284-288.
- [14] TANG T, HURRAB J, GMINSKI R, et al. Fine and ultrafine particles emitted from laser printers as indoor air contaminants in German offices [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2012, 19 (9): 3840-3849.
- [15] 李灿, 崔术祥, 杨维, 等. 相对湿度对室内细颗粒物粒径分布影响的试验研究 [J]. *安全与环境学报*, 2014, 14 (4): 254-258.
- [16] PIRELA S V, SOTIRIOU GA, BELLO D, et al. Consumer exposures to laser printer-emitted engineered nanoparticles: A case study of life-cycle implications from nano-enabled products [J]. *Nanotoxicology*, 2015, 9 (6): 760-768.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 汪源)