

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.03.2015060201

韩文亮, 陈海明, 陈兴童. 厦门室内降尘的沉降通量与季节变化[J]. 环境化学, 2016, 35(3): 491-499
HAN Wenliang, CHEN Haiming, CHEN Xingtong. Deposition flux and seasonal variations of indoor dustfall in Xiamen, China[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(3): 491-499

厦门室内降尘的沉降通量与季节变化 *

韩文亮^{1,2**} 陈海明^{1,2} 陈兴童^{1,2}

(1. 华侨大学化工学院环境科学与工程系, 厦门, 361021; 2. 华侨大学环境与资源技术研究所, 厦门, 361021)

摘 要 在厦门市选取家庭、办公室、机房和家具厂等采样点 49 个, 用水平放置的玻璃板(四周用洁净铝箔围起)采集一年四季的降尘样品, 对降尘的沉降通量和季节变化进行研究. 厦门家庭、办公室、机房和家具厂全年室内降尘通量几何均值分别为 13.1、7.2、4.9、179.9 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 厦门家庭和办公室室内降尘通量均是上海的约 2 倍, 是美国新泽西州室内的近 5 倍. 机房室内降尘通量低于普通办公环境, 家具厂室内降尘通量比普通室内环境高 1-2 个数量级. 季节对室内降尘通量有显著影响, 而市区和城郊间降尘通量无显著差异. 家庭和办公室冬季降尘通量最低, 家庭降尘通量最高为夏季, 办公室为秋季. 各室内采样点降尘通量季节变化较一致, 表明室内降尘主要源于室外空气中的颗粒物. 机房因常年封闭, 四季降尘通量间均无显著差异. 家具厂降尘通量的季节变化主要受家具生产量波动的影响.

关键词 室内, 降尘, 沉降通量, 季节变化, 厦门.

Deposition flux and seasonal variations of indoor dustfall in Xiamen, China

HAN Wenliang^{1,2**} CHEN Haiming^{1,2} CHEN Xingtong^{1,2}

(1. Department of Environmental Science and Engineering, College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen, 361021, China;
2. Institute of Environmental and Resources Technology, Huaqiao University, Xiamen, 361021, China)

Abstract: Seasonal dustfall samples were collected from 49 indoor sampling sites, which include homes, offices, computer rooms and furniture factories, in Xiamen, China, using glass plates (walled by clean aluminum foil). Deposition flux and seasonal variations of dustfall were studied. The geometric mean of the annual deposition flux of dustfall in homes, offices, computer rooms and furniture factories were 13.1, 7.2, 4.9 and 179.9 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ respectively. The deposition flux of dustfall in homes and offices of Xiamen was about 2 times that in Shanghai, China, and about 5 times of that in New Jersey, USA. The deposition flux of dustfall in computer rooms was lower than that in offices. Whereas the indoor deposition flux of dustfall in furniture factories was 1—2 order higher than that in homes and offices. Seasons significantly influenced the deposition flux of indoor dustfall, but no significant urban to suburban difference was found. The lowest deposition flux of dustfall was found in winter for both homes and offices, whereas the highest flux was found in

2015 年 6 月 2 日收稿(Received: June 2, 2015).

* 国家自然科学基金(41203077); 福建省自然科学基金(2011J05112); 泉州市科技计划项目(2012Z85); 华侨大学引进人才启动项目(11BS216)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41203077), Natural Science Foundation of Fujian Province, China (2011J05112), Science and Technology Project of Quanzhou, China (2012Z85) and Start-up Project for Talents of Huaqiao University (11BS216).

* * 通讯联系人, E-mail: wl_han@163.com

Corresponding author, E-mail: wl_han@163.com

summer for homes and autumn for offices. The seasonal variations of dustfall deposition flux among the sampling sites were consistent, indicating that indoor dustfall was mainly from particles in the outdoor air. Being closed nearly all the times, the deposition flux of dustfall in computer rooms showed no significant seasonal variation. While the seasonal variations of dustfall deposition flux in the furniture factories were in accordance with the fluctuations of the manufacturing output.

Keywords: indoor, dustfall, deposition flux, seasonal variation, Xiamen.

普通人每天约 90% 的时间是在室内度过的^[1-2], 随着网络、通讯等技术的发展, 人们在家庭、办公室等室内环境中度过的时间比以往更多^[3]. 室内空气中对人体有害的污染物众多, 且在近几十年随着各种新的室内设备和建筑材料的使用而越来越多^[3-8]. 许多新发现的污染物不仅在室内环境中检出, 同时也在室内人员的血液^[9-11]、尿液^[3]和头发^[12]等之中检出. 室内降尘是众多对人体健康有害污染物的重要载体^[5, 9, 13-18]. 室内降尘因其对人体健康的影响而日益受到关注^[5, 19-21]. 污染物随颗粒物沉降后因室内空气流通缓慢、难以降解而积累, 颗粒物可加快半挥发性有机污染物 (SVOCs) 的气相传质速率, 造成灰尘中污染物含量远大于该物质气固分配理论平衡含量, 使其人体暴露量提高 4—10 倍^[22], 因此室内灰尘是 SVOCs 的重要汇^[22-23], 同时也被认为是人体对多种污染物暴露的最重要的途径 (源)^[5, 23].

室内空气中颗粒物的沉降是影响室内空气质量的重要因素^[24-25], 对其沉降通量进行研究, 可为定量研究负载于室内灰尘中污染物的沉降通量提供基础数据. 目前关于空气中降尘通量的研究大多集中于室外^[26-28], 对室内的研究非常少^[29-30]. 而有关于室内灰尘的研究中, 污染物的研究较多, 且大多使用吸尘器或刷子收集灰尘, 仅可得到污染物的质量浓度, 无法计算其沉降通量. 由于不同室内采样点的清扫周期不同, 吸尘器或刷子采集的灰尘累积时间段不确定, 给采样点间横向比较, 尤其是季节变化研究带来困难. 此外, 新近研究发现, 吸尘器收集的灰尘中污染物的含量与室内人员血液中该物质含量的相关性较差, 不适用于估算其人体暴露剂量^[10]. 吸尘器因设计原理问题, 对细颗粒存在“喷尘器”作用^[31-32], 人为造成不同粒径颗粒物的采集效率不同, 采集的灰尘与自然沉降的降尘存在差异. 吸尘器电机运转时也会释放颗粒物^[33-35], 且很大部分可被吸入集尘袋中^[35], 造成污染. 擦拭地面和玻璃窗的方式采集室内灰尘样品^[10, 36]也无法计算降尘通量, 且因室内地面和玻璃窗经常清扫, 灰尘采集量少造成检出困难^[10], 地面复杂的污染来源也给目标物的研究带来干扰^[37].

笔者曾用水平放置的玻璃板对上海家庭、办公室室内降尘通量进行研究^[29], 但该研究采样点较少, 且未考虑季节变化, 无法了解室内全年降尘通量的整体情况和变化. 基于以上讨论, 本研究以厦门市为例, 选取家庭、办公室、机房和家具厂等室内环境, 采集一年四季室内降尘样品, 研究城市不同室内环境中降尘的沉降通量及其季节变化, 为负载于室内降尘中各种有害物质的沉降通量和人体暴露水平研究提供必要的基础数据.

1 实验部分 (Experimental part)

1.1 样品采集

在厦门市选取 23 个家庭、17 个办公室、5 个机房 (大型交换机房、服务器室和中控室等) 和 4 个家具厂室内降尘采样点, 采样点分布见图 1, 采样点信息见表 1 和表 2. 采样点共计 49 个, 其中厦门市区 (岛内) 29 个, 城郊 (岛外) 20 个. 采样点覆盖厦门市所有 6 个行政区, 包括岛内的思明和湖里区, 岛外的集美、海沧、翔安和同安区. 其中, 岛内主要是商业和住宅区, 以及少量工业区; 岛外则有文教区、住宅区和工业区等. 每个采样点水平放置两块 25 cm × 32 cm 的玻璃板 (四周用洁净铝箔围起) 收集四季降尘, 采样时间为 2011 年 12 月—2012 年 12 月, 每个季节采样时间为 3 个月 (约 90 d), 除 3 个冬季家庭降尘和 3 个家具厂降尘 (春季 1 个, 夏季两个) 丢失外, 共收集到有效降尘样品 190 个.

1.2 实验方法

玻璃板使用前用铬酸洗液清洗干净烘干后, 用乙醇浸泡, 使用前用丙酮润洗, 干燥后用洁净铝箔包裹带至采样点, 放置在室内无人触及的桌面、柜顶等地方. 采样结束后用 5 张干净无尘纸 (Kimwipes,

Kimberly-Clark, US)滴加丙酮/正己烷(1:1)溶剂后仔细擦拭玻璃板以收集采集到的降尘,含样无尘纸包好后置于洁净的铝箔中.无尘纸采样前后均在恒温恒湿箱(25℃,60%)中放置24 h后,使用两台0.1 mg分析天平称重(互为校正),两台天平称重差异小于0.5 mg(大多数小于0.2 mg).无尘纸使用前依次用甲醇和丙酮/正己烷(1:1)索氏抽提各36 h.

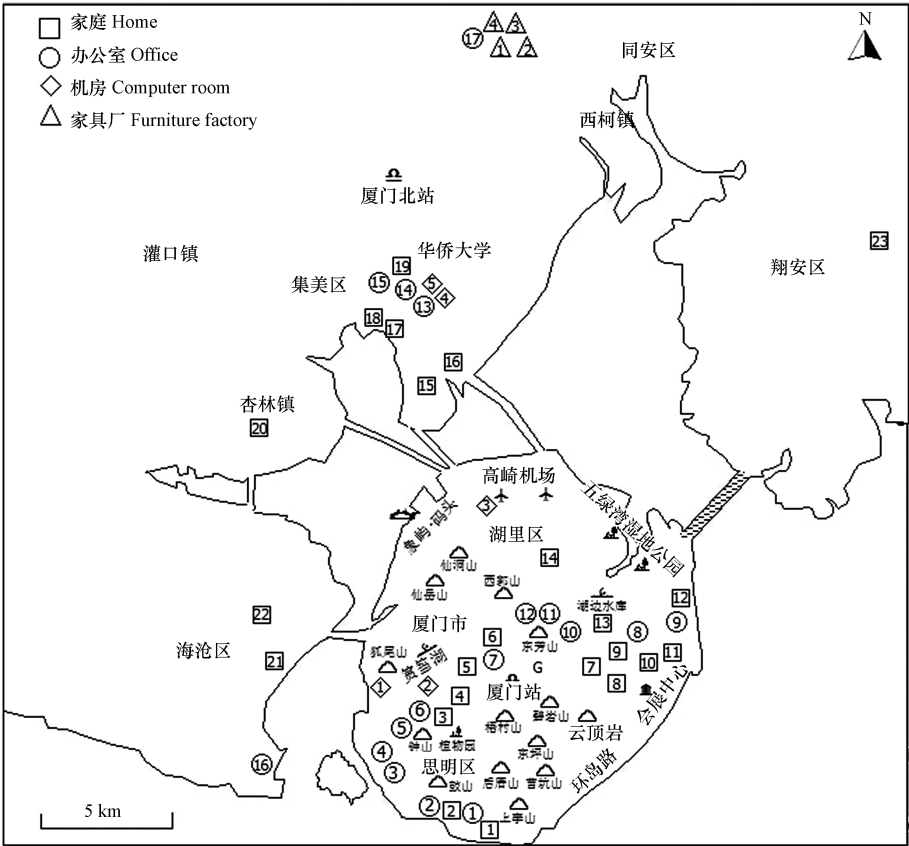


图 1 厦门室内降尘采样点地图

Fig.1 Map of the sampling sites for indoor dustfall in Xiamen, China

表 1 家庭采样点信息调查表

Table 1 Questionnaires on the home sampling sites in Xiamen, China

编号 No.	岛内/外 In/out Xiamen island	街道 Rd.	面积 Area/ m ²	装修年份 Year of decoration	空调类型 AC type	使用时长 Using time/ (h·d ⁻¹)	地面类型 Floor type	沙发类型 Sofa type	通风习惯 Ventilation habit
H1	岛内	珍珠湾	12	2000	壁挂	3	瓷砖	布面	开窗换气 8 h·d ⁻¹
H2	岛内	演武路	25	2009	壁挂	4	瓷砖	无	开窗换气
H3	岛内	将军祠路	35	1990	壁挂	4	瓷砖	木质	开窗换气
H4	岛内	湖滨中路	19	1990	壁挂	5	瓷砖	布面	开窗换气 6 h·d ⁻¹
H5	岛内	槟榔新村	40	2009	柜机	3	瓷砖	皮革	开窗换气 2 h·d ⁻¹
H6	岛内	长青路	35	2007	壁挂	3	瓷砖	布面	开窗换气
H7	岛内	洪莲西里	45	2005	壁挂	5	瓷砖	皮革	开窗换气 1 h·d ⁻¹
H8	岛内	洪文五里	30	2007	壁挂	4	瓷砖	布面	开窗换气
H9	岛内	洪文一里	35	2000	柜机	4	木地板	皮革	开窗换气, 全天
H10	岛内	文兴一里	10	1999	无	0	瓷砖	木质	开窗换气 16 h·d ⁻¹
H11	岛内	文兴东二里	10	2000	无	0	瓷砖	无	开窗换气 16 h·d ⁻¹
H12	岛内	塔埔东里	40	2008	壁挂	2	瓷砖	无	开窗换气
H13	岛内	洪莲路	50	2010	中央空调	1	木地板	皮革	开窗换气 2 h·d ⁻¹
H14	岛内	枋湖东二路	10	2008	壁挂	1	木地板	皮革	开窗换气

续表1

编号 No.	岛内/外 In/out Xiamen island	街道 Rd.	面积 Area/ m ²	装修年份 Year of decoration	空调类型 AC type	使用时长 Using time/ (h·d ⁻¹)	地面类型 Floor type	沙发类型 Sofa type	通风习惯 Ventilation habit
H15	岛外	集岑路	40	2007	壁挂	0	木地板	皮革	开窗换气 2 h·d ⁻¹
H16	岛外	盛光路	20	2010	壁挂	1	瓷砖	皮革	开窗换气
H17	岛外	集美大道	15	2009	无	无	瓷砖	布面	开窗换气 24 h·d ⁻¹
H18	岛外	集美大道	15	2009	壁挂	0	瓷砖	布面	开窗换气 24 h·d ⁻¹
H19	岛外	华侨大学	13	2007	壁挂	2	瓷砖	无	开窗换气 18 h·d ⁻¹
H20	岛外	日东路	30	2009	壁挂	4	瓷砖	布面	开窗换气 12 h·d ⁻¹
H21	岛外	沧里东一里	40	2009	壁挂柜机	4	瓷砖	皮革	开窗换气
H22	岛外	沧翔路	40	2008	无	0	瓷砖	皮革	开窗换气 12 h·d ⁻¹
H23	岛外	翔安大道	30	2003	壁挂	6	瓷砖	无	开窗换气 12 h·d ⁻¹

表 2 办公室(O)、机房(C)和家具厂(F)采样点信息调查表

Table 2 Questionnaires on the office (O), computer room (C) and furniture factory (F) sampling sites in Xiamen, China

编号 No.	岛内/外 In/out Xiamen island	街道 Rd.	面积 Area/ m ²	装修年份 Year of decoration	打印机 台数 No. of printers	复印机 台数 No. of copiers	电脑台数 No. of PCs	空调类型 AC type	使用时长 Using time/ (h·d ⁻¹)	地面类型 Floor type	沙发类型 Sofa type	通风习惯 Ventilation habit
O1	岛内	珍珠湾软件园	300	2005	0	0	100	中央空调	10	地毯	布面	空调换气
O2	岛内	民族路	35	—	2	2	1	中央空调	3	木地板	布面	开窗换气
O3	岛内	鹭江道	30	2011	1	0	8	中央空调	12	地毯	布面	空调换气
O4	岛内	鹭江道	80	—	0	0	20	中央空调	3	地毯	布面	开窗换气 3 h·d ⁻¹
O5	岛内	厦禾路	40	2005	1	1	2	柜机;	5	瓷砖	皮革	开窗换气 8 h·d ⁻¹
O6	岛内	禾祥西路	125	2009	1	0	6	柜机	1	地毯	布面	开窗换气 3 h·d ⁻¹
O7	岛内	长青路	100	—	0	3	10	柜机	8	瓷砖	皮革	开窗换气 2 h·d ⁻¹
O8	岛内	望海路	50	2007	1	0	5	中央空调	8	瓷砖	布面	开窗换气 4 h·d ⁻¹
O9	岛内	观音山商务中心	250	2011	1	1	20	中央空调	7	瓷砖	布面	开窗换气 8 h·d ⁻¹
O10	岛内	云顶中路	200	2011	1	2	14	中央空调	10	地毯	无	空调换气
O11	岛内	后埔西二里	150	—	0	1	3	柜机	1	瓷砖	皮革	开窗换气 8 h·d ⁻¹
O12	岛内	后埔西二里	60	—	0	0	1	柜机	5	地毯	皮革	开窗换气
O13	岛外	集美大道	100	2006	1	0	14	柜机	2	瓷砖	皮革	开窗换气
O14	岛外	集美大道	600	2011	0	0	0	中央空调	8	瓷砖	木质	开窗换气
O15	岛外	集美大道	30	2006	0	0	0	壁挂	6	瓷砖	皮革	开窗换气
O16	岛外	海沧大道	40	2007	1	1	2	中央空调	24	瓷砖	皮革	空调换气
O17	岛外	同安工业园	20	2005	2	0	4	壁挂	6	瓷砖	布面	空调换气
C1	岛内	湖滨中路	40	2008	0	0	2	中央空调	24	木地板	无	空调换气
C2	岛内	湖滨北路	20	—	2	3	14	中央空调	24	木地板	布面	空调换气
C3	岛内	高崎机场	15	2010	0	0	2	中央空调	24	地板	布面	开窗换气
C4	岛外	集美大道	200	2006	0	0	45	柜机	4	地板	皮革	开窗换气 12 h·d ⁻¹
C5	岛外	集美大道	300	2006	0	0	2	柜机	24	地板	无	空调换气
F1	岛外	同安工业园	200	2005	0	0	0	无	0	水泥	无	开窗换气 10 h·d ⁻¹
F2	岛外	同安工业园	400	2005	0	0	1	无	0	水泥	无	开窗换气 10 h·d ⁻¹
F3	岛外	同安工业园	400	2005	0	0	0	无	0	水泥	无	开窗换气 10 h·d ⁻¹
F4	岛外	同安工业园	200	2005	0	0	0	无	0	水泥	无	排气扇换气

注: AC: air conditioning.

室外沉降通量的常用研究方法由于采样面积相对较小,而且会对日常生活产生一定影响,因此不大适用于室内采样,而玻璃板采样法则可以克服以上的缺点.此外,室内环境中风等外来扰动较少,通过四周围起铝箔也可减弱采集颗粒物的再悬浮现象.所以尽管采样方法与传统降尘沉降通量采样方法有一定差别,本研究计算的沉降通量应该仍具有很好的参考价值.

1.3 统计软件和方法

数据的统计分析(正态分布检验、相关性分析、单因素方差分析、双因素方差分析等)使用 SPSS 16.0 软件完成.如无特殊说明,显著性水平 $\alpha=0.05$.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 年均室内降尘通量

厦门市家庭、办公室、机房和家具厂采样点室内四季降尘通量(图 2)均符合正态分布(Kolmogorov-Smirnov test, $\alpha=0.05$, SPSS 16.0),但部分类型和季节的室内降尘通量正态检验 P 值较低,且更符合对数正态分布,因此以下讨论中如无特殊说明,均使用几何均值(GM).

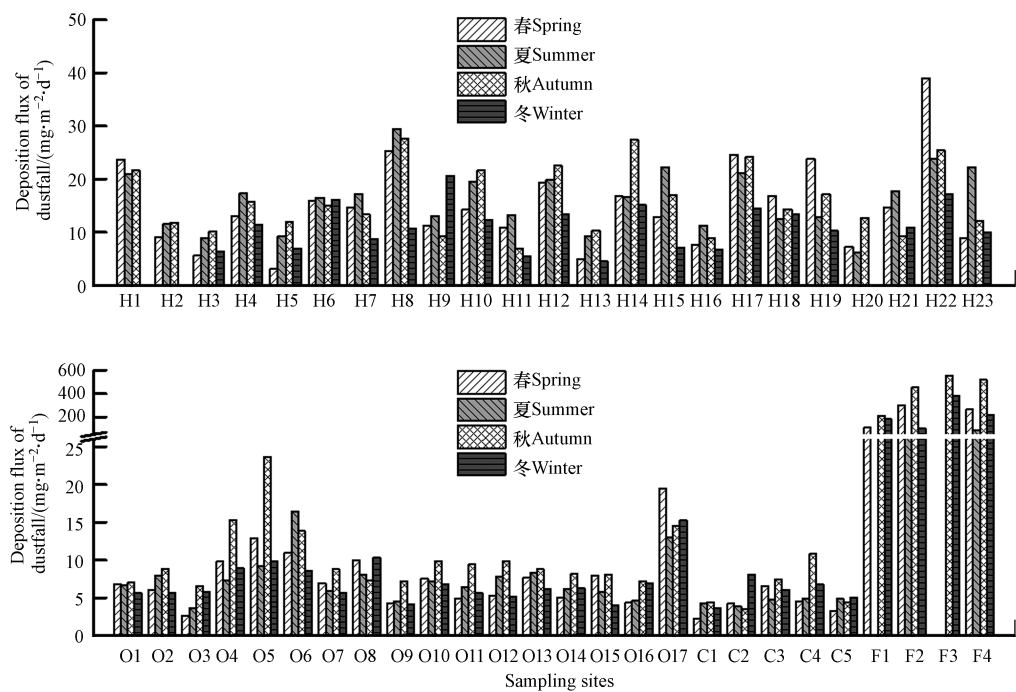


图 2 厦门市各室内采样点四季降尘通量

Fig.2 Seasonal deposition flux of dustfall in every indoor sampling site in Xiamen, China

厦门家庭室内环境年均降尘通量为 $13.1 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 是上海家庭室内降尘通量的 1.7 倍(表 3). 厦门办公室年均降尘通量为 $7.2 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ (不含家具厂办公室 O17), 是上海办公室内降尘通量的 2 倍. 厦门家庭和办公室室内降尘通量均比上海更高. 由于室外空气中的颗粒物是室内降尘主要来源之一^[38], 较高的室内降尘通量可能与厦门近年大规模密集的城市建设(如大量的房地产开发建设, 交通和城市基础设施等市政工程建设)有关. 与国外相比, 厦门室内降尘通量是美国新泽西州室内的近 5 倍^[30]. 以上与国内外的比较表明厦门室内环境降尘通量处于相对较高水平. 厦门机房(大型交换机房, 服务器室和中控室等)室内年均降尘通量 $4.9 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 低于办公室和家庭. 这是由于采样机房多为全封闭环境(大型交换机房、服务器室等), 室内恒温且日常很少有人进入, 受外界空气中颗粒物的影响小. 家具厂车间室内沉降通量 $179.9 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 远高于其他室内环境, 甚至高于部分室外环境(表 3).

2.2 降尘通量的季节变化与来源分析

家庭室内降尘通量的双因素方差分析(Two-Way ANOVA, $\alpha=0.05$, SPSS 16.0)表明, 季节对家庭室内降尘通量有显著影响($P=0.042$), 岛内(市区, H1—H14)或岛外(城郊, H15—H23)的不同对降尘通量无显著影响($P=0.412$). 由于家庭各采样点之间的降尘通量差异大(岛内家庭各季节降尘通量最大值是最小值的 4.0—8.4 倍, 岛外家庭各季节最大值是最小值的 2.6—5.4 倍), 而岛内外家庭各季节降尘通量几何均值比(0.78—1.00)和中值比(0.93—1.04)较接近 1, 所以组内方差大于组间方差, 造成岛内(市区)和岛外(城郊)间的降尘通量无显著差异. 这也表明, 相比城郊差异, 室内降尘通量大小更多受局地室内外环境的影响. 季节对降尘通量影响的多重比较(Post-Hoc multiple comparisons, LSD)进一步表明, 冬季和夏、秋季降尘通量存在显著差异($P=0.011, 0.016$), 冬季和春季存在较显著差异($P=0.056$), 但春

季和夏、秋季不存在显著差异($P=0.506、0.600$).

表 3 厦门室内降尘通量与其他地区的比较($\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$)

Table 3 Comparison of indoor dustfall deposition flux in Xiamen with other areas around the world ($\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$)

国家 Country	城市/地区 City/region	采样点类型 Type of sampling sites	样品类型 Sample type	几何均值 Geometric mean	中值 Median	算数均值 Mean	标准差 SD	范围 Range	文献 Ref.
美国	新泽西州	家庭	降尘	—	—	夏:3.7, 冬:2.2	夏:1.3, 冬:1.3	夏:2.4—4.9, 冬:1.8—2.5	[30]
中国	上海	家庭	降尘	7.9	8.8	8.9	4.2	3.9—15.9	[29]
中国	上海	办公室	降尘	3.6	2.9	6.2	8.4	1.3—26.4	[29]
中国	厦门	家庭	降尘	13.1	14.3	14.5	6.6	3.0—39.0	本研究
中国	厦门	办公室	降尘	7.2	6.9	7.7	3.3	2.7—23.6	本研究
中国	厦门	机房	降尘	4.9	4.6	5.2	2.0	2.2—10.9	本研究
中国	厦门	家具厂	降尘	179.9	231.7	235.9	167.7	45.7—549.2	本研究
韩国	Daeyeon-dong	城市室外	总沉降	—	—	112.6	—	55.6—217.0	[28]
韩国	Wolpo-dong	城市室外	总沉降	—	—	118.4	—	35.1—238.4	[28]
韩国	Gijang-gun	郊区室外	总沉降	—	—	63.3	—	23.6—105.8	[28]
韩国	Haengam-dong	乡村室外	总沉降	—	—	53.4	—	13.9—143.3	[28]

家庭降尘通量冬季最低($10.2\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$),夏季最高($15.1\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$)(表 4),且夏季降尘通量显著高于冬季($P=0.00015$).这与美国新泽西州家庭室内降尘研究一致^[30],而与文献报道的室外降尘通量的季节变化相反^[27],其原因在于家庭室内环境夏季开窗较多,且风力较大,受室外空气中颗粒物的影响较大^[30];同时也说明室内环境降尘通量的变化规律与室外并不一致,有其自身特点.

表 4 厦门市家庭、办公室、机房和家具厂四季室内降尘通量($\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$)

Table 4 Seasonal deposition flux of indoor dustfall in homes, offices, computer rooms and furniture factories in Xiamen, China ($\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$)

类型 Type 季节 Season	家庭 Home				办公室 Office			
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
几何均值 GM	12.7	15.1	14.7	10.2	6.6	6.9	9.4	6.4
中值 Median	14.2	16.6	14.3	10.8	6.9	6.9	8.8	6.1
算数均值 Mean	14.9	16.2	15.9	11.0	7.1	7.3	10.0	6.6
标准差 SD	8.3	5.7	6.4	4.3	2.8	2.9	4.3	1.9
最小值 Min	3.0	6.2	6.9	4.4	2.7	3.7	6.6	4.0
最大值 Max	39.0	29.5	27.7	20.5	12.9	16.5	23.6	10.3
类型 Type 季节 Season	机房 Computer room				家具厂 Furniture factory			
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
几何均值 GM	3.9	4.6	5.6	5.7	205.5	64.1	405.2	196.2
中值 Median	4.3	4.8	4.4	6.0	264.7	67.8	485.4	198.8
算数均值 Mean	4.2	4.6	6.1	5.9	224.3	67.8	432.3	219.4
标准差 SD	1.6	0.5	3.0	1.7	100.3	31.2	154.1	118.3
最小值 Min	2.2	3.9	3.6	3.6	110.0	45.7	209.3	99.5
最大值 Max	6.6	5.0	10.9	8.1	298.0	89.8	549.2	380.7

室内空气中颗粒物的来源包括室内和室外两方面:室外来源包括室外大气气象条件、交通、地面扬尘等^[38];室内来源包括室内燃烧过程(吸烟、烹饪等)、磨损、用吸尘器清扫、再悬浮、激光打印机和化学氧化产物等^[3].因此,室内降尘通量也受到室内外的共同影响,但在不同季节两者的贡献不同.家庭各采样点四季降尘通量之间的相关性分析(表 5)表明,除夏、冬两季之间相关性较弱($r=0.342, P=0.140$)外,其他各季节间均显著相关($r=0.461—0.754, P<0.05$).这表明家庭各室内采样点降尘通量季节变化较一致,室内降尘主要来自于室外空气中的颗粒物.家庭夏、冬间较弱的相关性反映了两季由于温差造成的通风习惯的差异,以及由此带来的受室外空气中颗粒物的影响程度不同.冬季由于气温低、开窗少,

室内降尘更多受到烹饪、吸烟等室内来源颗粒物的影响^[30],这与夏季因开窗多受室外颗粒物影响多相反,不同的颗粒物来源组成造成冬夏两季的相关性较差。

此外,室内降尘主要由粒径<50 μm 的颗粒物组成^[30].其中,室内烹饪、吸烟等燃烧过程产生的颗粒物主要是<0.5 μm 的细颗粒^[16, 22],而室外来源的颗粒物粒径范围更广.细颗粒(<1 μm)主要通过布朗和涡流扩散(Brownian and eddy diffusion)沉降,而粗颗粒主要通过重力沉降^[24].研究表明^[30],尽管冬季室内降尘中颗粒物的数量显著高于夏季,但夏季室内降尘中粗颗粒的比例显著高于冬季,降尘质量和降尘中颗粒物的数量之间相关性微弱,只有粒径>5 μm 的降尘质量和颗粒物数量有一定的相关性($r=0.50$),所以夏季较高的降尘通量应与其来自室外的粗颗粒比例较高有关。

表 5 厦门市家庭、办公室各季节室内降尘通量之间的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of indoor dustfall deposition flux between different seasons for homes or offices in Xiamen, China

季节 Season	家庭 Home				办公室 Office			
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
春 Spring	1				1			
夏 Summer	0.691 **	1			0.691 **	1		
秋 Autumn	0.754 **	0.699 **	1		0.758 **	0.497	1	
冬 Winter	0.572 **	0.342	0.461 *	1	0.733 **	0.507 *	0.609 *	1

注: ** 表示极显著相关($\alpha=0.01$, 双尾); * 表示显著相关($\alpha=0.05$, 双尾); * * Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

办公室室内降尘通量的双因素方差分析(Two-Way ANOVA, $\alpha=0.05$)表明,季节差异对办公室室内降尘通量有比较显著的影响($P=0.094$).岛内(O1—O12)与岛外(O13—O16)的差异对办公室室内降尘通量影响不显著($P=0.103$).由于办公室采样点主要分布在岛内(O1—O12),且岛外采样点中有3个分布于华侨大学(O13—O15),因此岛内外不同对办公室室内降尘通量可能更多受两种环境差异的影响.多重比较(Post-Hoc multiple comparisons, LSD)进一步表明,秋季和其他季节降尘通量存在显著差异($P=0.003, 0.010, 0.017$),而冬、春、夏等三季降尘通量之间不存在显著差异($P=0.550—0.854$).

办公室降尘通量的季节变化不明显.单因素方差分析表明,只有秋季降尘通量与其他季节显著不同,冬、春、夏等三季间无显著差异(One-Way ANOVA, $\alpha=0.05$, SPSS 16.0).这可能是由于写字楼等典型办公环境大都较封闭,多数通过空调换气,很少开窗通风,受室外降尘通量季节变化影响较小所致.办公室各采样点四季降尘通量之间的相关性分析(表 5)表明,夏、秋季之间较显著相关($r=0.497, P=0.050$),夏与冬,以及秋与冬季之间显著相关($r=0.507—0.609, P<0.05$),其他各季节间均呈极显著相关($r=0.691—0.758, P<0.003$).这表明办公室各室内采样点降尘通量季节变化较一致,室内降尘主要来自于室外空气中的颗粒物.由于厦门办公室夏季空调长时间开启,而秋季和冬季则不使用空调,夏季与秋冬间较弱的相关性反映了季节间通风习惯的差异,因此受室外空气中颗粒物影响程度的不同。

机房降尘通量季节变化不明显.单因素方差分析表明,四季降尘通量间均无显著差异(One-Way ANOVA, $\alpha=0.05$).这是由于采样机房多为全封闭环境(大型交换机房、服务器室等),室内恒温且日常很少有人进入,受外界空气中颗粒物的影响小所致.机房各采样点四季降尘通量间相关性均不显著($P=0.185—0.740$),且夏、冬两季间的降尘通量甚至存在负相关($r=-0.261, P=0.671$),这表明机房因相对家庭和办公室环境更为封闭,室内降尘受室外空气中颗粒物的影响弱。

家具厂车间降尘通量的季节差异较大,夏季最低($64.1 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$),秋季最大($405.2 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$).家具厂车间降尘主要来自材料切割、打磨、喷漆等环节产生的粉尘,因此车间降尘通量的季节变化主要受家具生产量波动的影响,秋季的降尘通量最大与该时间段家具生产量较多有密切关系.另外,由于家具厂车间没有空调,采用自然通风,一定程度上也受室外降尘通量季节变化的影响,夏季降尘通量最低与室外降尘通量的季节变化较一致^[27]。

2.3 不同室内环境间降尘通量的比较

家庭四季降尘通量是办公室相应季节的 1.8 倍(1.6—2.2 倍),这可能与家庭开窗通风较多,而办公环境相对较封闭等因素有关.办公室四季降尘通量是机房的 1.5 倍(1.1—1.7 倍),由于采样机房多为大

型交换机房、服务器室等全封闭环境,日常极少有人进入,比一般办公室更加封闭,受室外空气中颗粒物的影响更小,因此降尘通量比普通办公室更低.以上结果说明室内降尘主要来自室外空气中的悬浮颗粒物,室内降尘通量大小受室外颗粒物多少和通风习惯的显著影响.家具厂车间内的四季降尘通量远高于家庭和办公室,是家庭环境的 14 倍(4—28 倍),是普通办公环境的 25 倍(9—43 倍),是家具厂车间旁办公室的 12 倍(5—28 倍).由此可见,家具生产车间的粉尘浓度比普通室内环境高出了 1—2 个数量级,由此给工人带来的健康风险值得关注.车间旁的办公室也受到车间粉尘的一定影响,其降尘通量是普通办公环境的 2.1 倍(1.6—3.0 倍).

3 结论(Conclusion)

(1)厦门家庭、办公室、机房和家具厂室内年均降尘通量几何均值分别为 13.1、7.2、4.9、179.9 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$.厦门家庭和办公室降尘通量相比国内外城市处于相对较高水平.家具厂室内沉降通量比普通室内环境高 1—2 个数量级.

(2)季节对室内降尘通量有显著影响,而市区和城郊间降尘通量无显著差异.家庭和办公室冬季降尘通量最低,家庭夏季降尘通量最高,办公室秋季降尘通量最高.机房四季降尘通量间均无显著差异,家具厂降尘通量的季节变化主要受家具生产量波动的影响.

(3)厦门家庭或办公室的室内采样点降尘通量季节变化较一致,表明室内降尘主要源于室外空气中的颗粒物.

致谢:感谢冯加良研究员对本文摘要的精心修改.感谢各采样点人员提供的便利.

参考文献 (References)

- [1] KROL S, ZABIEGALA B, NAMIESNIK J. Monitoring and analytics of semivolatile organic compounds (SVOCs) in indoor air [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2011, 400(6): 1751-1769.
- [2] BARRO R, REGUEIRO J, LLOMPART M, et al. Analysis of industrial contaminants in indoor air; Part 1. Volatile organic compounds, carbonyl compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls [J]. *Journal of Chromatography A*, 2009, 1216(3): 540-566.
- [3] WESCHLER C J. Changes in indoor pollutants since the 1950s [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(1): 153-169.
- [4] MIZOUCHI S, ICHIBA M, TAKIGAMI H, et al. Exposure assessment of organophosphorus and organobromine flame retardants via indoor dust from elementary schools and domestic houses [J]. *Chemosphere*, 2015, 123: 17-25.
- [5] DODSON R E, CAMANN D E, MORELLO-FROSCH R, et al. Semivolatile organic compounds in homes: Strategies for efficient and systematic exposure measurement based on empirical and theoretical factors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(1): 113-122.
- [6] 赵洋洋, 姚义鸣, 常帅, 等. 室内空气和灰尘中全(多)氟烷基化合物的研究进展 [J]. *环境化学*, 2015, 34(4): 656-663.
ZHAO Y Y, YAO Y M, CHANG S, et al. Per(poly)fluoroalkyl substances in indoor air and dust [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(4): 656-663 (in Chinese).
- [7] 周霁阳, 沈振兴, 党文鹏, 等. 西安市办公和家庭室内空气污染状况分析 [J]. *环境化学*, 2015, 34(9): 1642-1648.
ZHOU J Y, SHEN Z X, DANG W P, et al. Indoor air pollution in office and residence environment in Xi'an [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(9): 1642-1648 (in Chinese).
- [8] 孟川平, 杨凌霄, 董灿, 等. 济南冬春季室内空气 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃污染特征及健康风险评价 [J]. *环境化学*, 2013, 32(5): 719-725.
MENG C P, YANG L X, DONG C, et al. Characteristics and health risk assessment of indoor $\text{PM}_{2.5}$ polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in winter and spring in Jinan [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(5): 719-725 (in Chinese).
- [9] LINARES V, BELLES M, DOMINGO J L. Human exposure to PBDE and critical evaluation of health hazards [J]. *Archives of Toxicology*, 2015, 89(3): 335-356.
- [10] BENNETT D H, MORAN R E, WU X M, et al. Polybrominated diphenyl ether (PBDE) concentrations and resulting exposure in homes in California: Relationships among passive air, surface wipe and dust concentrations, and temporal variability [J]. *Indoor Air*, 2015, 25(2): 220-229.
- [11] WATKINS D J, MCCLEAN M D, FRASER A J, et al. Exposure to PBDEs in the office environment: Evaluating the relationships between dust, handwipes, and serum [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011, 119(9): 1247-1252.
- [12] KROL S, NAMIESNIK J, ZABIEGALA B. Occurrence and levels of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in house dust and hair

- samples from Northern Poland; an assessment of human exposure [J]. *Chemosphere*, 2014, 110: 91-96.
- [13] 王立鑫, 赵彬, 刘聪, 等. 中国室内 SVOC 污染问题评述 [J]. *科学通报*, 2010, 55(11): 967-977.
WANG L X, ZHAO B, LIU C, et al. Indoor SVOC pollution in China: A review [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(11): 967-977 (in Chinese).
- [14] 王炳玲, 逢淑涛, 张绮, 等. 城市室内降尘中常见半挥发性有机化合物水平 [J]. *中国公共卫生*, 2014, 30(7): 931-936.
WANG B L, PANG S T, ZHANG Q, et al. Levels of common semivolatile organic compounds in settled house dust of urban dwellings [J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2014, 30(7): 931-936 (in Chinese).
- [15] QI H, LI W L, LIU L Y, et al. Levels, distribution and human exposure of new non-BDE brominated flame retardants in the indoor dust of China [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 195: 1-8.
- [16] LIU C, ZHAO B, ZHANG Y P. The influence of aerosol dynamics on indoor exposure to airborne DEHP [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(16): 1952-1959.
- [17] CETTIER J, BAYLE M L, BERANGER R, et al. Efficiency of wipe sampling on hard surfaces for pesticides and PCB residues in dust [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 11-21.
- [18] 张舒婷, 李晓燕. 城市室内灰尘重金属的水平及来源 [J]. *环境化学*, 2014, 33(7): 1201-1207.
ZHANG S T, LI X Y. Concentrations and sources of heavy metals in indoor dust of cities [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(7): 1201-1207 (in Chinese).
- [19] LAI A C K. Particle deposition indoors: A review [J]. *Indoor Air*, 2002, 12(4): 211-214.
- [20] WESCHLER C J, NAZAROFF W W. SVOC exposure indoors: fresh look at dermal pathways [J]. *Indoor Air*, 2012, 22(5): 356-377.
- [21] WATKINS D J, MCCLEAN M D, FRASER A J, et al. Impact of dust from multiple microenvironments and diet on PentaBDE body burden [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 1192-1200.
- [22] LIU C, MORRISON G C, ZHANG Y P. Role of aerosols in enhancing SVOC flux between air and indoor surfaces and its influence on exposure [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 55: 347-356.
- [23] GARCIA-JARES C, REGUEIRO J, BARRO R, et al. Analysis of industrial contaminants in indoor air. Part 2. Emergent contaminants and pesticides [J]. *Journal of Chromatography A*, 2009, 1216(3): 567-597.
- [24] HUSSEIN T, HRUSKA A, DOHANYOSOVA P, et al. Deposition rates on smooth surfaces and coagulation of aerosol particles inside a test chamber [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(4): 905-914.
- [25] ZHAO B, WU J. Particle deposition in indoor environments: Analysis of influencing factors [J]. *Journal of Hazardous materials*, 2007, 147(1/2): 439-448.
- [26] WANG X, LIU S, ZHAO J, et al. Deposition flux of aerosol particles and 15 polycyclic aromatic hydrocarbons in the North China Plain [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2014, 33(4): 753-760.
- [27] WANG W, SIMONICH S L M, GIRI B, et al. Spatial distribution and seasonal variation of atmospheric bulk deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons in Beijing-Tianjin region, North China [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1): 287-293.
- [28] MOON H B, KANNAN K, LEE S J, et al. Atmospheric deposition of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in coastal areas in Korea [J]. *Chemosphere*, 2007, 66(4): 585-593.
- [29] 韩文亮, 冯加良, 彭小霞, 等. 上海室内环境中多溴二苯醚的沉降通量与组成 [J]. *环境科学*, 2010, 31(3): 579-585.
HAN W L, FENG J L, PENG X X, et al. Indoor deposition flux and congener profiles of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in Shanghai, China [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(3): 579-585 (in Chinese).
- [30] EDWARDS R D, YURKOW E J, LIOY P J. Seasonal deposition of housedusts onto household surfaces [J]. *The Science of the Total Environment*, 1998, 224(1/3): 69-80.
- [31] SEO Y, HAN T. Assessment of penetration through vacuum cleaners and recommendation of wet cyclone technology [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2013, 63(4): 453-461.
- [32] QUANG T N, HE C R, MORAWSKA L, et al. Influence of ventilation and filtration on indoor particle concentrations in urban office buildings [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79: 41-52.
- [33] ISAXON C, GUDMUNDSSON A, NORDIN E Z, et al. Contribution of indoor-generated particles to residential exposure [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 106: 458-466.
- [34] WU C L, CHAO C Y H, SZE-TO G N, et al. Ultrafine particle emissions from cigarette smouldering, incense burning, vacuum cleaner motor operation and cooking [J]. *Indoor and Built Environment*, 2012, 21(6): 782-796.
- [35] AFSHARI A, MATSON U, EKBERG L E. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber [J]. *Indoor Air*, 2005, 15(2): 141-150.
- [36] BUTT C M, DIAMOND M L, TRUONG J, et al. Spatial distribution of polybrominated diphenyl ethers in southern Ontario as measured in indoor and outdoor window organic films [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(3): 724-731.
- [37] HUNT A, JOHNSON D L, GRIFFITH D A. Mass transfer of soil indoors by track-in on footwear [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(2/3): 360-371.
- [38] DIAPOULI E, CHALOULAKOU A, KOUTRAKIS P. Estimating the concentration of indoor particles of outdoor origin: A review [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2013, 63(10): 1113-1129.