

朱忆萌,郭振东. 空气加湿器对室内空气质量影响研究[J]. 气象与环境学报,2018,34(5):163-168.

ZHU Yi-meng, GUO Zhen-dong. The study on impact of air humidifier on indoor air quality[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(5): 163-168.

空气加湿器对室内空气质量影响研究

朱忆萌¹ 郭振东²

(1. 南京师范大学附属中学, 江苏 南京 210003; 2. 南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 选用超纯水、矿泉水和自来水作为加湿水源, 采用某品牌超声波家用空气加湿器对一间封闭办公室进行加湿。通过 $PM_{2.5}$ 中流量采样器, 气溶胶粒径分级采样器以及宽范围气溶胶粒径谱仪(WPS)测量室内气溶胶质量浓度、质量浓度粒径分布、数浓度和粒径谱分布, 采用离子色谱仪分析样本水溶性离子组成。结果表明: 不同水源加湿后室内 $PM_{2.5}$ 质量浓度都有明显增长且以水溶性离子为主, 其中超纯水、矿泉水和自来水分别可使室内 $PM_{2.5}$ 质量浓度净增 16.9、46.0 和 428.2 $\mu g \cdot m^{-3}$ 。加湿主要是使 2.1 μm 以下的细粒径段的质量浓度和离子浓度增加最显著, 增加的主要离子 (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , K^+) 与水源中水溶性离子组成直接有关。WPS 测量表明, 超纯水和矿泉水加湿后室内气溶胶数浓度增加粒径峰值在 20 nm 左右, 而自来水加湿后数浓度增加峰值在 30 nm 左右, 数浓度的增量都达 1 个数量级以上。加湿后, WPS 得到的质量浓度增加峰值在 500—600 nm, 与气溶胶粒径分级采样器得到 0.43—0.65 μm 质量浓度增量峰值基本一致。使用超声波空气加湿器时选用纯净水作为水源更安全。

关键词: 空气加湿器; 室内空气质量; 气溶胶; $PM_{2.5}$; 水溶性离子

中图分类号: X16 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-503X.2018.05.021

引言

当今大部分城市人口每天 2/3 以上的时间在室内度过, 良好的室内空气质量是健康人居的必要条件。大气气溶胶是室内空气污染的主要物质, 其化学组成包括无机水溶性/不溶性物质、重金属、有机物等。随着人们生活水平的提高, 室内空气污染问题也得到了更多的关注和研究^[1-4]。

从健康的角度看, PM_{10} (空气动力学直径小于 10 μm 的悬浮颗粒物) 尤其是 $PM_{2.5}$ (空气动力学直径小于 2.5 μm 的悬浮颗粒物) 对人体健康的危害最大, 许多研究从病理学角度探讨了它们对人体健康的负面影响^[5,6]。Pope III^[7] 研究表明, PM_{10} 与由肺功能衰竭所引起的死亡、以及由呼吸性疾病和心血管病引起的死亡存在明显的相关性, 而 $PM_{2.5}$ 与心肺疾病和肺癌的相关性更为明显。毒理学研究表明, 不同气溶胶化学组成的毒性机制和效应均有很大差异, 但都会对健康造成一定危害^[8]。 $PM_{2.5}$ 中的含碳组分 (OC 和 EC) 与心率变异、炎症、血液高凝态等有关^[9]; 砷和多环芳烃 (PAH) 具有生物遗传致变性和致癌性^[10]; 而大气 $PM_{2.5}$ 中的硫酸盐与呼吸系统致死有很强的关联^[11]。

冬季取暖往往伴随着室内相对湿度显著下降, 或者干燥地区室内相对湿度较低, 为此, 常采用空气加湿器通过超声波雾化水以提高空气相对湿度。但是有研究表明, 长期不清洗的加湿器的水箱、管道和喷嘴等部位会滋生真菌或细菌等微生物, 这些微生物可能会随着雾化加湿过程进入空气再进入人体的呼吸道和肺部, 从而引起过敏反应甚至肺炎^[12-15]。

即使保证加湿器不会带来微生物污染, 空气加湿器雾化水源时必然会将水中的化学物质释放入室内空气中, 导致气溶胶的增加^[16]。最近有些非专业人员使用非专业测量仪器已经表明空气加湿器会导致室内 $PM_{2.5}$ 显著增高, 但又存在争议^[17]。因此有必要使用专业仪器和研究方法, 进一步探讨加湿器对室内空气质量的影响, 特别是对 $PM_{2.5}$ 质量浓度、质量浓度谱、数浓度谱以及化学组成的影响。目前, 中国暂未制定室内 $PM_{2.5}$ 的环境标准, 对室内颗粒物的研究也尚处于初级阶段, 关于使用加湿器对室内空气质量影响的研究更少, 本研究结果可为室内空气质量评估、管理提供一定的依据。

1 观测与方法

1.1 观测地点和时间

本次观测是在南京信息工程大学气象楼一正常

收稿日期: 2018-08-02; 修订日期: 2018-09-04。

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 (41575148) 资助。

作者简介: 朱忆萌, 女, 2001 年生, 在读学生, 主要从事大气环境研究, E-mail: 2262117908@qq.com

通信作者: 郭振东, E-mail: guozhendong2016@163.com。

关闭的办公室(32 m² × 2.8 m)进行,观测时间是2017年8月16—28日,室外空气PM_{2.5}在10—25 μg·m⁻³。室温在27—33℃,相对湿度加湿前为50%—55%,加湿后提高到60%—70%。与室外研究不同^[18-20],本次实验未发现相对湿度变化和温度变化对室内PM_{2.5}、气溶胶质量浓度谱等采样结果有显著影响。

1.2 观测仪器与分析方法

本次实验使用某品牌家用加湿器,其原理是以超声波高频振荡的方式将水源雾化并排入室内,排水量为每小时0.41 L。测量仪器包括KC-120H型PM_{2.5}中流量采样器,FA-3型气溶胶粒径分级采样器和宽范围颗粒粒径谱仪(WPS)以及pH计和电导率仪。PM_{2.5}中流量采样器使用石英膜(美国Pall公司)对颗粒物进行采样,采样流量为100 L·min⁻¹。FA-3型Anderson气溶胶分级采样器使用Teflon滤膜(上海兴亚,直径为80 mm),采样流量设为28.3 L·min⁻¹。该采样器共分为9级,1—9级所采的粒子粒径范围分别为:1为小于0.43 μm、2为

0.43—0.65 μm、3为0.65—1.1 μm、4为1.1—2.1 μm、5为2.1—3.3 μm、6为3.4—4.7 μm、7为4.7—5.8 μm、8为5.8—9.0 μm、9为9.0—10.0 μm。PM_{2.5}中流量采样器每次采样时长为340 min,分级采样器的采样时长为700 min。WPS以5 min时间分辨率对气溶胶数浓度进行观测,测量直径在0.01—10 μm之间的气溶胶粒子数浓度,共分为64个粒径段。仪器原理介绍参见文献[21]。

未加湿的室内和不同水质水源的加湿实验分别测量3—9组,先是未加湿,然后依次是超纯水、矿泉水、自来水,它们的电导率,pH值及其中的主要离子浓度见表1。每种水源加湿测完后加湿器都经下一种水源的充分淋洗和预加湿以减少前一种水源的干扰。分级采样器共采集4种情形3次9级共计108个膜样品,PM_{2.5}中流量采样器共采集4种情形9次共计36个样品。观测期间加湿器距仪器约2.8 m,所有仪器摆放高度约1.5 m,大约在的人体呼吸位置(图1)。

表 1 不同水源中离子质量浓度

| Table 1 Ion mass concentrations in different types of water | | | | | | | | | | | | mg·L ⁻¹ |
|---|-------------------------|-----|----------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|----------------|------------------|--------------------|
| 水源 | 电导率/μS·cm ⁻¹ | pH | F ⁻ | Cl ⁻ | NO ₂ ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Na ⁺ | NH ₄ ⁺ | K ⁺ | Mg ²⁺ | Ca ²⁺ |
| 超纯水 | 0.2 | 6.7 | 0.13 | 1.25 | 0.23 | 0.21 | 0.2 | 1.58 | 0.87 | 0.35 | 0.24 | 0.13 |
| 矿泉水 | 19.2 | 6.0 | 1.07 | 14.31 | 1.57 | 4.12 | 63.39 | 1.85 | 0.21 | 12.36 | 10.56 | 4.11 |
| 自来水 | 293.9 | 7.6 | 2.32 | 86.53 | 2.95 | 35.43 | 159.35 | 45.16 | 0.36 | 9.93 | 33.58 | 137.4 |



图 1 空气加湿器影响室内空气质量的实验环境设置及所用仪器

Fig. 1 The experimental settings of humidifier impact on indoor air quality and the instruments

采样前先将滤膜放入马弗炉以800℃烘烤5 h去除有机杂质,再放于干燥皿中平衡72 h至恒重后用MS105型微量天平称重(天平精度0.01 μg),滤膜称重后放入膜盒中置于冰箱冷藏。采样后,取1/4滤膜样品剪碎放入15 mL PET瓶中,再加10 mL超纯水浸泡,将其置于超声波清洗仪中萃取30 min后静置,上层液经0.22 μm微孔滤膜过滤后,转移至20 mL的进样管中进行分析,空白滤膜按同样方法同步处理与测定。使用瑞士万通850离子色谱仪进

行分析,得到10种水溶性离子Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、F⁻、Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻和SO₄²⁻,它们的检测限分别为0.02,0.02,0.01,0.05,0.02,0.05,0.04,0.04,0.006,0.05 mg·L⁻¹,阴淋洗液浓度为3.2 mmol·L⁻¹的Na₂CO₃溶液和1.0 mmol·L⁻¹的NaHCO₃;阳淋洗液为1.7 mmol·L⁻¹的HNO₃和0.7 mmol·L⁻¹的吡啶二羧酸溶液,实验用水均使用Million Q超纯水机超滤至电阻率达18.2 MΩ·cm的超纯水。实验过程每批样品均做空白膜实验,每3个样品做一个平行样,保证平行样品的相对偏差小于5%为合格。

文中加湿前和各种水源加湿后质量浓度、离子浓度及其粒径段分布都是由多组数据平均得来,数据组之间的偏差小且稳定。

2 结果分析

2.1 不同水源加湿前后室内PM_{2.5}变化及其离子组成

图2中8月16—18日是未加湿期间测得的室内外PM_{2.5}质量浓度变化,之后是每种水源加湿各测量3 d(每天3次,3次平均为日均值)的质量浓度变化。由图2可见,室内PM_{2.5}质量浓度即使在未加湿期间也高于室外浓度,而且在观测期间室内和室外

变化不一致,这表明在观测期间室内 $\text{PM}_{2.5}$ 并未显

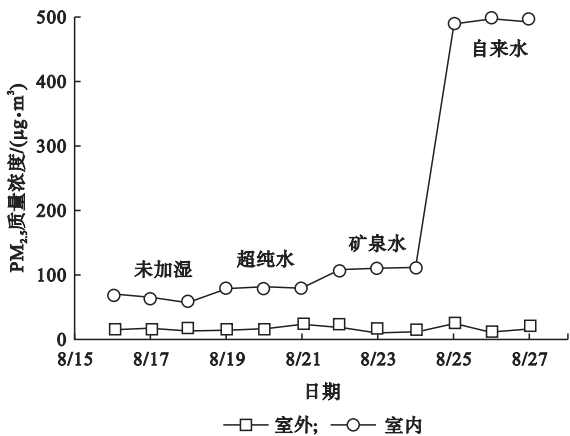


图 2 未加湿的室内 $\text{PM}_{2.5}$ 以及三种不同水源加湿后室内 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度

Fig. 2 Mass concentrations of indoor $\text{PM}_{2.5}$ before and after humidification by 3 types of water

表 2 加湿前及不同水源加湿后 $\text{PM}_{2.5}$ 及其中各离子质量浓度

| Table 2 $\text{PM}_{2.5}$ and ion mass concentration before and after humidification by 3 types of water | | | | | | | | | | | | $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ |
|--|-------------------|--------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------------|---------------|-----------------|--------------|------------------|---------------------------------|
| 水源 | $\text{PM}_{2.5}$ | 总离子浓度 | F^- | Cl^- | NO_2^- | NO_3^- | SO_4^{2-} | Na^+ | NH_4^+ | K^+ | Mg^{2+} | Ca^{2+} |
| 未加湿 | 63.32 | 30.25 | 1.25 | 1.79 | 0.82 | 1.75 | 10.03 | 0.21 | 5.42 | 6.89 | 1.79 | 0.3 |
| 超纯水 | 80.23 | 59.55 | 1.53 | 12.93 | 0.75 | 5.53 | 14.59 | 9.23 | 0.39 | 2.56 | 1.07 | 10.97 |
| 矿泉水 | 109.28 | 67.01 | 1.16 | 9.32 | 1.03 | 1.87 | 30.63 | 3.89 | 1.92 | 8.41 | 3.21 | 5.57 |
| 自来水 | 491.52 | 257.51 | 2.09 | 47.63 | 1.05 | 29.48 | 116.89 | 38.25 | 1.57 | 2.36 | 6.26 | 11.93 |

比值为 47.8%,这表明不同水源加湿后对室内水溶性离子有正贡献,对超纯水的 $\text{PM}_{2.5}$ 离子贡献最大,自来水的 最小。未加湿前室内主要离子依次是 SO_4^{2-} , NH_4^+ 和 K^+ ,自来水加湿后的 $\text{PM}_{2.5}$ 主要离子依次是 SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ 和 NO_3^- ,增幅最大的离子是 SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , NO_3^- 和 Ca^{2+} ;矿泉水加湿后的 $\text{PM}_{2.5}$ 主要离子和增量离子则是 SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ 和 Ca^{2+} ;超纯水加湿后的 $\text{PM}_{2.5}$ 主要离子和增量离子是 Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} 和 NO_3^- 。自来水加湿后,测到 $\text{PM}_{2.5}$ 中大部分离子增量都是最高的,这是因为自来水中各离子含量较高。三种水源加湿后的 $\text{PM}_{2.5}$

著受到室外的影响。图 2 还表明,超纯水、矿泉水加湿后 $\text{PM}_{2.5}$ 由未加湿的 $63.2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 显著增加到 $80.2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $109.3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,而自来水更是使 $\text{PM}_{2.5}$ 凸增到 $491.5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,加湿后 $\text{PM}_{2.5}$ 的净增量(超纯水 $16.9\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,矿泉水 $46.0\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和自来水 $428.2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和水源水质直接有关,但并不是线性关系,可能是因为气溶胶在室内沉降、被墙壁吸附等过程与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈非线性关系所致,或者与 $\text{PM}_{2.5}$ 在室内扩散分布的非均匀性有关。

由表 2 可知,与加湿前相比,三种水源加湿后室内 $\text{PM}_{2.5}$ 中的水溶性离子质量浓度也都有着明显增长。尤其是自来水加湿使 $\text{PM}_{2.5}$ 中的总水溶性离子达到了 $257.5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其次是矿泉水的 $67.0\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最小的是超纯水的 $59.55\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。自来水,矿泉水,超纯水加湿后的 $\text{PM}_{2.5}$ 中的水溶性离子分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 总量的 52.4%,61.3% 和 74.2%,而室内未加湿的

中, SO_4^{2-} 质量浓度都是最高的;而三种水源加湿后的 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 质量浓度比加湿前都减少,是由于 3 种水源的 NH_4^+ 本身含量就低(表 1)。矿泉水加湿后的 $\text{PM}_{2.5}$ 中 K^+ 相比加湿前增加了 $1.52\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这是因为矿泉水人工添加了 K^+ ,这与表 1 中矿泉水 K^+ 高是一致的。以上结果都表明,水源的离子组成直接影响了加湿后室内 $\text{PM}_{2.5}$ 中的离子组成。

图 3 对比了中流量采样器采集的 $\text{PM}_{2.5}$ 和气溶胶粒径谱仪采集的 $\text{PM}_{2.1}$ 和 PM_{10} 中的离子质量浓度。可见,两套仪器得到 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{2.1}$ 中的总离子浓度非常接近,而且各离子所占比例也基本一致,这

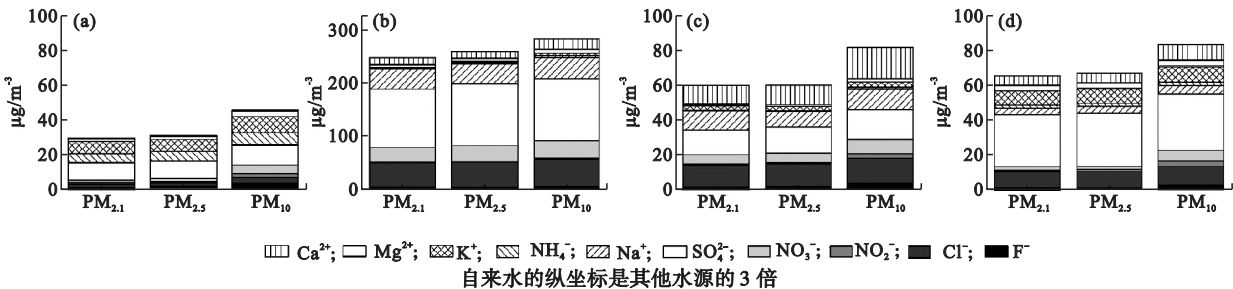


图 3 加湿前(a)、自来水(b)、超纯水(c)、矿泉水(d)加湿后室内 $\text{PM}_{2.1}$ (中流量采样器)、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} (分级采样器) 中水溶性离子质量浓度

Fig. 3 Ion mass concentrations in indoor $\text{PM}_{2.1}$ by intelligent flow sampler and $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} by particle size sampler before (a) and after (b) humidification by 3 types of tap water, ultrapure water (c) and mineral water (d)

说明观测数据较可靠。同时发现不同水源加湿后 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比加湿前有着明显的上升,这表明加湿对 $PM_{2.5}$ 质量浓度的增长较 $PM_{2.5}-PM_{10}$ 粒径段粒子更为显著。

2.2 加湿对室内气溶胶粒径段质量浓度及其中水溶性离子的影响

本节依据气溶胶分粒径仪采集的 9 级膜样品开展分析。在此,将 $PM_{2.1}$ 作为粗细粒径的分界。图 4

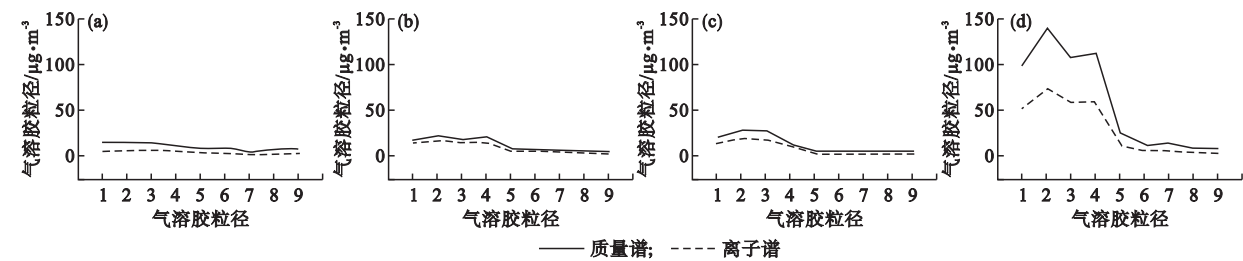


图 4 室内未加湿前 (a)、超纯水 (b)、矿泉水 (c)、自来水 (d) 加湿后室内不同粒径段气溶胶的质量浓度和水溶性离子质量浓度分布

Fig. 4 Mass and total ion mass concentrations in different scales of aerosol before (a) and after humidification by 3 types of ultrapure water (b), mineral water (c) and tap water (d)

代表不同水源加湿前后 0—10 μm 各粒径段气溶胶总水溶性离子质量浓度分布。可以看出,加湿前室内分粒径气溶胶水溶性离子质量浓度没有明显的峰值;而经自来水加湿后,在细粒子段出现质量浓度高峰,特别是在 0.43—0.65 μm 、0.65—1.1 μm 和 1.1—2.1 μm 三个尺度段。矿泉水和超纯水加湿后也是在细粒子段出现峰值,只是峰值高度比自来水低很多。三种水源加湿后水溶性离子浓度都在 0.43—0.65 μm 段有最高峰值。对比未加湿和不同

水源加湿后气溶胶不同尺度段上的质量变化还可以发现,大于 3.3 μm 的各粒径段气溶胶加湿前后质量浓度变化很小,只有自来水加湿后增加略明显。这与所采用的超声波加湿器工作原理有关^[22],加湿器通过频率为 1.7 MHz 或 2.4 MHz 的机械超声震荡将水源雾化成小水滴,小水滴在室内蒸发后形成更小的次微米气溶胶颗粒。

由图 5a 可以看出,加湿前室内气溶胶中主要阴离子以 SO_4^{2-} 为主,峰值位于 0.43—0.65 μm 的细粒

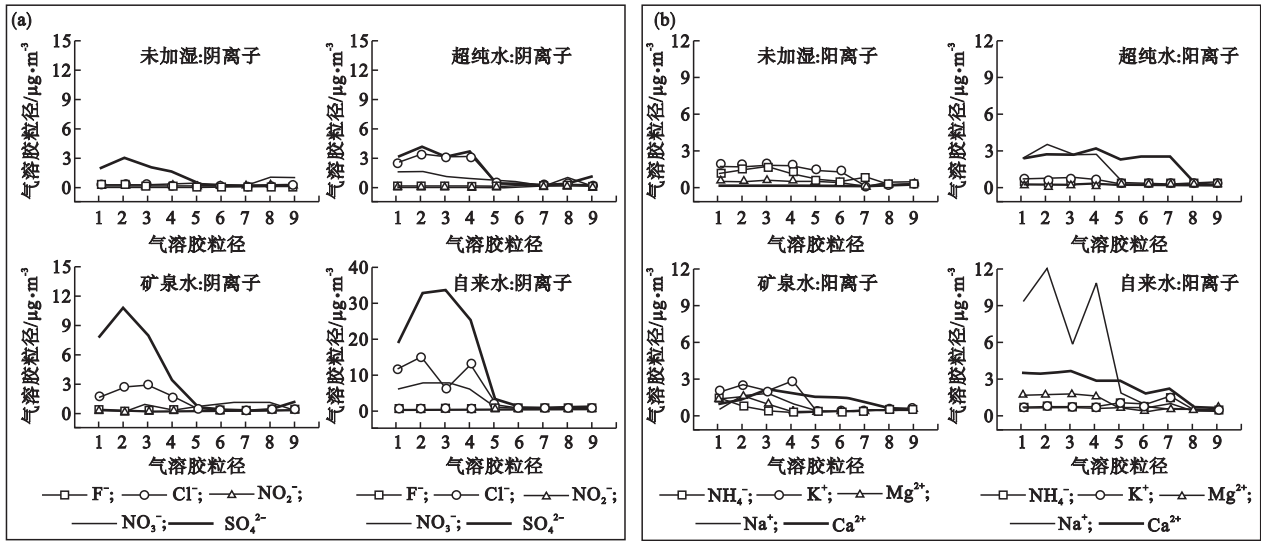


图 5 加湿前后各阴离子 (a) 和阳离子 (b) 在不同尺度气溶胶中的质量浓度

Fig. 5 Anion (a) and cation (b) mass concentrations in different scales of aerosol before and after humidification

径段, NO_3^- 在 5.8—10.0 μm 较高;阳离子 NH_4^+ 、 K^+ 含量稍高 (图 5b)。超纯水加湿后 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 在 2.1 μm 以下的粒径段上增加; Na^+ 在 2.1 μm 以下、 Ca^{2+} 在 4.7 μm 以下的粒径段中增加。矿泉水加湿后, SO_4^{2-} 增加最大, Cl^- 其次,并且主要也在 2.1 μm 以下的粒径段上增加;矿泉水加湿后,增加最高的阳离子是 K^+ 且在 2.1 μm 以下的粒径段上, Ca^{2+} 在 4.7 μm 以下的粒径段中增加。原因可从对比表 1 各水源离子含量得知,矿泉水中 K^+ 最高 (12.36 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。 K^+ 是为改善矿泉水口感和补充有益离子而人工添加的。自来水加湿后,阴离子中仍然是 SO_4^{2-} 增加最大,在 0.43—0.65 μm 和 0.65—1.1 μm 增加达 30 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上; Cl^- 、 NO_3^- 为另外 2 种增加显著的阴离子,主要也在 2.1 μm 以下

的粒径段中。自来水加湿后,增长最高的阳离子是 Na^+ ,主要也在 $2.1\ \mu\text{m}$ 以下粒径段中增加。 Ca^{2+} 不仅在细粒子段增加,在粗粒径 $2.1\text{—}5.8\ \mu\text{m}$ 上增加也很多; Mg^{2+} 在自来水中含量最高,在小于 $2.1\ \mu\text{m}$ 粒径段中也有体现。从阴阳离子质量浓度增量上看,阴离子质量增加更多,这其实是由于主要阴离子的摩尔质量如 SO_4^{2-} ($96\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)和 NO_3^- ($62\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)要显著大于主要阳离子的摩尔质量如 Na^+ ($23\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)和 Ca^{2+} ($40\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$),而阴阳离子的正负电荷是平衡的。

本研究还用到了宽范围颗粒粒径谱仪(WPS),可以得到多达64个粒径段的从 $10\ \text{nm}$ — $10\ \mu\text{m}$ 的气溶胶数浓度分布,以及由数浓度折算的表面积浓度和体积浓度分布(图6)。加湿前室内气溶胶数浓度峰值约出现在 $40\ \text{nm}$ 处,呈单峰分布。超纯水和矿泉水加湿后数浓度在小于 $100\ \text{nm}$ 的粒径段都得到增长,特别在 $20\ \text{nm}$ 左右数浓度较未加湿前增加1个数量级以上,致使超纯水和矿泉水加湿后,数浓度谱分布的峰值变为 $20\ \text{nm}$ 。而自来水加湿后, $1\ \mu\text{m}$ ($1\ 000\ \text{nm}$)以下粒径段都可见数浓度的增加,在细粒子段增加较多,特别在 $30\ \text{nm}$ 左右增加1个数量级以上。

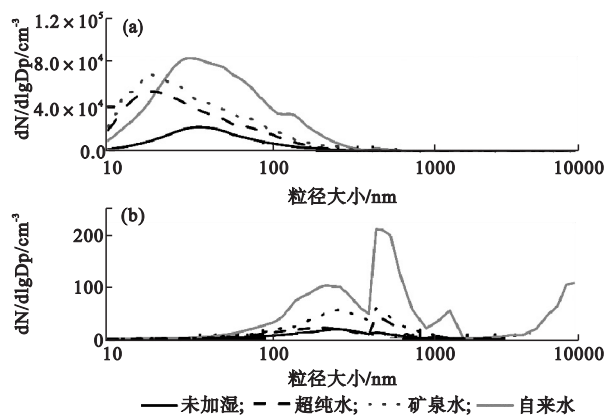


图6 不同水源加湿前后数浓度尺度分布(a)和质量浓度尺度分布(b)

Fig. 6 The surface area concentration (a) and mass concentration (b) distribution of different water quality before and after humidification

由图6b可见,加湿前气溶胶体积浓度分布呈现出峰值在 $300\ \text{nm}$ 左右的单峰分布。超纯水加湿后, $500\text{—}600\ \text{nm}$ 出现另一个质量峰值;矿泉水加湿后, $100\text{—}1\ 000\ \text{nm}$ 段质量浓度都有增加。对比图6a数浓度分布变化可知,尽管加湿后数浓度在 $100\ \text{nm}$ 以下增加显著,但它们对质量浓度的贡献很小;而 $100\ \text{nm}$ 以上的粒子对质量浓度的贡献才显著,这是由于粒子质量与粒子直径的三次方成正比所致。自来水加湿后, $50\ \text{nm}$ 以上粒径质量浓度都有增加,增加最大的粒径段也在 $500\text{—}600\ \text{nm}$,这与上文气溶胶

分级采样器得出的质量浓度增加主要在 $0.43\text{—}0.65\ \mu\text{m}$ 粒径段是一致的。

3 结论与讨论

(1)不同水源加湿后室内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度都有明显增长且以水溶性离子为主,其中超纯水、矿泉水和自来水分别可使室内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度净增 $16.9\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $46.0\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $428.2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。加湿主要是使 $2.1\ \mu\text{m}$ 以下的细粒径段质量浓度和离子浓度增加最显著。

(2)三种水源加湿后,增加的主要离子(SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} 等)与水源中水溶性离子组成直接有关,如自来水可使大部分离子显著增加, Mg^{2+} 只在自来水加湿后增加明显;而矿泉水中 K^+ 含量最高,可使 $\text{PM}_{2.5}$ 中 K^+ 增加显著。 Ca^{2+} 在 $2.1\ \mu\text{m}$ 以下的细粒子以及 $2.1\text{—}5.8\ \mu\text{m}$ 的粗粒子都有增加,而其他离子都是在 $2.1\ \mu\text{m}$ 以下的粒子上增加。

(3)WPS测量表明,超纯水和矿泉水加湿后室内气溶胶数浓度增加峰值在 $20\ \text{nm}$ 左右,而自来水加湿后数浓度增加峰值在 $30\ \text{nm}$ 左右,数浓度的增量都达1个数量级以上。加湿后,WPS得到的质量浓度增加峰值在 $500\text{—}600\ \text{nm}$,与气溶胶粒径分级采样器得到的 $0.43\text{—}0.65\ \mu\text{m}$ 质量浓度增量峰值基本一致。

(4)建议在使用超声波空气加湿器时以选用纯净水作为水源更为安全。但有小鼠毒理学试验研究认为^[23],自来水加湿后的气溶胶可引起肺细胞应急响应,但没发现引起肺部炎症或组织损伤的迹象,即自来水中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等与室外大气经 SO_2 、 NO_x 氧化形成的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的毒性是不同的,是相对低毒的,如果不长期连续使用应该不必过于担心。

参考文献

- [1] Jones A P. Indoor air quality and health [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(28): 4535–4564.
- [2] 王桂芳, 陈烈贤. 办公室内空气污染的调查 [J]. 环境与健康杂志, 2000, 17(3): 156–157.
- [3] 朱天乐, 郝吉明, 周中平, 等. 我国室内空气污染现状、成因与对策 [J]. 环境工程学报, 2002, 3(10): 14–18.
- [4] Air quality guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2006. [4 August 2010]. http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf.
- [5] Carlton A G, Turpin J B, Johnson W, et al. Methods for characterization of personal aerosol exposures [J]. Aerosol Science and Technology, 1999, 31(0): 66–80.
- [6] Choudhury A. H., Gordian M E, Morris S. Associations between respiratory illness and PM_{10} air pollution [J]. Architecture Environment and Health, 1997, 52(2):

113 – 117.

[7] Pope III C. A. Respiratory hospital admission associated with PM₁₀ pollution in Uta, Salt Lake, and Cache Valleys[J]. Architecture Environment and Health, 1991, 46(2) :90 – 97.

[8] 曹军骥等, PM_{2.5} 与环境[M]. 科学出版社, 2014. PP288.

[9] Wu S, Deng F, Wei H, et al. Chemical constituents of ambient particulate air pollution and biomarkers of inflammation, coagulation and homocysteine in healthy adults: a prospective panel study [J]. Particle & Fibre Toxicology, 2012, 9(1) :49 – 49.

[10] Kok T, Driece H, Hogervorst J, et al. Toxicological assessment of ambient and traffic-related particulate matter: A review of recent studies [J]. Mutat Research, 2006, 613(2) :103 – 122.

[11] Smith K R, Jerrett M, Anderson H R, et al. Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: health implications of short-lived greenhouse pollutants [J]. Lancet, 2009, 374(9707) :2091 – 2103.

[12] Nakagawa A, Yamaguchi T, Takao T, et al. A case of hypersensitivity pneumonitis probably caused by a humidifier in winter [J]. Nihon Kyobu Shikkan Gakkai Zasshi, 1995, 33(4) :202 – 208.

[13] Muller W D, Koschel D, Stark W, et al. Humidifier-associated disease in the general population: A retrospective investigation. Dtsch Med Wochenschr, 2006, 131(5) :491 – 496.

[14] 郑晓红, 沈红萍, 钱华, 等. 住宅室内空气品质感知和加湿器使用与儿童过敏性症状及疾病的关系[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(10) :1101 – 1104.

[16] Highsmith V R, Rodes C E, Hardy R J. Indoor particle concentrations associated with use of tap water in portable humidifiers[J]. Environmental Science & Technology, 1988, 22(9) :1109.

[17] 郑子愚. 加湿器竟是造霾器? 虚惊一场! 水汽粒子不是 PM_{2.5} [DB/CD]. <https://www.shobserver.com/news/detail?id=40139>, 2016 – 12 – 23.

[18] 刘丽伟, 李文才, 尚可政, 等. 京津冀地区一次严重霾天气过程及其影响因素分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(6) :35 – 42.

[19] 李丽光, 王宏博, 刘宁微, 等. 1960—2013 年辽宁省城市霾日时空特征分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(6) :115 – 122.

[20] 张莹, 贾旭伟, 杨旭, 等. 中国典型代表城市空气污染特征及其与气象参数的关系[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(2) :70 – 79.

[21] Gao J, Wang T, Zhou X H, et al. Measurement of aerosol number size distributions in the Yangtze River delta in China: formation and growth of particles under polluted conditions[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43() :829 – 836.

[22] 王桂清. ZS2 – 45 型超声波加湿器原理与检修[J]. 家电维修技术, 2011, 8:46 – 47.

[23] Umezawa M, Sekita K, Suzuki K, et al. Effect of aerosol particles generated by ultrasonic humidifiers on the lung in mouse [J]. Particle & Fibre Toxicology, 2013, 10(1) :64.

The study on impact of air humidifier on indoor air quality

ZHU Yi-meng¹ GUO Zhen-dong²

(1. High School Affiliated to Nanjing Normal University, Nanjing 210003, China; 2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In this study, ultra-pure water, mineral water and tap water were selected as humidifying water sources. One brand household ultrasonic humidifier was adopted to humidify on a closed office. By using intelligent flow PM_{2.5} sampler, FA-3 aerosol particle size sampler and wide-range particle size spectrometer (WPS), the indoor aerosol mass concentration, mass concentration spectrum, particle number size distribution were measured and water soluble ions in aerosol were measured by chromatograph analysis. The results show that indoor PM_{2.5} mass concentrations have obvious growth and dominant of water soluble ion after humidification by different types of water. The net increase by humidification of ultrapure water, mineral water and tap water in indoor PM_{2.5} were 16.9, 46.0 and 428.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ respectively. The humidification is mainly to increase the mass concentration and ion concentration of the fine particle size range below 2.1 μm . The increase of major ions (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , K^+) were directly related to the most significant ions in the types of water. WPS measurements show that indoor aerosol number concentration increases significantly with a peak at about 20 nm, after humidify by ultrapure water and mineral water. While humidification by tap water, number concentration increases with a peak at about 30 nm. All types of water humidification lead to the number concentration increment of more than one order of magnitude. The increase of mass concentration by WPS peaks in size range of 500-600 nm after humidification, which is in accord with the measurement by aerosol particle size sampler that the peak increment at 0.43-0.65 μm . When the ultrasonic humidifier was used, the pure water is recommended for health safety.

Keywords: Air humidifier; Indoor air quality; Aerosol; PM_{2.5}; Water-soluble ions