

集中空调系统积尘理化特征^{*}

樊越胜^{1**} 司鹏飞^{1,2} 李安桂¹ 刘少锋³

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安, 710055 2. 中国建筑西南设计研究院, 成都, 610081;

3. 中国市政工程西北设计研究院, 兰州, 730000)

摘要 利用现场采样与实验分析的方法,对集中空调系统内的积尘进行了粒径分布、水溶性碳物质及离子含量的分析,以评估集中空调系统内积尘对微生物滋生的影响.结果表明,集中空调系统除新风段外的6个采样段,积尘平均粒径介于6—20 μm 之间,新风段积尘平均粒径为41.30 μm ;沿送风方向,微粒的平均粒径减小,单位积尘量所含的水溶性离子和有机碳含量明显增大;沿送风方向,单位积尘量所含微生物呈增长趋势,但表冷段最高;微生物浓度与水溶性有机碳含量呈显著的正相关性.减少空调系统造成的微生物及化学污染,应加强对单位面积积尘量以及微小粒子的控制,减少微生物生长所需有机碳物质,同时应加强新风段与表冷段的消毒.

关键词 TOC, TOC/IC, 积尘, 集中空调, 水溶性离子.

集中空调系统内部积尘严重并伴随微生物的滋生^[1].积尘伴生微生物在适宜的温度、湿度条件下,生长繁殖,并释放出多种代谢产物^[2-3],随送风进入建筑物内,加剧室内空气污染^[4-7].研究表明,空调系统中最大的微生物源是空调机组,因此防止空调机组的微生物污染是解决问题的关键^[8].已有研究测试了微生物对空调系统设备的污染情况,认为系统微生物污染可导致送风空气质量的下降^[9-10];Jamriska M 和 Schneider T 等讨论了微生物和颗粒物的运动及沉降性质,得出一定条件下粒子的沉积规律^[11-12];也有国内学者分析了空调温度、湿度对微生物生长的影响,提出湿度对微生物生长的影响大于温度^[13],实测了空调机组不同处理段微生物污染情况,提出空调机组的真菌优势菌属是青霉属、曲霉属和枝孢霉属^[14].但并未见到空调系统积尘的理化特征对微生物滋生及室内空气质量可能造成影响的相关研究.

空调系统积尘中含有的总有机碳(TOC)以及水溶性离子(主要包括 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}),均是生物体所需的营养物质.同时,积尘中含有的TOC富含致癌物质和基因毒性诱变物^[15].所以研究空调系统积尘理化特征对于控制微生物的滋生及减少室内化学污染具有重要意义.

本文对集中空调系统内积尘理化特征进行测试分析,并评估积尘对微生物滋生的影响.

1 实验方法

1.1 采样地点

选取西安市某大厦中央空调系统作为采样点,该建筑位于交通主干道旁.空调系统形式为组合式空调柜,该空调系统3年未进行清洗.实验中,共采集了新风段、回风段、混合段、过滤段、表冷段、风机段以及送风风管7个典型样本区域的积尘,采样位置如图1所示.

1.2 样品采集与处理

严格按照通风空调系统清洗规范中的人工刮拭法进行样品采集^[16],对每个处理段以不同朝向壁面(上壁面、下壁面、左壁面、右壁面)分别进行采集,每个壁面取样面积为 $(5 \times 10) \text{ cm}^2$,最后将不同朝向壁面采集的粉尘样品进行均匀混合,并将样品于广口瓶中避光保存.粉尘的粒度分布采用美国贝克曼公司的LS230激光粒度分析仪分析.预处理采用超声波振荡仪(C9860A)和冷冻离心机(Avanti J-26XP).

2010年10月6日收稿.

^{*} 中国博士后基金面上资助项目(20090461287).

^{**} 通讯联系人, Tel: 13759952772; E-mail: fanyuesheng@xauat.edu.cn

超纯水的制取采用美国 PALL-GELMAN 公司生产的超纯水机. 预处理使用万分之一的电子天平,称取 0.1 g 积尘萃取至 1000 mL 溶液中,振荡 30 min,离心 5 min 后置于 50 mL 的试管中待用.

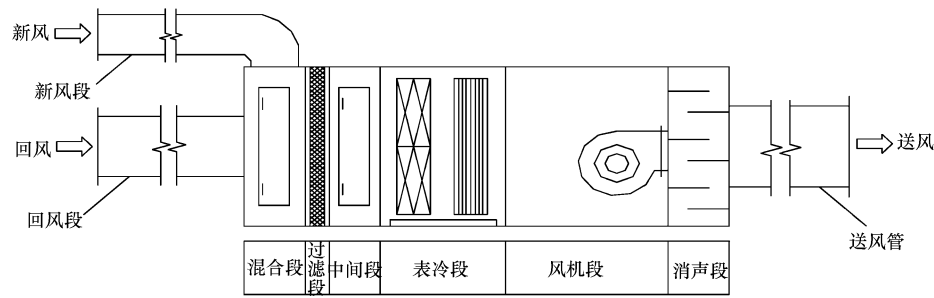


图 1 采样位置布置示意图
Fig.1 Diagram of sampling location

1.3 水溶性离子分析

粉尘中的阴、阳离子分别采用 Metrohm-792 型和 Metrohm-761 型离子色谱仪分析. 阳离子使用 CS12A 柱,淋洗液使用浓度为 2 mmol·L⁻¹的硝酸. 阴离子使用 AS11 柱,淋洗液是浓度为 2 mmol·L⁻¹的碳酸氢钠与 1.3 mmol·L⁻¹的碳酸钠,再生液为 50 mmol·L⁻¹的硫酸.

1.4 水溶性碳分析

粉尘中的水溶性有机碳(TOC)、总碳(TC)、无机碳(IC)采用美国哈希公司生产的 IL500 总有机碳分析仪测定,标线浓度范围为 0—20 mg·L⁻¹. 实验中对样品进行连续测量,若两次测量结果相差小于 2%,则认为测量结果有效,取其平均值;否则继续进行测量,直到两次测量结果相差小于 2%.

1.5 微生物培养

首先将积尘样本无菌操作加入 100 mL 浓度为 0.01% 的 Tween-80 水溶液中,搅拌并摇匀后取 1 mL 含菌溶液,做 10 倍梯级稀释(10⁻¹、10⁻²、10⁻³稀释),分别接种到培养皿内,并对每个培养皿进行编号. 每个尘样对真菌、细菌各做 3 个平行样. 将接种细菌后的营养琼脂(Tryptic Soy Agar)培养皿置 36 ℃ 恒温培养 48 h;将接种真菌后的沙氏琼脂(Sabouraud's Agar)培养皿置 28 ℃ 恒温培养 5 d. 设置空白样,同测试样一起培养,空白样没有菌落生长的,测试结果有效.

2 结果与讨论

2.1 积尘粒度

表 1 中给出了各处理段不同累计体积百分比相对应的粒径值及体积平均粒径. 除新风段外的 6 个处理段积尘的体积平均粒径介于 6—20 μm 之间,新风段积尘中的体积平均粒径达到 41.30 μm;在送风管道内,积尘的体积平均粒径仅为 6.51 μm. 沿着送风方向,其体积平均粒径基本呈逐渐减小的趋势,这表明粉尘沿着送风方向不断沉积,大粒子比小粒子更易于沉积,同时过滤器对大粒子的过滤效率也大于小粒子.

表 1 累计体积百分比相对应的粒径值(μm)
Table 1 Accumulative total volume percentage and particle size

采样位置	累计体积百分比					平均粒径
	<10%	<25%	<50%	<75%	<90%	
新风段	3.300	6.985	89.300	220.500	255.100	41.300
回风段	4.592	8.330	15.380	29.520	83.770	16.640
混合段	4.049	7.994	16.480	36.300	108.000	17.720
过滤段	2.586	5.478	15.440	44.970	74.860	14.300
表冷段	2.778	4.478	8.086	14.600	24.790	8.297
风机段	2.780	4.723	7.988	16.010	29.770	9.689
送风管	2.312	3.636	5.760	10.030	26.030	6.505

2.2 水溶性碳

图 2 中给出了各处理段积尘中水溶性有机碳(TOC)、总碳(TC)、无机碳(IC)的质量百分比. 从图 2 可以看出,沿着送风方向,积尘平均粒径逐渐减小,各处理段积尘中水溶性 TOC、TC、IC 的百分含量呈现上升趋势,但水溶性 IC 百分含量增幅较小,这说明小粒子的水溶性有机碳含量高于大粒子. 7 个处理段中,新风段积尘含碳物质所占比例最小,TOC、TC 以及 IC 仅分别占 2. 14%、2. 89% 与 0. 755%;而送风管积尘含碳物质所占比例最大,TOC、TC 以及 IC 分别达到 7. 34%、8. 46% 和 1. 12%. 西安市在春、夏、秋、冬季 PM10 中水溶性碳所占质量分数分别为 7. 2%、4. 8%、7. 4%、7. 0%,平均值为 6. 6%^[17],其与送风管积尘含碳物质所占比例接近. 这表明风管积尘与大气颗粒物的平均粒径接近.

从图 2 可以看出,沿着送风方向, TOC/IC 的比值呈现增大趋势. 这说明随着粒径的减小,水溶性有机碳含量增幅高于水溶性无机碳.

2.3 水溶性离子

表 2 给出了各处理段积尘中离子所占质量百分含量. 从表 2 可以看出,阳离子中的 Na⁺、NH₄⁺、Ca²⁺ 所占质量百分含量较大,约占水溶性阳离子的 90%. 阴离子中的 SO₄²⁻ 所占质量百分含量较大,约占水溶性阴离子的 80%. 图 3 显示了积尘平均粒径与积尘中水溶性离子所占百分含量的关系. 从图 3 可以看出,积尘中 9 种水溶性离子占积尘质量的 7%—20% 之间,阳离子约占积尘质量的 3%—6%,阴离子约占 4%—14%. 沿着送风方向,单位积尘量所含的阴离子、阳离子以及离子整体呈上升趋势,但粒子平均粒径也不断减小,这说明小粒子中的水溶性离子含量高于大粒子.

表 2 离子所占质量百分比(%)
Table 2 The percentage of water soluble ions

离子	新风段	回风段	混合段	过滤段	表冷段	风机段	送风管
Na ⁺	0. 274	2. 305	0. 545	1. 300	2. 485	2. 365	0. 377
NH ₄ ⁺	1. 276	0. 135	1. 930	0. 070	0. 620	0. 315	3. 608
K ⁺	0. 297	0. 425	0. 305	0. 260	0. 375	0. 290	0. 585
Ca ²⁺	1. 497	2. 435	2. 985	1. 825	1. 915	2. 095	1. 452
Mg ²⁺	0. 060	0. 195	0. 200	0. 295	0. 210	0. 155	0. 059
F ⁻	0. 067	0. 092	0. 049	0. 010	0. 053	0. 220	0. 148
Cl ⁻	0. 359	0. 396	1. 175	0. 441	0. 533	0. 425	1. 335
NO ₃ ⁻	0. 493	0. 472	2. 130	0. 308	1. 704	2. 140	4. 391
SO ₄ ²⁻	3. 539	6. 374	8. 412	7. 441	7. 205	7. 811	7. 640

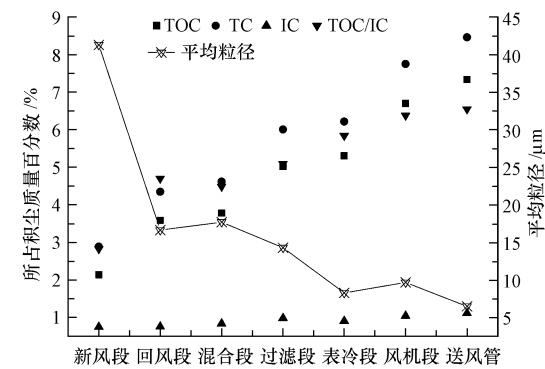


图 2 粒径与碳物质所占百分比的关系
Fig. 2 The relationship between particle size and carbon content

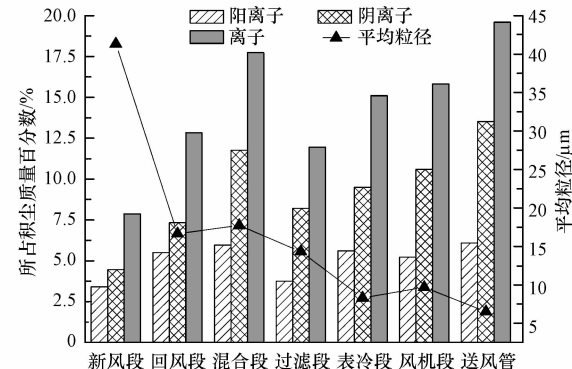


图 3 粒径与离子所占百分比的关系
Fig. 3 The relationship between particle size and ion content

2.4 微生物

表 3 列出了各采样段微生物的培养结果. 沿送风方向,单位积尘量中微生物总体呈增长趋势. 但在表冷段单位积尘量中细菌与真菌达到最大值. 这是因为在表冷段空气湿度达到机器露点,约为 95%^[18],

此时还会产生部分冷凝水,这为微生物生长繁殖创造了极为有利的条件.

表 4 给出了新风段、回风段、混合段及送风管中,单位面积的积尘量(由于表冷器、过滤器风机段不适于单位面积积尘进行评估,故未给出).由表 4 可以看出,单位面积积尘量沿送风方向不断减小;由于混合风的 90% 来自于回风,混合段积尘量与回风段积尘量相近;送风由于经过空气过滤器过滤,以及空气中的粒子在表冷段、风机段等部位的沉积作用,使得送风管单位面积积尘量最小;4 个采样位置中,只有新风段积尘超过国家标准规定的 $20\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,约是标准的 1.5 倍.

利用单位面积积尘量以及积尘中水溶性离子及碳的百分含量,可得到新风段、回风段、混合段、送风管壁面上单位面积水溶性离子及有机碳的含量,如表 4 所示.从表 4 可以看出,新风段单位面积水溶性离子及有机碳的含量最高,分别为 $2.51\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 与 $0.68\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,送风管单位面积水溶性离子及有机碳的含量最小,回风段与混合段二者含量接近.

利用单位面积积尘量以及单位积尘微生物浓度,可得到新风段、回风段、混合段、送风管壁面上单位面积微生物的浓度,如表 4 所示.从表 4 中可以看出,只有送风管壁面微生物浓度低于国家标准规定的细菌 $\leq 100\text{ CFU}\cdot\text{cm}^{-2}$,真菌 $\leq 100\text{ CFU}\cdot\text{cm}^{-2}$;新风段单位面积细菌与真菌浓度更是高达 $198\text{ CFU}\cdot\text{cm}^{-2}$ 与 $197\text{ CFU}\cdot\text{cm}^{-2}$,约是国家标准规定的 2 倍.

进一步分析细菌、真菌与水溶性有机碳以及水溶性离子之间的相关性,结果表明,单位面积微生物的浓度与单位面积水溶性有机碳的含量呈正相关,与细菌和真菌的相关系数分别为 0.943 和 0.940;但其与水溶性离子含量的关系不明显,相关系数分别为 0.596 和 0.550.这说明有机碳源对微生物的影响大于水溶性离子,同时也说明水溶性有机碳与水溶性离子对细菌的影响大于真菌.综上可知,需要通过控制单位面积积尘量以及微小粒子,减少微生物生长所需化学物质,从而减小室内微生物污染.

表 3 积尘中微生物数($\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$)
Table 3 The number of microbial in the dust

采样点	新风段	回风段	混合段	过滤段	表冷段	风机段	送风管
细菌	61700	91666	86700	105000	205000	156666	186700
真菌	61668	78333	65000	80000	135000	91666	100000

表 4 单位面积的积尘量、有机碳、水溶性离子及微生物
Table 4 The concentration of TOC, water soluble ions and microbial per unit area

	新风段	回风段	混合段	送风管
积尘量/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	31.98	14.01	14.06	4.38
水溶性 TOC/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	0.68	0.53	0.50	0.32
水溶性离子/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	2.51	1.80	2.49	0.86
细菌/ $(\text{CFU}\cdot\text{cm}^{-2})$	198	128	122	82
细菌是否超标	否	是	是	否
真菌/ $(\text{CFU}\cdot\text{cm}^{-2})$	197	109	91	44
真菌是否超标	是	是	否	否

3 结论

沿送风方向,微粒的平均粒径减小,单位积尘量所含的水溶性离子和有机碳明显增大,但水溶性无机碳含量变化较小;沿送风方向,单位积尘量所含微生物呈增长趋势,但在表冷段单位积尘量中微生物浓度最高;单位面积微生物浓度与单位面积水溶性有机碳含量呈正相关,且相关系数较高,但与单位面积水溶性离子含量相关性较差,有机碳源对微生物的影响大于水溶性离子.

为了减少空调系统造成的微生物及碳物质的污染,应加强对单位面积积尘量以及微小粒子的控制,减少微生物生长所需有机碳物质,同时应加强新风段与表冷段的消毒.

参 考 文 献

[1] 李先瑞. 空调通风管道的管理(上)[J]. 节能与环保,2003,6:36-39

[2] Homer W E, Miller J D. Microbial volatile organic compounds with emphasison those arising from filamentous fungal contaminants of buildings[J]. ASHRAE Transactions,2003,109(1):215-231

[3] Ole Fanger P. What is IAQ? [J]. Indoor Air, 2006, 16:328-334

[4] Lu Z, Lu W Z, Zhang J L, et al. Microorganisms and paricles in AHU systems: measurement and analysis [J]. Building and Environment, 2009, 44(4):694-698

[5] Ahearm D G,Crow S A,Simmons R B,et al. Fungal colonization of air filters and insulation in a multi-story office building: Production of volatile organics[J]. Curr Microbiol,1997,35:305-308

[6] Kemp P C,Neumeister-Kemp H G,Esposito B,et al. Changes in airborne fungi from the outdoors to indoor air: large HVAC systems in non-problem buildings in two different climates[J]. AIHA Journal,2003,64(2):269-275

[7] Simmons R B,Prie D L,Noble J A,et al. Fungal colonization of air filters from hospitals[J]. AIHA Journal, 1997,58:900-904

[8] 沈晋明,许钟麟. 空调系统的二次污染与细菌控制[J]. 暖通空调,2002,32(5):30-33

[9] Pasanen P, Pasanen A, Jantunen M. Water condensation promotes fungal growth in ventilation ducts [J]. Indoor Air, 1993, 3: 106-112

[10] Murtoniemi T, Hirvonen M R, Nevalainen A, et al. The relation between growth of four microbes on six different plasterboards and biological activity of spores [J]. Indoor Air, 2003, 13: 65-73

[11] Jamriska M, Morawska L, Ensor D S. Control strategies for sub-micrometer particles indoors: model study of air filtration and ventilation [J]. Indoor Air, 2003, 13: 96-105

[12] Schneider T, Bohgard M. Airborne particle deposition onto the ocular surface [J]. Indoor Air, 2005, 15: 215-219

[13] 刘文碧,刘迎云,廖颖,等. 空调系统中温湿度与真菌污染关系的研究[J]. 环境科技,2009,22(3):22-25

[14] 李安桂,姚灵芝,侯娟娟,等. 集中式空调机组系统微生物污染的实测分析[J]. 暖通空调, 2010, 40(3):121-125

[15] Chow J C,Watson J G, Fujita E M, et al. Temporal and spatial variations of PM2.5 and PM10 aerosol in the Southern California air quality study[J]. Atmospheric Environment, 1994, 28:2061-2080

[16] GB19210—2003. 空调通风系统清洗规范[S]. 北京:中国标准出版社,2003

[17] 霍宗权,沈振兴,田晶,等. 西安市大气 PM10 中水溶性有机碳的季节变化及来源分析[J]. 西安交通大学学报,2010,44(9):128-132

[18] 赵荣义,范存养,薛殿华,等. 空气调节[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006:117-117

PHYSICAL AND CHEMICAL BEHAVIOR OF DUST DEPOSITION
IN CENTRAL AIR-CONDITIONING SYSTEM

FAN Yuesheng¹ SI Pengfei^{1,2} LI Angui¹ LIU Shaofeng³

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China;
2. China Southwest Architectural Design & Research Institute Ltd., Chengdu, 610081, China;
3. China Northwest Municipal Engineering Design & Research Institute Ltd., Lanzhou, 730000, China)

ABSTRACT

A study was carried out to assess how dust deposits affect the breeding of microorganisms in central air-conditioning systems. Dust deposits from 7 different locations of a commercial air-conditioning system were collected. Particle size distribution and content of total organic carbon (TOC), inorganic carbon(IC) and water soluble ions were analyzed. Results revealed that, with the exception of the fresh air section, the average particle size of the dust falls into the range of 6 μm to 20 μm (the average particle size of dust in the fresh air section is 41.30 μm); Along the direction of air supply, the content of carbon and water soluble ions increased and average particle size decreased. The microorganism concentration also increased along the direction, however, it is the highest in the cooling section. A positive correlation between microbial concentration and the content of soluble organic carbon per unit area was observed. In order to reduce indoor air pollution, air filters with high grade efficiency to small particles should be taken. And disinfection measures should be taken in the air-conditioning systems, especially in the fresh air section and cooling section.

Keywords: TOC, TOC/IC, dust, central air-conditioning system, water soluble ions.