许鹏 教授 博士 博导

同济大学机械与能源工程学院

Peng Xu Professor, PhD, PE, MBA

Tongji University

College of Mechanical Engineering

建筑防霾改造实例分析——从办公到住宅

Case study of building retrofit to prevent haze ——from office building to residential building

测试数据：

一个北京人48小时的环境暴露

日期	pm2.5数值	时间	地点	备注
10月12日	140-145	23:58	家	无空气净化器
10月13日	140-155	6:45	家	无空气净化器
	180	7:00	家	无空气净化器
	220-260	7:30	上班路上、出租车内	
	70	8:00	刚到办公室	门窗关
	170	9:20	办公室	开门窗
	221	11:22		
	253	15:32		
	257	17:13		
	300	18:30		
	399	19:00	户外	
	300+	21:00	商场	
	265	21:30	刚到家	未开空气净化器
	135	21:45	家	开空气净化器
	36	22:40	家、卧室	开空气净化器
10月14日	20+	7:30	家、卧室	开空气净化器
	322－380	8:21	上班路上、出租车内	
	309	9:00	办公室	
	330	9:24		
	390	12:27		
	390	13:08		
	436	14:00		
	289	19:46		
	330	20:30	回家路上	
	70	21:30	家、卧室	打开空气净化器
	20-35	22:30	家、卧室	开空气净化器

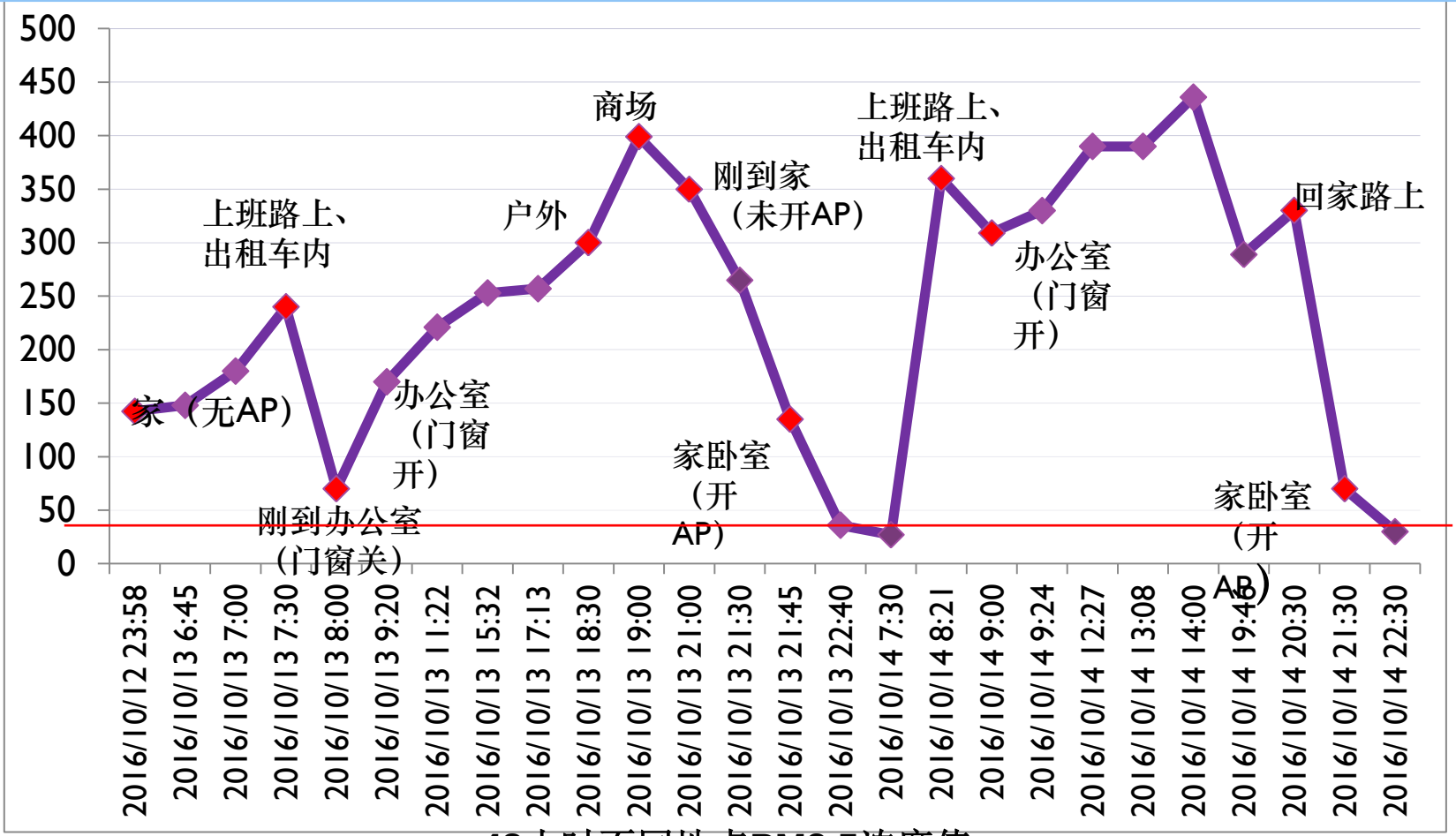
活动地点

办公楼

办公楼内部

居民住宅

48小时测试数据分析



48小时不同地点PM2.5浓度值

国内外PM2.5的检测标准 Standard of PM2.5 concentration at home and abroad

国家/组织 Country/Organization	年平均(μg/m³) Annually average	24小时平均(μg/m³) 24 hours average	备注 Remark
世界卫生组织准则值 WHO criterion value	10	25	2005年发布 Published in 2005
世界卫生组织过渡期目标-1 WHO transition target-1	35	75	
世界卫生组织过渡期目标-2 WHO transition target-2	25	50	
世界卫生组织过渡期目标-3 WHO transition target-3	15	37.5	
欧盟 EU	25	---	2010年发布 Published in 2010
美国 USA	15	35	2010年发布 Published in 2010
日本Japan	15	35	2010年发布 Published in 2010
中国 China	35	75	2016年(征求意见中) Plan to be published in 2016(Seeking for opinions)

中国PM2.5防控标准历程 Progress of PM2.5 prevention-control standards in China

《环境空气PM10和PM2.5的测定重量法》，2011

环保部发布
Published by Ministry of Envrionment Protection
首次对PM2.5的测定进行规范
First specificate the determination of PM2.5
非强制性指标
Not compulsory index

《环境空气质量标准》

国务院发布
Published by State Council
首次纳入国家标准
First included into national legislation
与WHO过渡目标-1相同
Same with WHO transition target-1

起步阶段 **Primary stage** 发展阶段 **Development stage** 2016 未来 **Future**

《环境空气质量标准》，2012

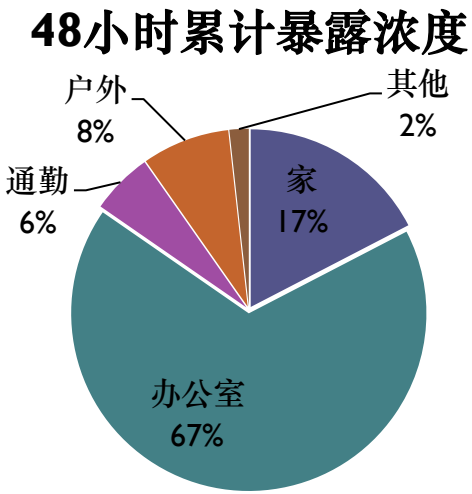
国务院发布
Published by State Council
首次纳入国家标准
First includedinto national legislation
与WHO过渡目标-1相同
Same with WHO transition target-1

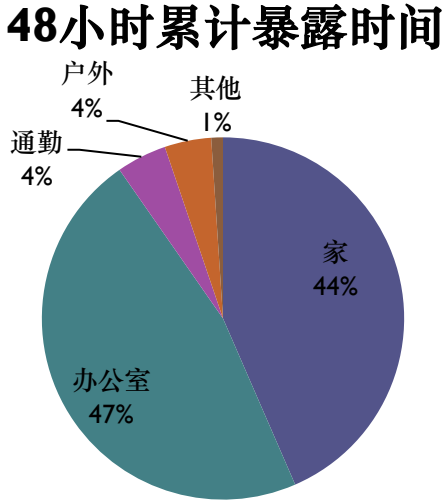
与发达国家相比，仍有很多不足

Compared to developed country,
there are still many deficiencies

欧盟2013年做出的一项研究。来自欧盟的9个国家的17个团队，调查了31万个体样本，根据4百万人.年的数据库和总共2095件肺癌样本，得到的结论是PM2.5的浓度每增加10微克/立方米，肺癌发病率增加36%

48小时测试数据分析





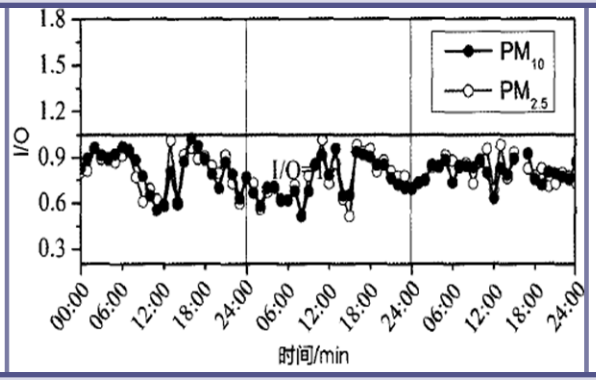
- 室外浓度虽然最高，但暴露时间短，故累计暴露浓度不高；
- 家中因为有空气净化器，故虽然暴露时间长，但累计暴露浓度也不高；
- 办公室在门窗开启的情况下，室内浓度较高，且没有空气净化器，故累计暴露浓度最高。
- 单纯靠空气净化器是不够的，办公室和家庭都需要防雾霾改造。

室内外颗粒物特性及关联性 Indoor and outdoor particle characteristics and correlation

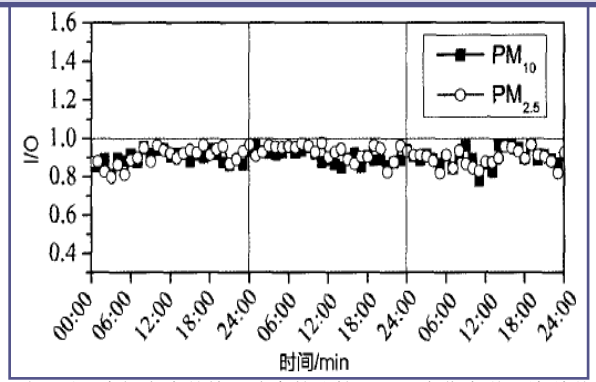
上海市某住宅房间单侧通风条件下颗粒物I/O变化曲线

the particle I/O ratio change curve of a Shanghai residential room under the condition of unilateral ventilation

2013年7月夏季轻霾天light haze days in summer in July, 2013



2013年12月冬季重霾天heavy haze days in winter in december, 2013



	夏季轻霾 light haze day in summer			冬季重霾heavy haze day in winter		
	室外 outdoor	室内 indoor	I/O	室外 outdoor	室内 indoor	I/O
PM2.5	135.1	110.9	0.821	231.6	191.4	0.896
PM10	161.8	129.9	0.803	275.4	229.7	0.834

以上数据表明，室内外颗粒物浓度具有明显的关联性，且PM2.5与PM10的I/O比变化规律具有较好的一致性。室外细颗粒比粗颗粒有更高的穿透性，更易进入室内。

The above data shows that the indoor and outdoor particle concentration has significant correlation, and the change law of I/O of PM2.5 and PM10 has good consistency. Outdoor fine particles have higher penetrating than coarse particle penetrating, and are more likely to enter the room.

《上海地区霾天通风房间室内外粒子浓度的比较》——东华大学环境科学与工程学院 钟珂等

办公室测试
Field test summary

规律性regularity:

●自有建筑的PM2.5现状优于租赁建筑
The PM2.5 research status of self-owned building is superior to the lease

●相同类型建筑的室内PM2.5现状受室外环境影响
Construction of the same type of indoor PM2.5 status by the outdoor environmental impact

多样性diversity:

●建筑的室内PM2.5控制受多因素影响，如室外环境、建筑围护结构气密性、建筑年代、空调系统类型、新风系统过滤效率、人员行为等。
The indoor PM2.5 control of the building is influenced by many factors, such as outdoor environment, building envelop air tightness, the years of the building,the types of air conditioning system, filtration efficiency of the primary air system, personnel behavior and so on.

独立办公室的PM2.5综合过滤效率

Site ID	City	Filtration Rate
1	成都工厂办公室	7%
2	成都市内办公室	19%
3	上海	16%
4	天津	10%
5	北京	41%
6	广州	33%
7	上海	49%

N：北京和上海为自有建筑
综合过滤效率=（室外PM2.5浓度-室内PM2.5浓度）/室外PM2.5浓度

工厂区域办公室的PM2.5综合过滤效率

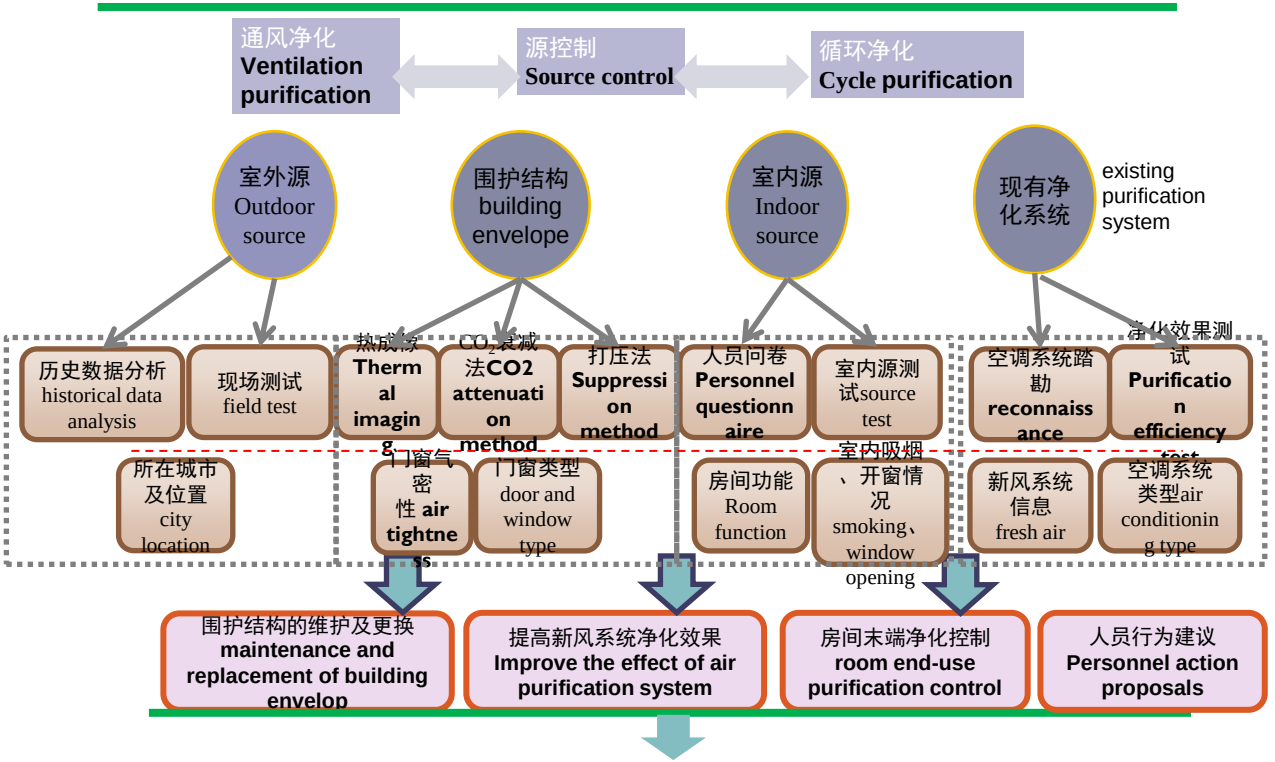
Site ID	City	Filtration Rate
1	Beijing	42%
2	Tianjin	40%
3	Tianjin	41%
4	Xi'an	43%
5	Huludao	35%
6	Dalian	38%
7	Nanjing	7%
8	Yizheng	38%
9	Shanghai	38%
10	Shanghai	15%
11	Shanghai	32%

建筑防雾霾改造

Practices

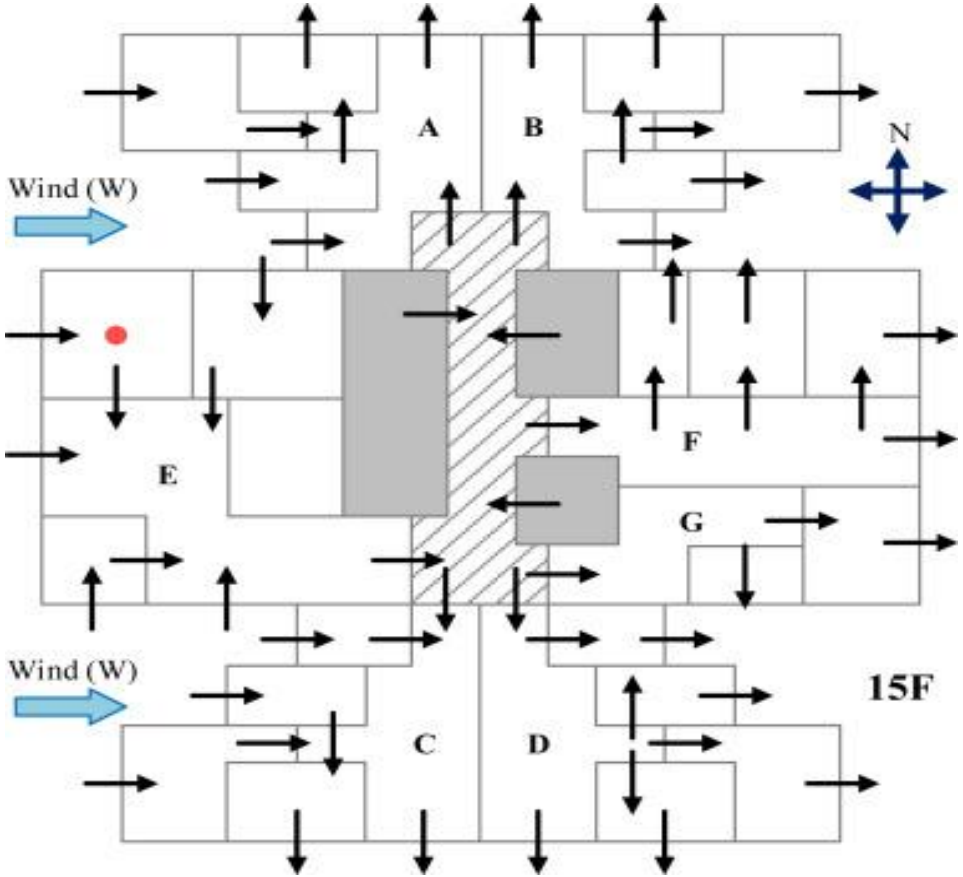
方 法 论 methodology

室内办公及生产环境的PM2.5控制**Indoor PM2.5 control of office and production environment**



11

室内外PM2.5传播 Indoor and outdoor spread of PM2.5



室内外通过门窗缝隙的空气流动

Illustration of airflow through the door and window cracks between rooms

门窗气密性 Air tightness

气密性：外门窗在正常关闭状态时，阻止空气渗透的能力。

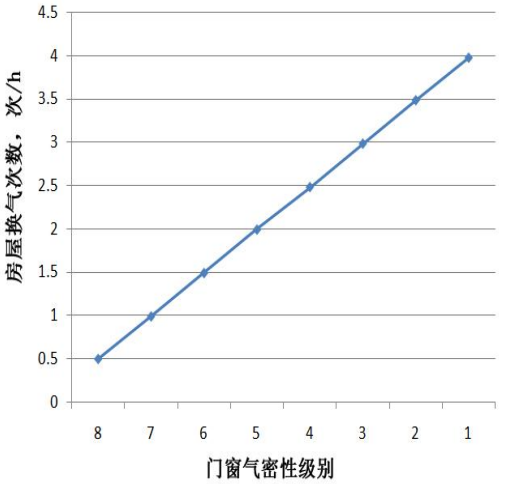
Air tightness: the capacity to prevent air infiltration with outside doors and Windows normally closed.

气密性分级指标：

（压差为10Pa）气密性等级越高，说明门窗的气密性越好，如下表所示：

Air tightness classification indexes:
(differential pressure for 10 pa) the higher the index of doors and Windows is, the better the air tightness is, as shown in the list below:

分级 classification	1	2	3	4	5	6	7	8
单位缝长分级指标值 q_1/[m^3/(m·h)]	$4.0 \geqq q_1 > 3.5$	$3.5 \geqq q_1 > 3.0$	$3.0 \geqq q_1 > 2.5$	$2.5 \geqq q_1 > 2.0$	$2.0 \geqq q_1 > 1.5$	$1.5 \geqq q_1 > 1.0$	$1.0 \geqq q_1 > 0.5$	$q_1 \leqq 0.5$
单位面积分级指标值 q_1/[m^3/(m·h)]	$12 \geqq q_2 > 10.5$	$10.5 \geqq q_2 > 9.0$	$9.0 \geqq q_2 > 7.5$	$7.5 \geqq q_2 > 6.0$	$6.0 \geqq q_2 > 4.5$	$4.5 \geqq q_2 > 3.0$	$3.0 \geqq q_2 > 1.5$	$q_2 \leqq 1.5$



50Pa压力下理论值

the theoretical value under 50 pa pressure

门窗气密性测试 Blower door test

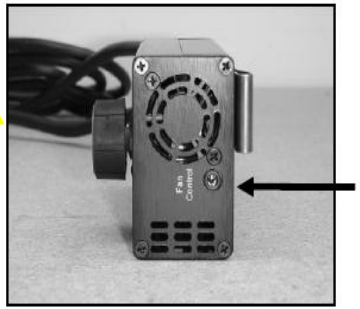
(1)变速风机：产生空气流动达到所需的室内外压力差
a calibrated, variable-speed fan, capable of inducing a range of airflows sufficient to pressurize and depressurize a variety of building sizes

(2)压力测量装置：测量由变速风机产生的压力差
a pressure measurement instrument, called a manometer, to simultaneously measure the pressure differential induced across the face of the fan and across the building envelope, as a result of fan airflow

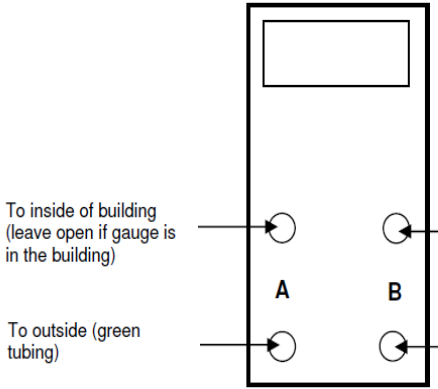
(3)安装系统：将风机安装在门上或窗户上
a mounting system, used to mount the fan in a building opening, such as a door or a window.

门窗气密性测试——鼓风门测试方法 Air tightness test——blower door test

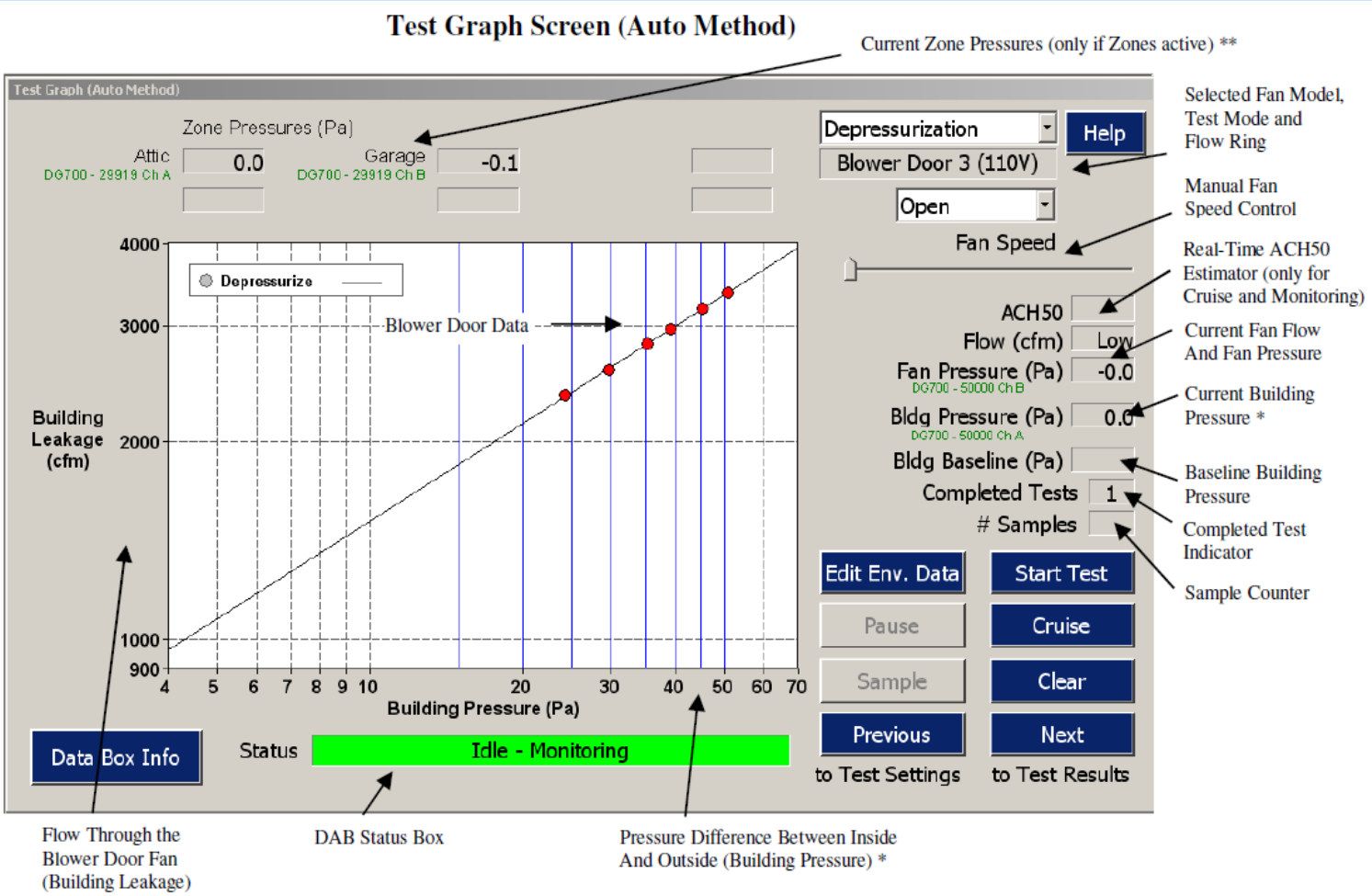
Fan Control Cable



Communication Jack (Blower Door Speed Controller)



门窗气密性测试——鼓风门测试方法 Air tightness test——blower door test



门窗气密性测试——CO_2浓度衰减法 Air tightness test——CO_2 concentration attenuation

实验原理 Principles

基于示踪气体质量守恒方程

According to the equation of mass conservation of the trace gas – carbon dioxide

$$V\frac{dC}{dt} = F - u\left(C - C_{out}\right)$$

示踪气体浓度衰减法是在被研究空间释放一定量的示踪气体，然后在整个实验过程中不再释放，即$F(t)\equiv 0$，则上式化为

Tracer gas concentration attenuation is a method in which tracer gas is released in the studied zone, and it will not be released later during the experiment, so the equation above turns into

$$\frac{dC}{dt} = \frac{u}{V}\left(C_{out} - C\right)$$

防雾霾改造技术与实践篇

practice

办公到住宅

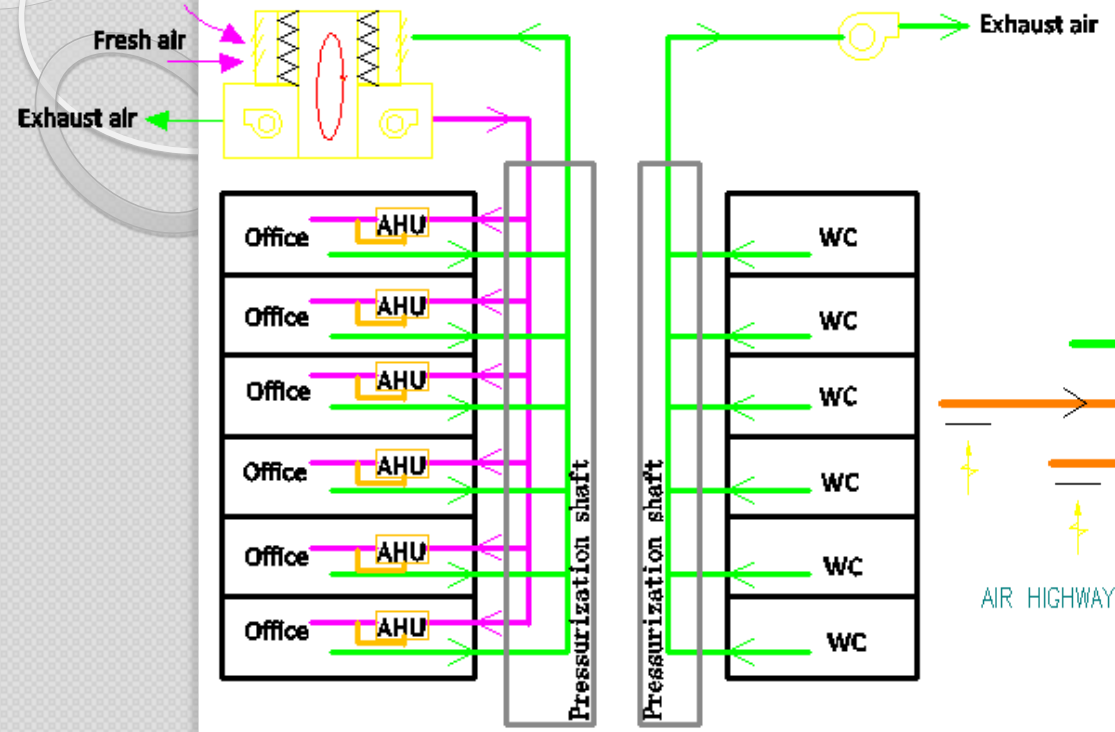
建筑防霾改造案例——微软办公建筑 Case study——Microsoft

建筑基本信息 Basic information of the office building

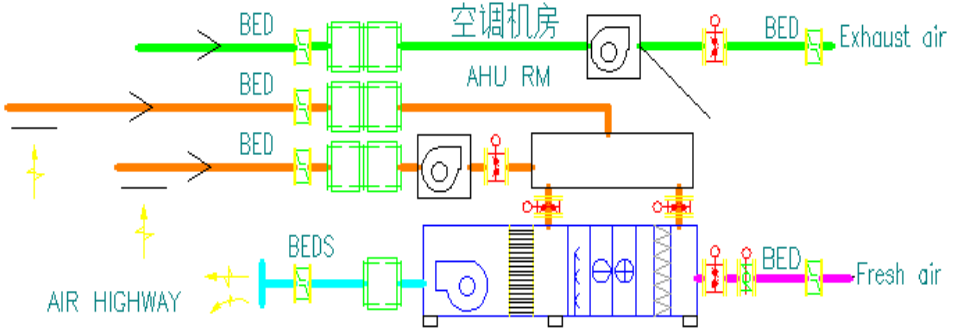
微软中国研发集团总部大楼位于中关村核心商务区的中关村广场，占地面积11600平方米，由两栋大楼组成，南面大楼高80米，地上18层、地下4层；北面大楼高65米，地上15层，地下4层，两栋大楼由第三层通过空中走廊连接。

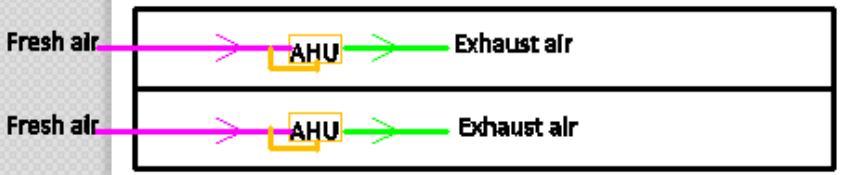
建筑平面图

微软办公建筑——压力控制

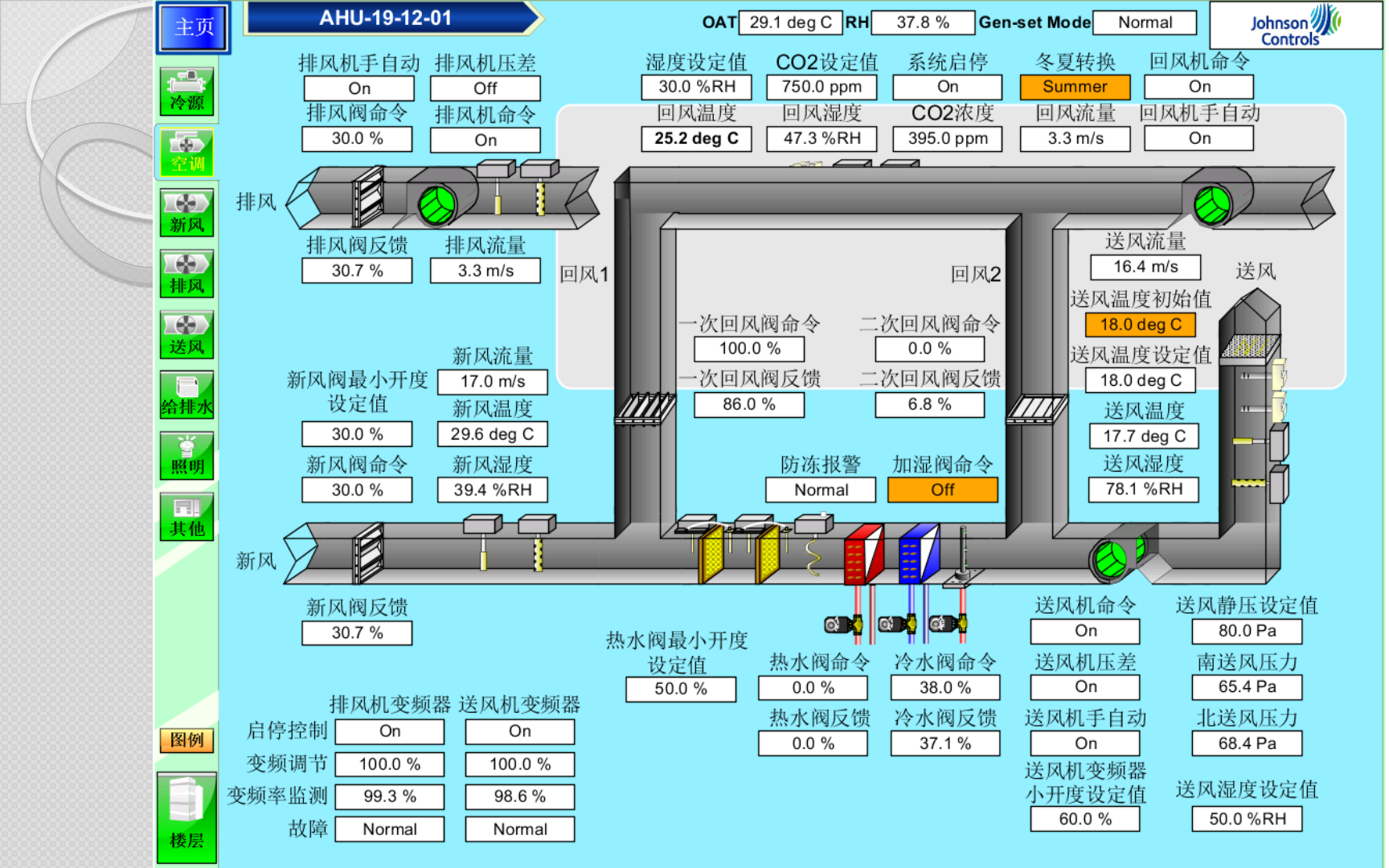


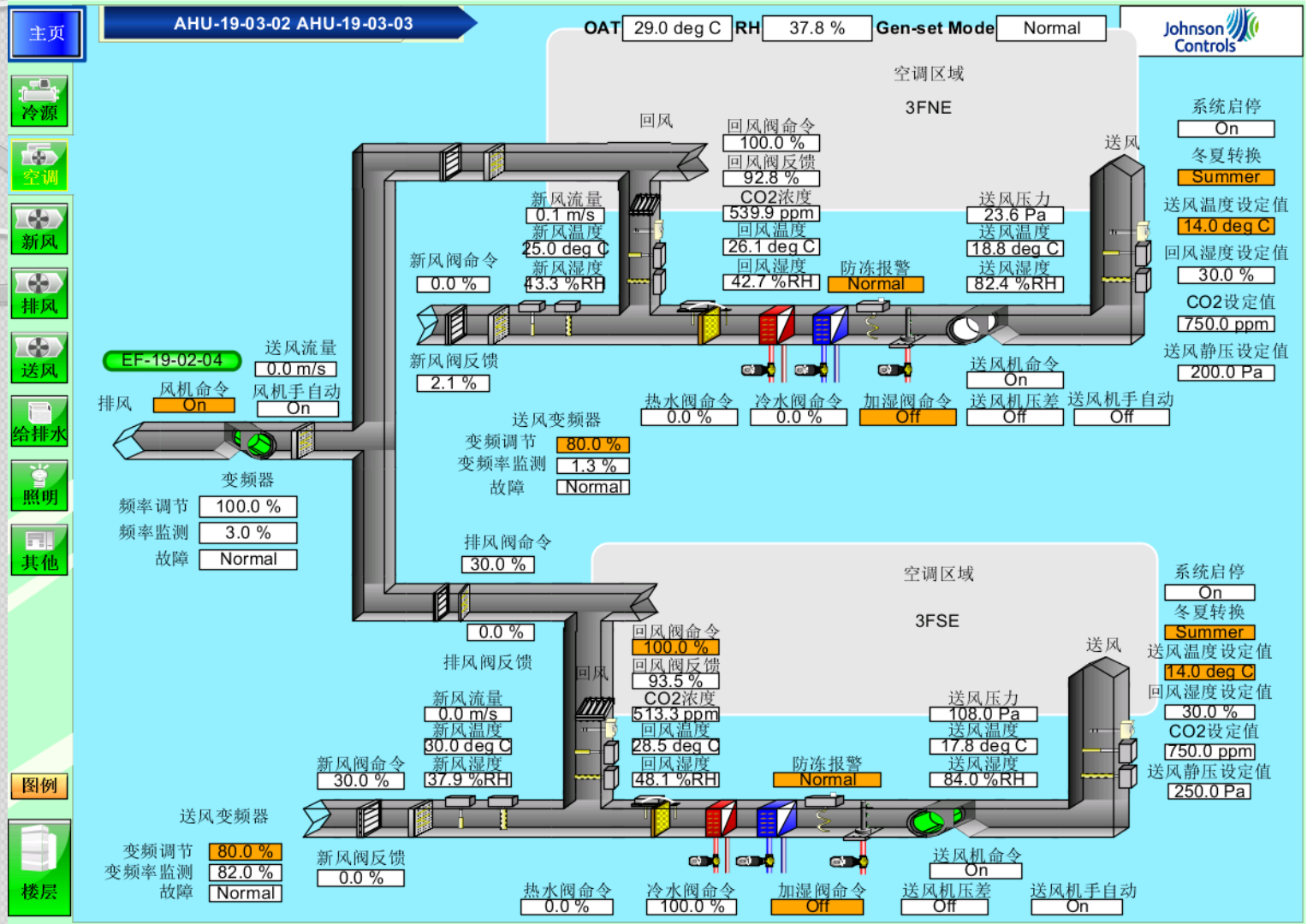
办公区域AHU

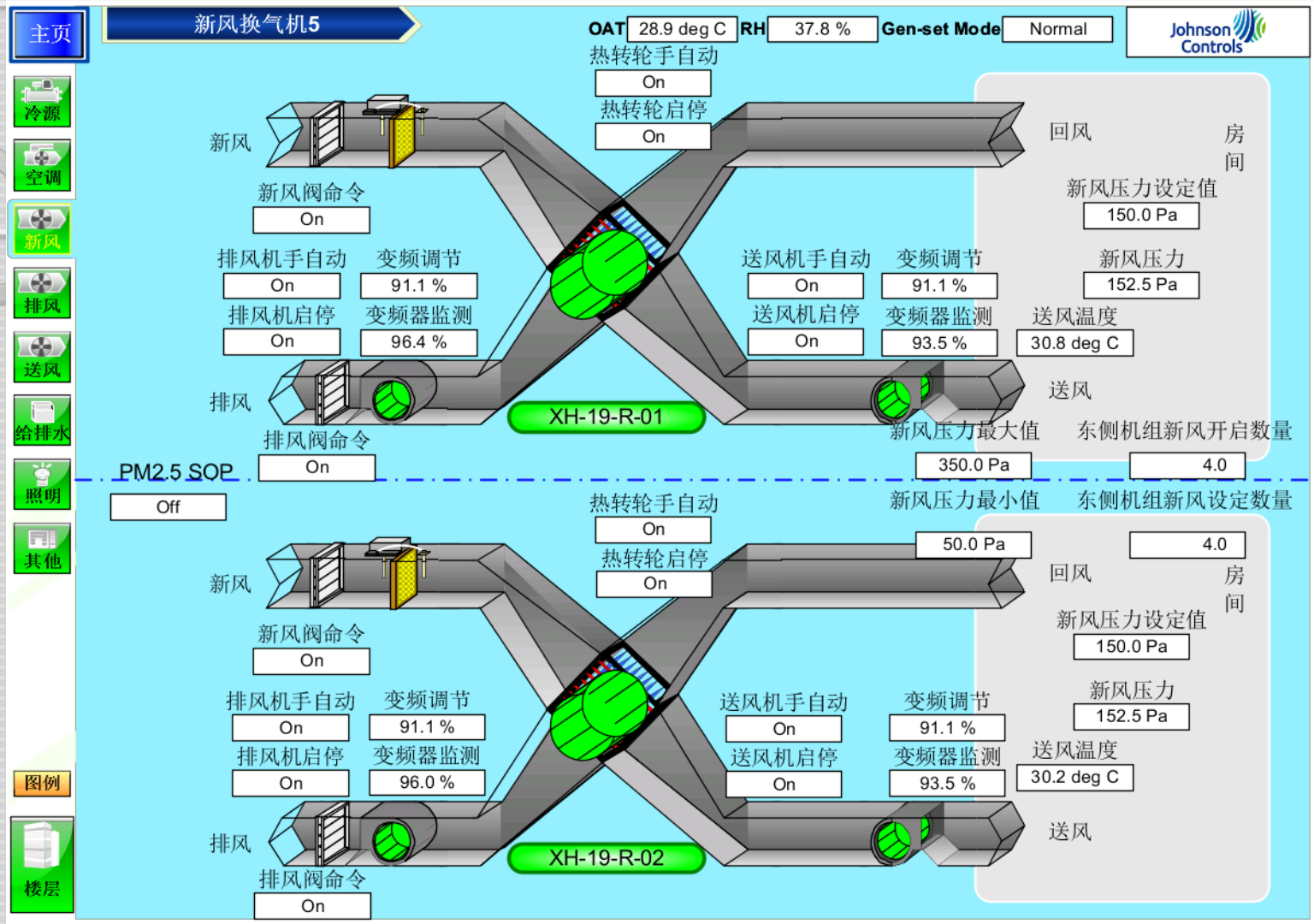




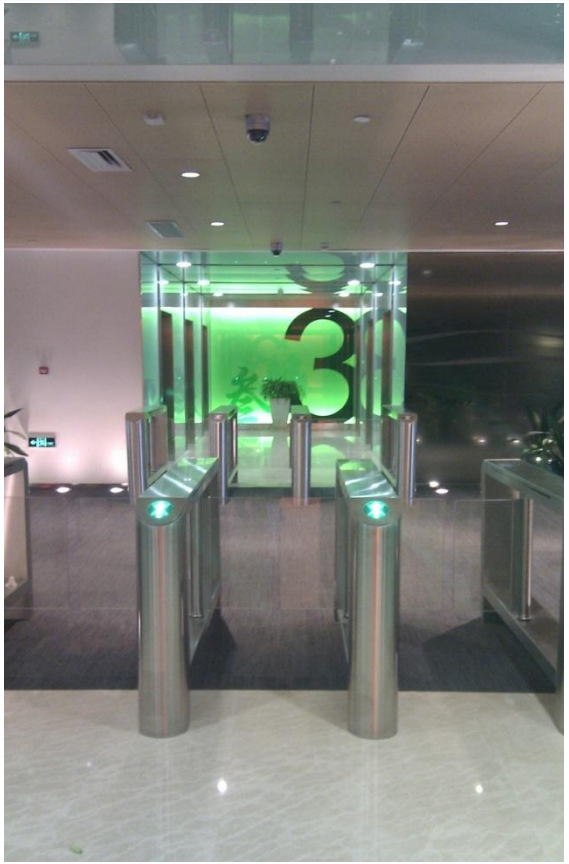
办公区域压力控制示意图


主页
AHU-19-12-01
OAT 29.1 deg C RH 37.8 % Gen-set Mode Normal
Johnson Controls
冷源
空调
新风
排风
送风
给排水
照明
其他
图例
楼层
排风机手自动 On
排风机压差 Off
湿度设定值 30.0 %RH
CO2设定值 750.0 ppm
系统启停 On
冬夏转换 Summer
回风机命令 On
排风阀命令 30.0 %
排风机命令 On
回风温度 25.2 deg C
回风湿度 47.3 %RH
CO2浓度 395.0 ppm
回风流量 3.3 m/s
回风机手自动 On
排风
排风阀反馈 30.7 %
排风流量 3.3 m/s
回风1
回风2
送风流量 16.4 m/s
送风
送风温度初始值 18.0 deg C
一次回风阀命令 100.0 %
二次回风阀命令 0.0 %
送风温度设定值 18.0 deg C
一次回风阀反馈 86.0 %
二次回风阀反馈 6.8 %
新风流量 17.0 m/s
新风阀最小开度设定值 30.0 %
新风温度 29.6 deg C
送风温度 17.7 deg C
新风阀命令 30.0 %
新风湿度 39.4 %RH
防冻报警 Normal
加湿阀命令 Off
送风湿度 78.1 %RH
新风
新风阀反馈 30.7 %
送风机命令 On
送风静压设定值 80.0 Pa
热水阀最小开度设定值 50.0 %
热水阀命令 0.0 %
冷水阀命令 38.0 %
送风机压差 On
南送风压力 65.4 Pa
热水阀反馈 0.0 %
冷水阀反馈 37.1 %
送风机手自动 On
北送风压力 68.4 Pa
排风机变频器
送风机变频器
启停控制 On On
变频调节 100.0 % 100.0 %
变频率监测 99.3 % 98.6 %
故障 Normal Normal
送风机变频器小开度设定值 60.0 %
送风湿度设定值 50.0 %RH

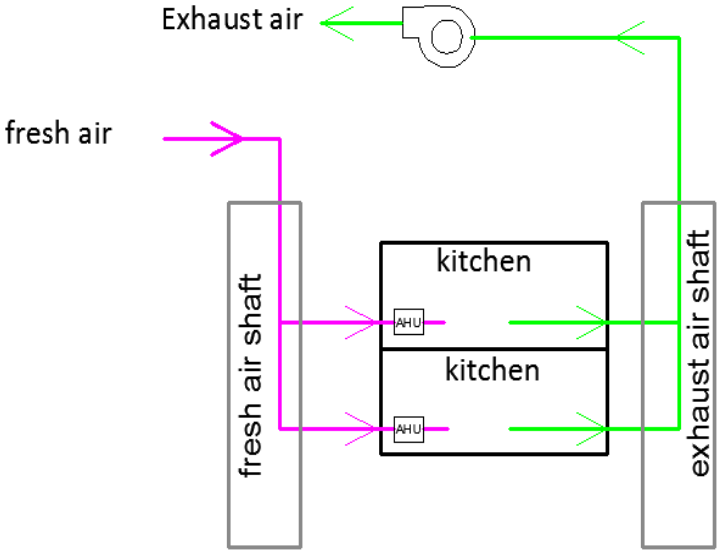

主页
冷源
空调
新风
排风
送风
给排水
照明
其他
图例
楼层
AHU-19-03-02 AHU-19-03-03
OAT 29.0 deg C
RH 37.8 %
Gen-set Mode Normal
Johnson Controls
空调区域
3FNE
回风
回风阀命令 100.0 %
回风阀反馈 92.8 %
CO2浓度 539.9 ppm
回风温度 26.1 deg C
回风湿度 42.7 %RH
新风流量 0.1 m/s
新风温度 25.0 deg C
新风湿度 43.3 %RH
新风阀命令 0.0 %
新风阀反馈 2.1 %
防冻报警 Normal
送风 送风压力 23.6 Pa 送风温度 18.8 deg C 送风湿度 82.4 %RH
系统启停 On
冬夏转换 Summer
送风温度设定值 14.0 deg C
回风湿度设定值 30.0 %
CO2设定值 750.0 ppm
送风静压设定值 200.0 Pa
EF-19-02-04
送风流量 0.0 m/s
排风 风机命令 On 风机手自动 On
送风变频器
变频调节 80.0 %
变频率监测 1.3 %
故障 Normal
送风机命令 On
热水阀命令 0.0 %
冷水阀命令 0.0 %
加湿阀命令 Off
送风机压差 Off
送风机手自动 Off
变频器
频率调节 100.0 %
频率监测 3.0 %
故障 Normal
排风阀命令 30.0 %
0.0 %
排风阀反馈
空调区域
3FSE
回风阀命令 100.0 %
回风阀反馈 93.5 %
CO2浓度 513.3 ppm
回风温度 28.5 deg C
回风湿度 48.1 %RH
新风流量 0.0 m/s
新风温度 30.0 deg C
新风湿度 37.9 %RH
新风阀命令 30.0 %
新风阀反馈 0.0 %
防冻报警 Normal
送风 送风压力 108.0 Pa 送风温度 17.8 deg C 送风湿度 84.0 %RH
系统启停 On
冬夏转换 Summer
送风温度设定值 14.0 deg C
回风湿度设定值 30.0 %
CO2设定值 750.0 ppm
送风静压设定值 250.0 Pa
送风变频器
变频调节 80.0 %
变频率监测 82.0 %
故障 Normal
送风机命令 On
热水阀命令 0.0 %
冷水阀命令 100.0 %
加湿阀命令 Off
送风机压差 Off
送风机手自动 On


主页
新风换气机5
OAT 28.9 deg C RH 37.8 % Gen-set Mode Normal
Johnson Controls
冷源
空调
新风
排风
送风
给排水
照明
其他
图例
楼层
热转轮手自动
On
热转轮启停
On
新风
回风
房间
新风阀命令
On
新风压力设定值
150.0 Pa
排风机手自动
On
变频调节
91.1 %
送风机手自动
On
变频调节
91.1 %
新风压力
152.5 Pa
排风机启停
On
变频器监测
96.4 %
送风机启停
On
变频器监测
93.5 %
送风温度
30.8 deg C
排风
送风
XH-19-R-01
排风阀命令
On
新风压力最大值
350.0 Pa
东侧机组新风开启数量
4.0
PM2.5 SOP
Off
新风压力最小值
50.0 Pa
东侧机组新风设定数量
4.0
热转轮手自动
On
热转轮启停
On
新风
回风
房间
新风阀命令
On
新风压力设定值
150.0 Pa
排风机手自动
On
变频调节
91.1 %
送风机手自动
On
变频调节
91.1 %
新风压力
152.5 Pa
排风机启停
On
变频器监测
96.0 %
送风机启停
On
变频器监测
93.5 %
送风温度
30.2 deg C
排风
送风
XH-19-R-02
排风阀命令
On

微软办公建筑——压力控制



微软办公建筑——压力控制

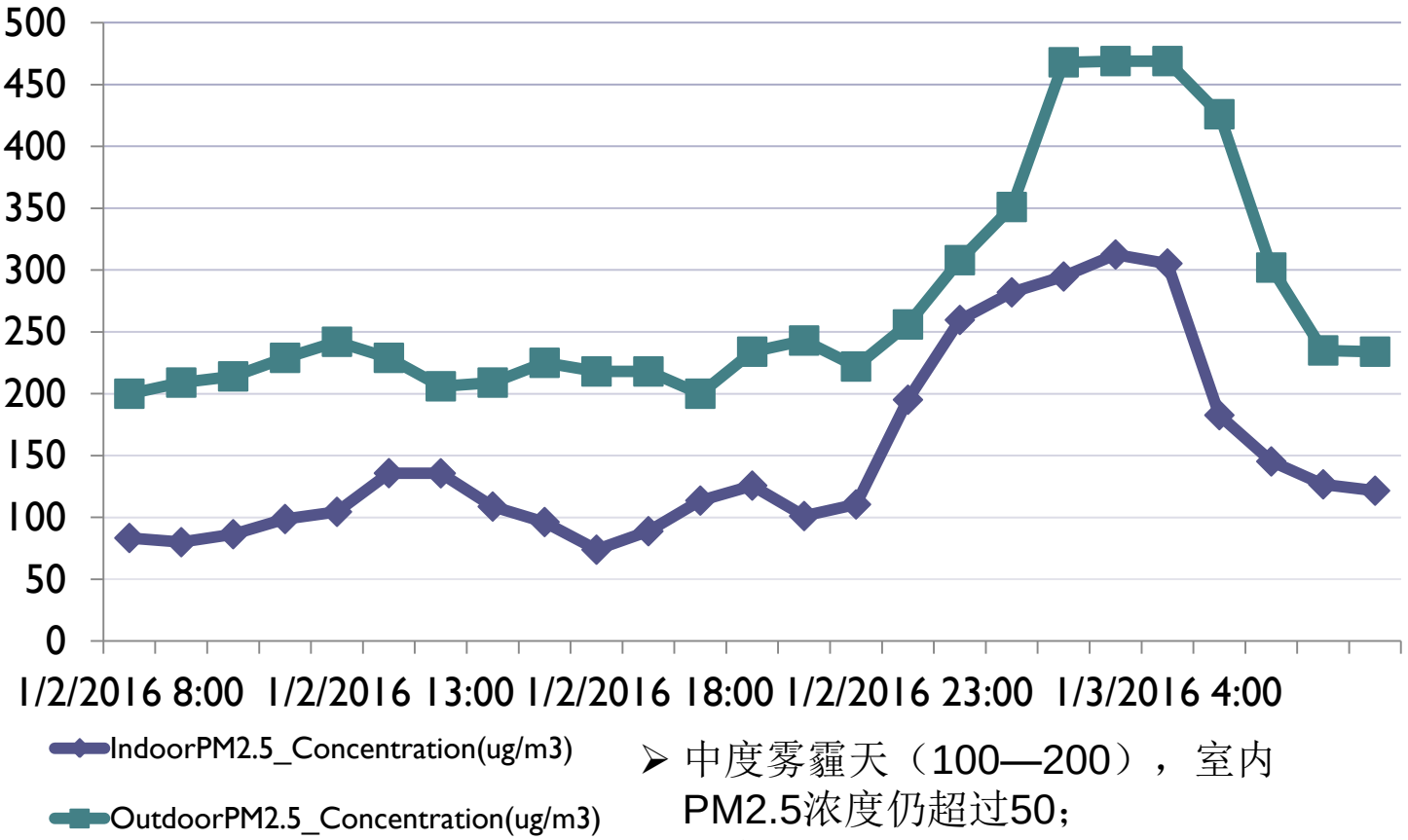


厨房压力控制示意图

微软办公建筑——压力控制

压力控制：

5Pa左右

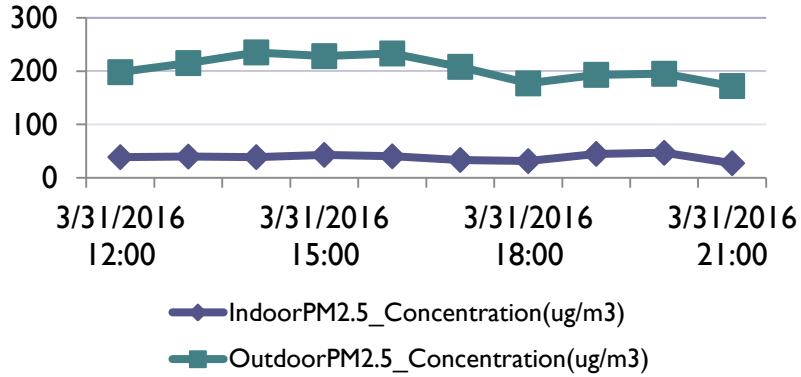


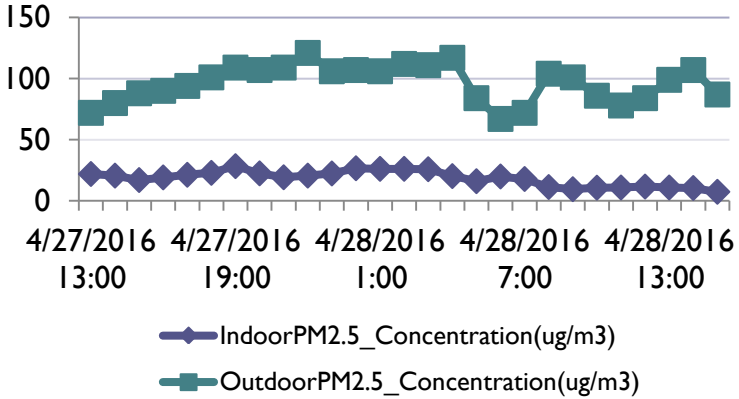
- 中度雾霾天（100—200），室内PM2.5浓度仍超过50；
- 重度雾霾天更严重。

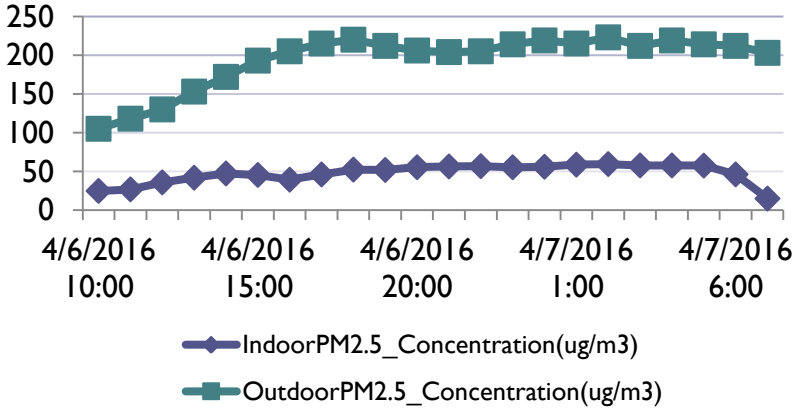
微软办公建筑——压力控制+过滤器更换

新风过滤器：

G4 → G4+F8







- 轻度雾霾天（50—100），室内浓度可维持在35以下；
- 中度雾霾天（100-200），室内浓度可维持在50以下，

常用的主过滤器 the main filter commonly used

- 过滤效率： F5、F6、F7、F8、F9、H10、H11

Filtration efficiency: F5、F6、F7、F8、F9、H10、H11

- 过滤器形式：板式、袋式、密褶式

Filter types: plate, bag, gathers type

- 过滤材料：化纤、玻纤、复合材料（活性炭与滤纸）

Filtering material: chemical fiber, glass fiber, composite materials (activated carbon and filter paper)




★ 选型条件Selection of conditions：

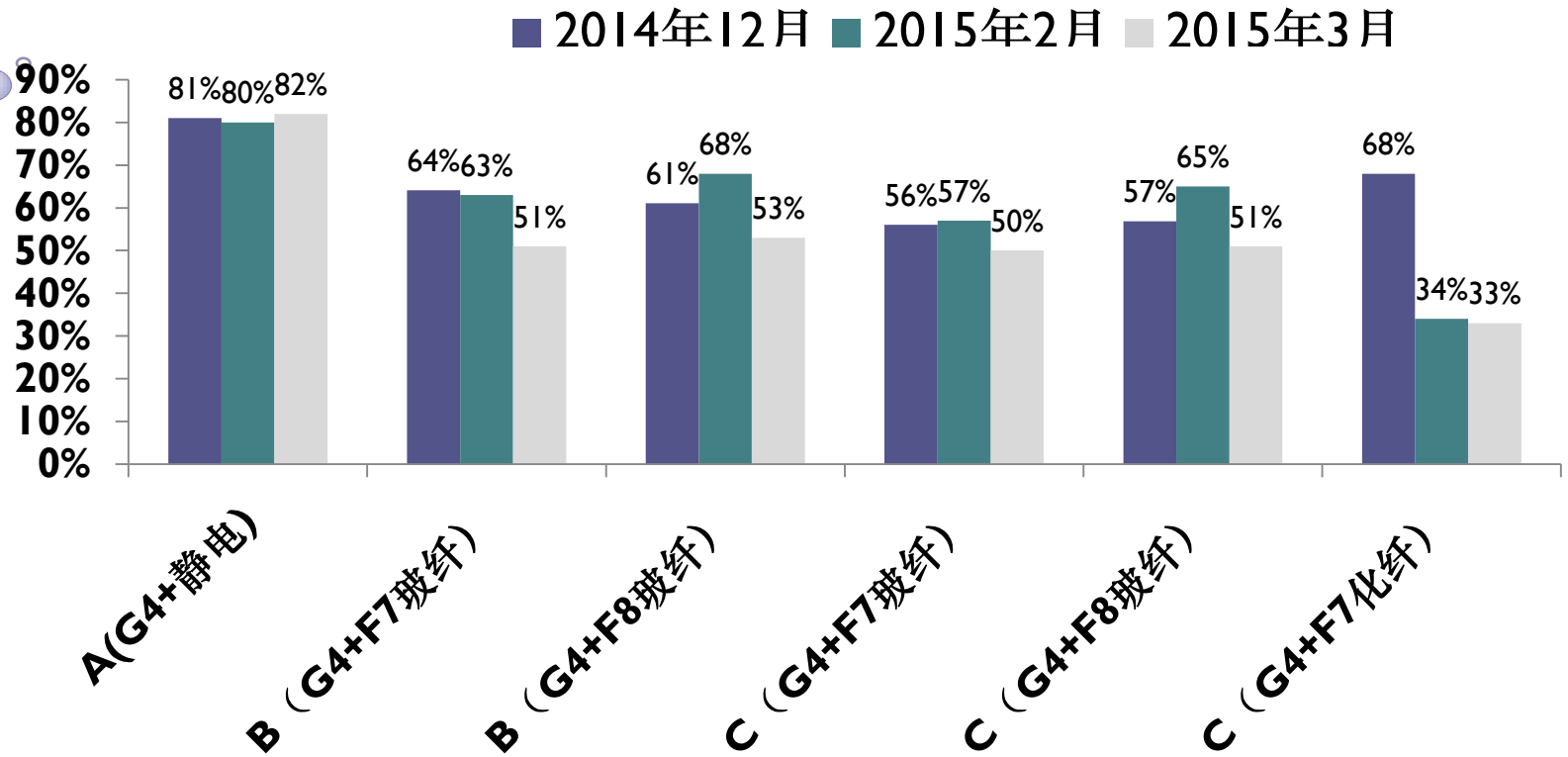
- 控制PM2.5的要求：改善型(F5~F8)、达标型(F9~H11)

Control requirements of PM2.5: improving type (F5 ~ F8), the standard type (F9 ~ H11)

- 安装空间、寿命预期、阻力要求、过滤效率、容尘量、费用等

Installation space, life expectancy, resistance requirements, filtration efficiency, let dust quantity, cost, etc

主动式技术——过滤 Filter

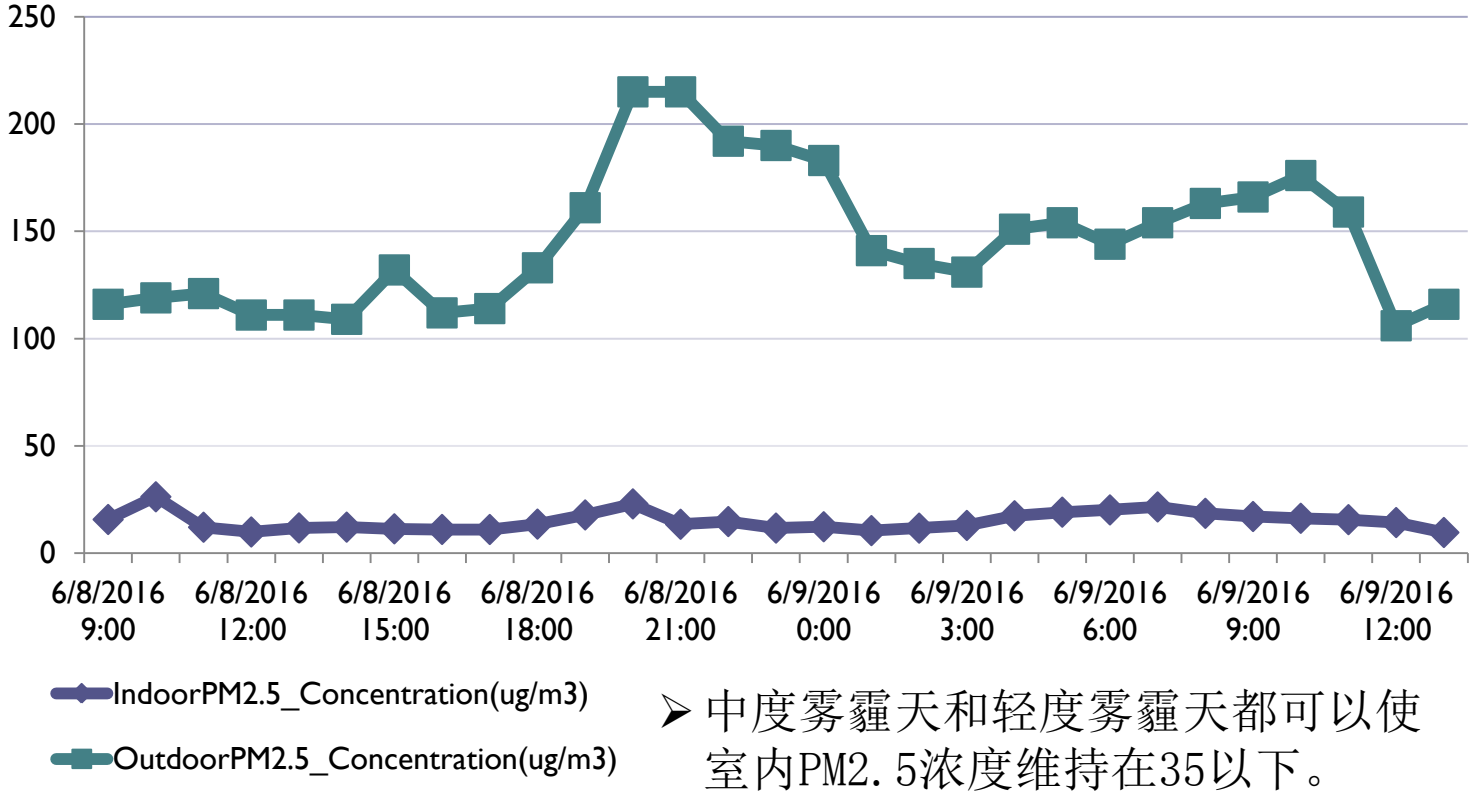


根据一组过滤效率实测数据可看出：粗、中效过滤组合对PM2.5去除效果有限

According to a set of filtration efficiency measured data: the PM2.5 removing effect of the combination of coarse, medium efficiency filter is limited

微软办公建筑——压力控制+过滤器更换+气密性改善

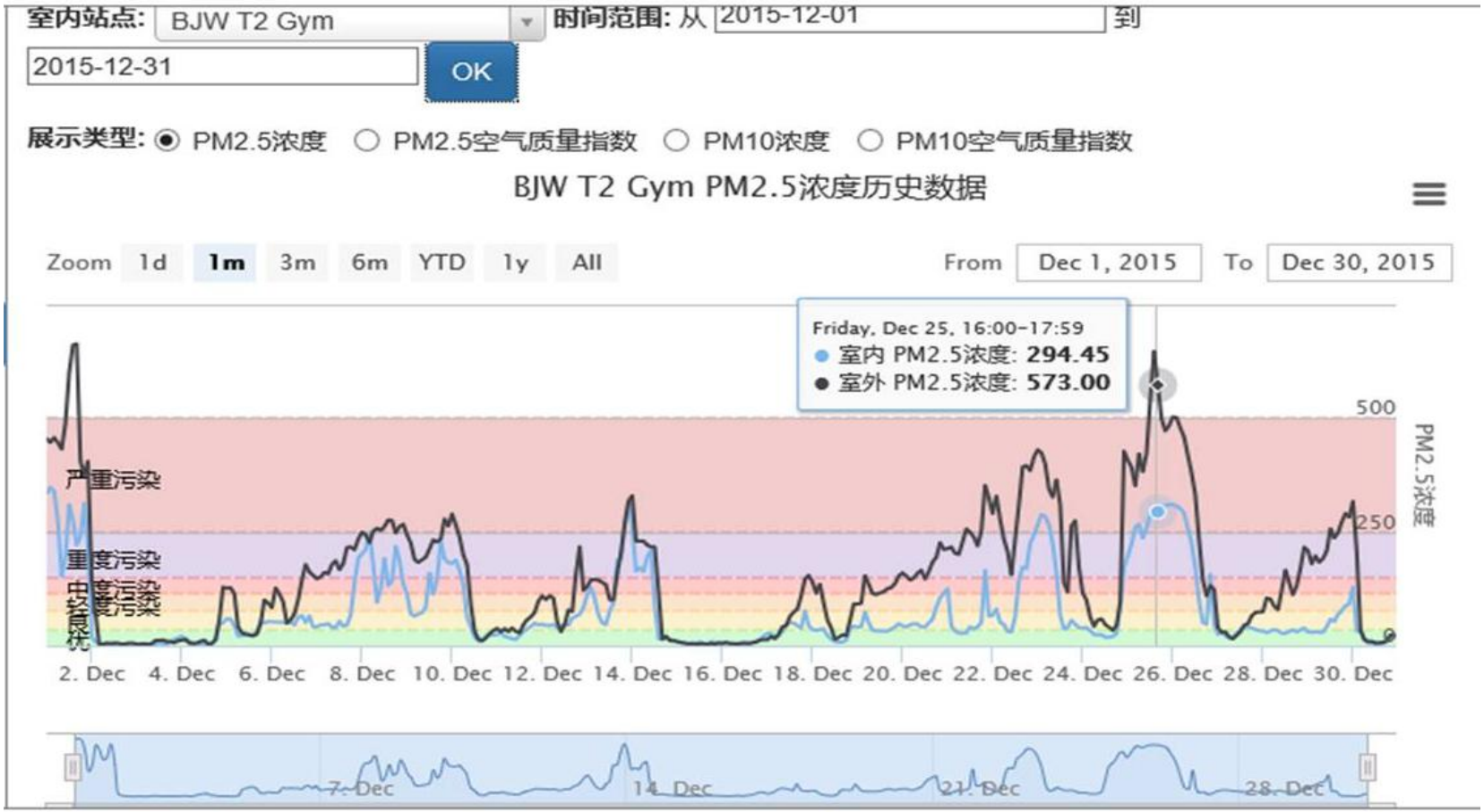
气密性改善



- 中度雾霾天和轻度雾霾天都可以使室内PM2.5浓度维持在35以下。

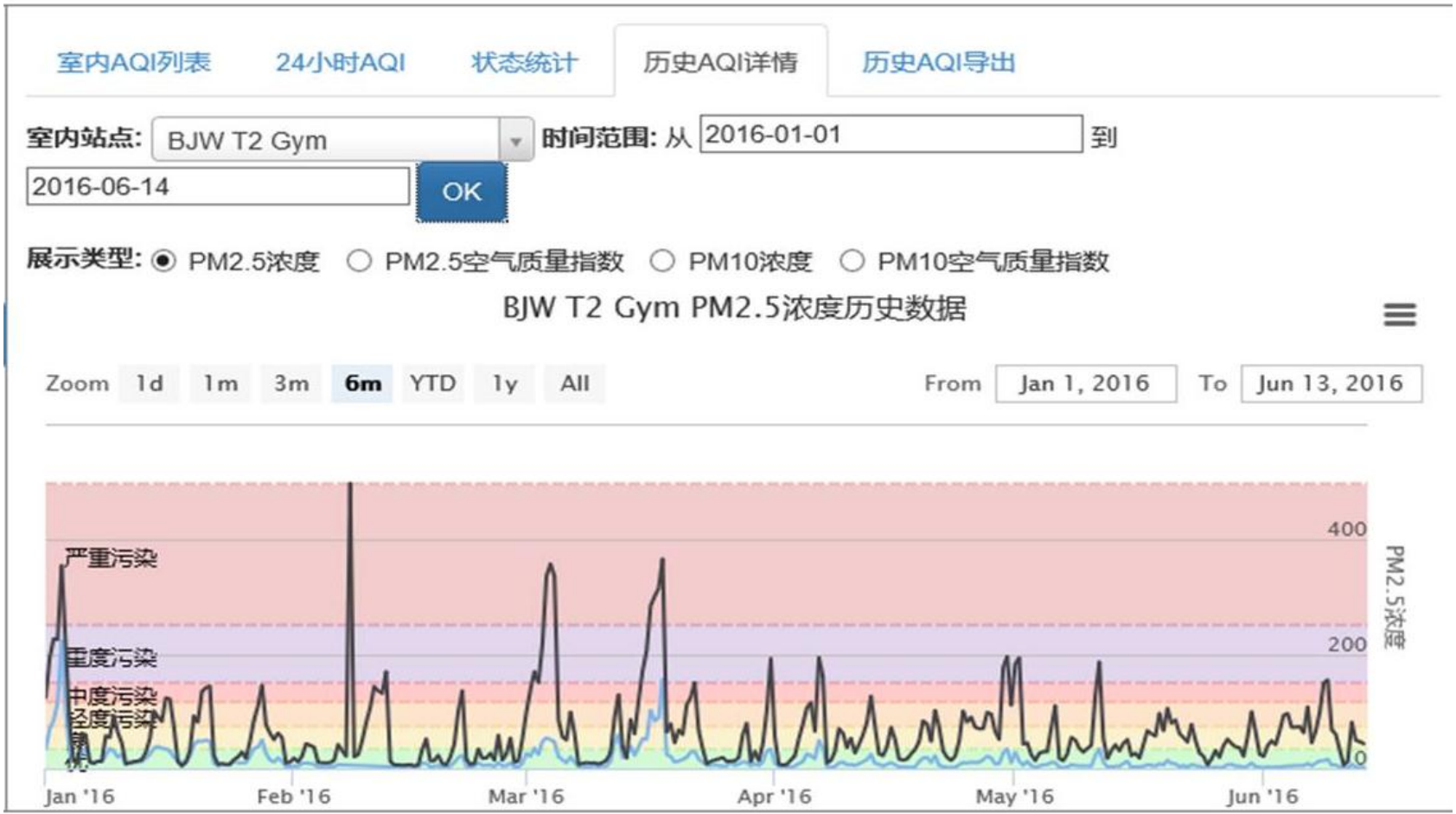
微软办公建筑——PM2.5监测平台

改造前



微软办公建筑——PM2.5监测平台

改造后



微软办公建筑——成本测算

◆ 若每间办公是安装一台空气净化器：
8000元/台×18台/层×15层=216万

◆ 压力控制+过滤器更换+气密性改造：
改造成本：20万
定期更换过滤器：0.3万/次

◆ 根据成本测算，可知安装空气净化器成本过高，且效果不显著；
而结合使用压力控制，过滤器更换和气密性改造，成本较低且效果显著。

建筑防霾改造案例——居民建筑

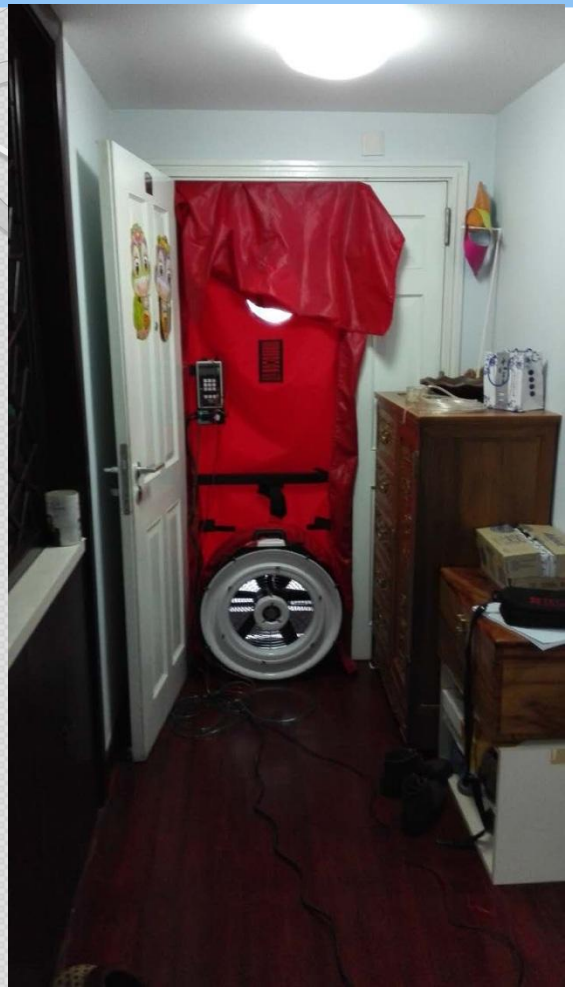
建筑基本信息：

该改造对象为位于上海徐汇区天钥桥路小区的一户居民住宅，占地面积约110m^2。

Building information：

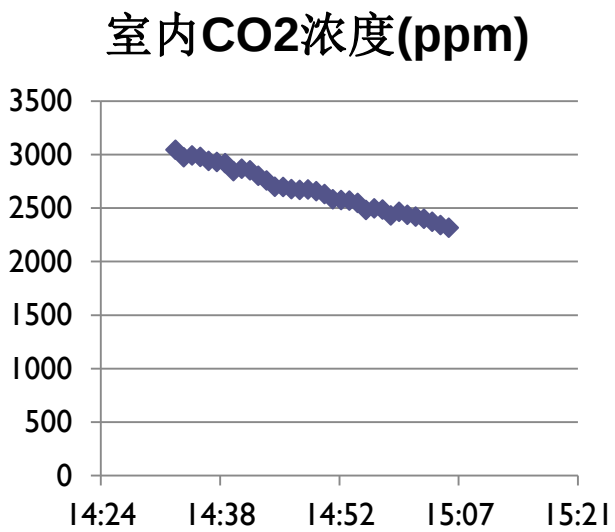
The building covers an area of 110 m^2, located in Tian Yueqiao Road, Xuhui district, a residential building.

门窗气密性测试——鼓风门测试方法 Air tightness test——blower door test



室内外压差50Pa building pressure at 50Pa					
房间类型 Room type	正压渗透风量(CFM) Building leakage when pressurized	负压渗透风量(CFM) Building leakage when depressurized	正压渗透风量(m^3/h) Building leakage when pressurized	换气次数（次/h） Air exchange rate	有效渗透面积(4Pa)（m2） Effective leakage area
测点1：客厅 Sitting room	1441	1112	2449.7	9.5	0.06
测点2：主卧 Main bedroom	465	468	790.5	12.3	0.02
测点3：书房 Study room	473	485	804.1	30.4	0.03
测点4：次卧 Guest room	346	363	588.2	11.6	0.02

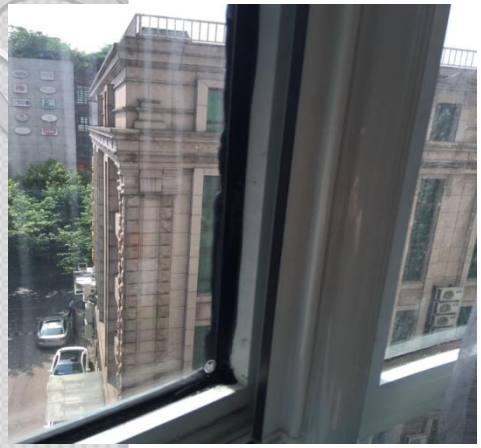
门窗气密性测试——CO_2浓度衰减法 Air tightness test——CO_2 concentration attenuation



自然状态 Natural state		50Pa
房间类型 Room type	换气次数（次/h） Air exchange rate	换气次数（次/h） Air exchange rate
客厅 Sitting room	-	9.5
主卧 Main bedroom	0.67	12.3
书房 Study room	-	30.4
客房 Guest room	0.51	11.6

门窗气密性改造 The door and window tightness retrofitting of the residential building

改造前 Before retrofitting



改造后 After retrofitting

双层玻璃+密封毛毡

Double glazing + gasket sealing

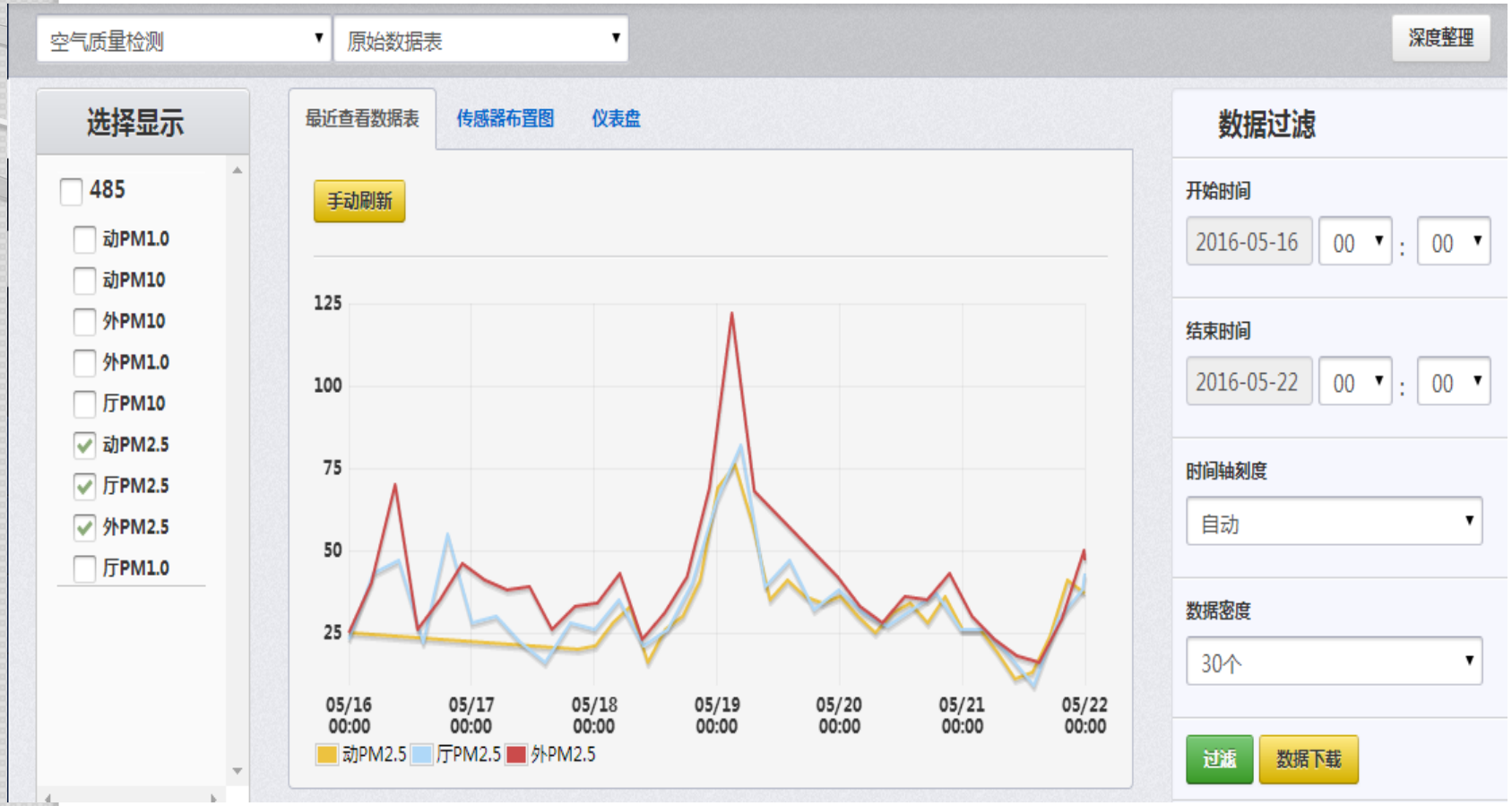
办公室门窗气密性改造 The door and window tightness retrofitting of the office

改造前 Before retrofitting

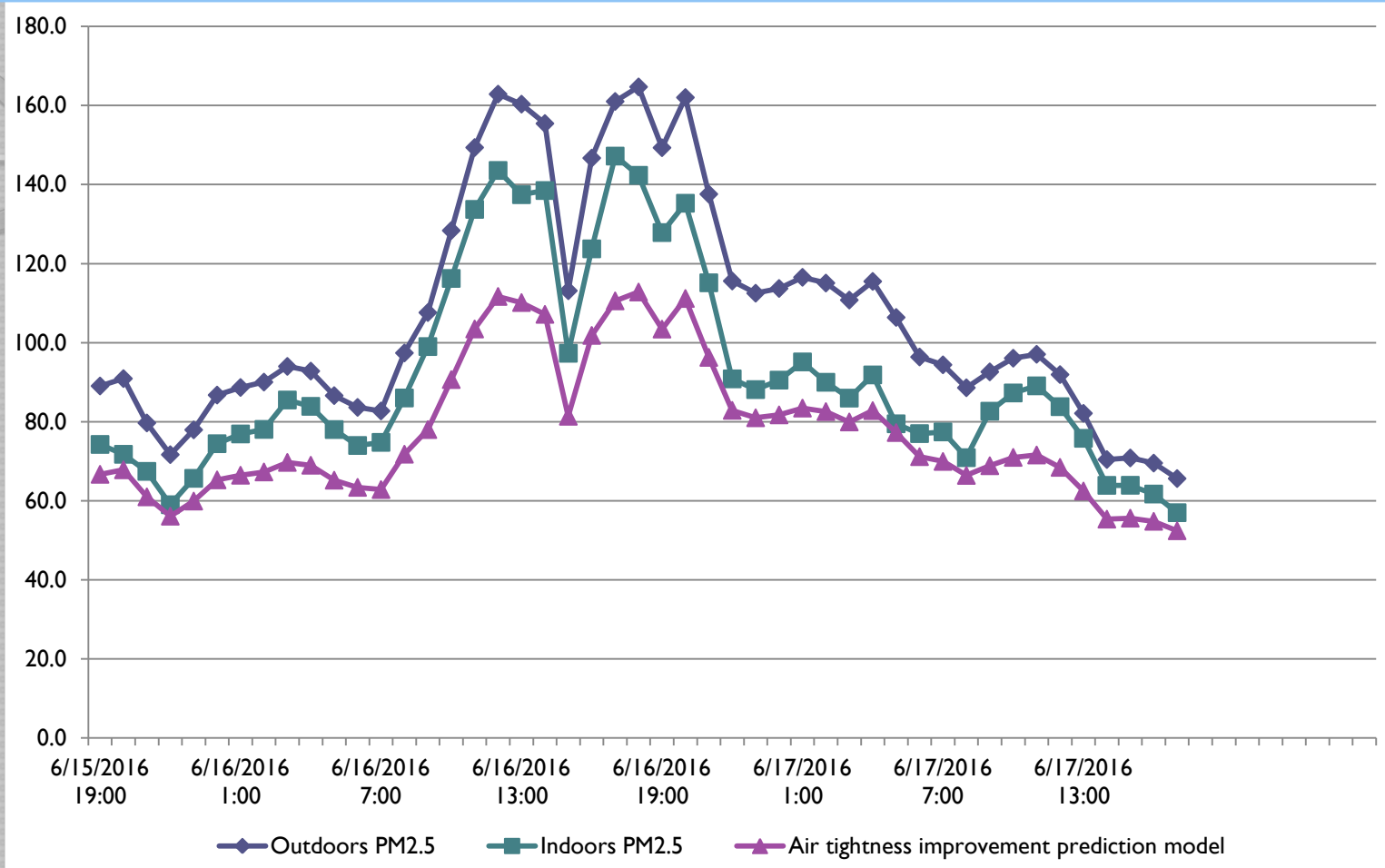
改造后 After retrofitting

密封毛毡+挡风条
Gasket sealing + Windshield bar

PM2.5在线监测平台 PM2.5 online monitoring platform

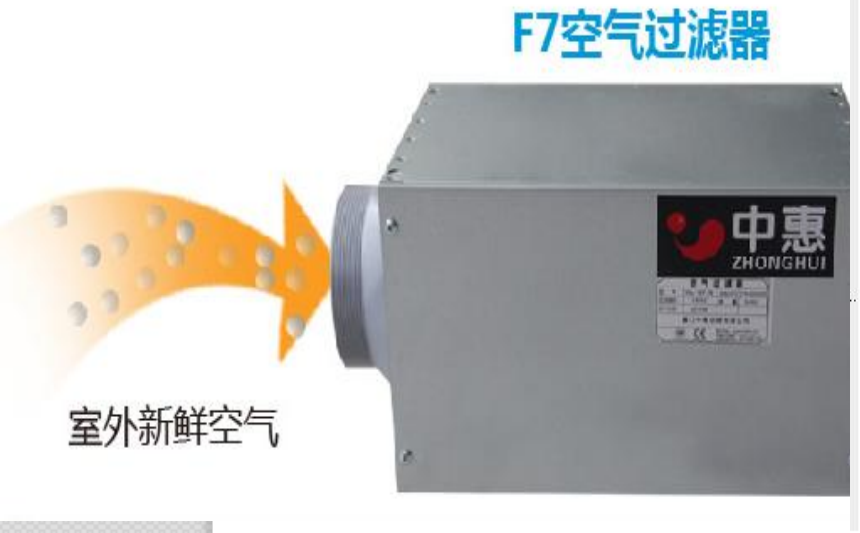


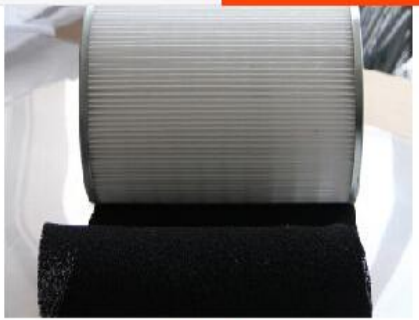
门窗气密性改造效果


180.0
160.0
140.0
120.0
100.0
80.0
60.0
40.0
20.0
0.0
6/15/2016 19:00
6/16/2016 1:00
6/16/2016 7:00
6/16/2016 13:00
6/16/2016 19:00
6/17/2016 1:00
6/17/2016 7:00
6/17/2016 13:00
Outdoors PM2.5
Indoors PM2.5
Air tightness improvement prediction model

F7过滤器+三档调速风机

- F7 filter + adjustable speed fan





双重过滤
过滤筒+活性炭过滤层

F7空气过滤器参数表

型　号	尺　寸 (mm)	过滤面积 (M^2)	包装尺寸 (mm)	包装体积 (m^3)	风口尺寸 (mm)	净　重 (Kg)	适用风量 (m^3/h)
XJL-1.6T-F	270x420x240	1.6	326x576x296	0.06	Ø145	5.84	150-250
XJL-2.0T-F	320x450x280	2.0	376x606x336	0.082	Ø145	7.29	250-350
XJL-2.6T-F	350x540x280	2.6	406x696x336	0.102	Ø200	8.54	350-500
XJL-4.0T-F	440x580x370	4.3	496x736x426	0.165	Ø200	11.64	500-800

气密性改造+压力控制

F7过滤器+三档调速风机

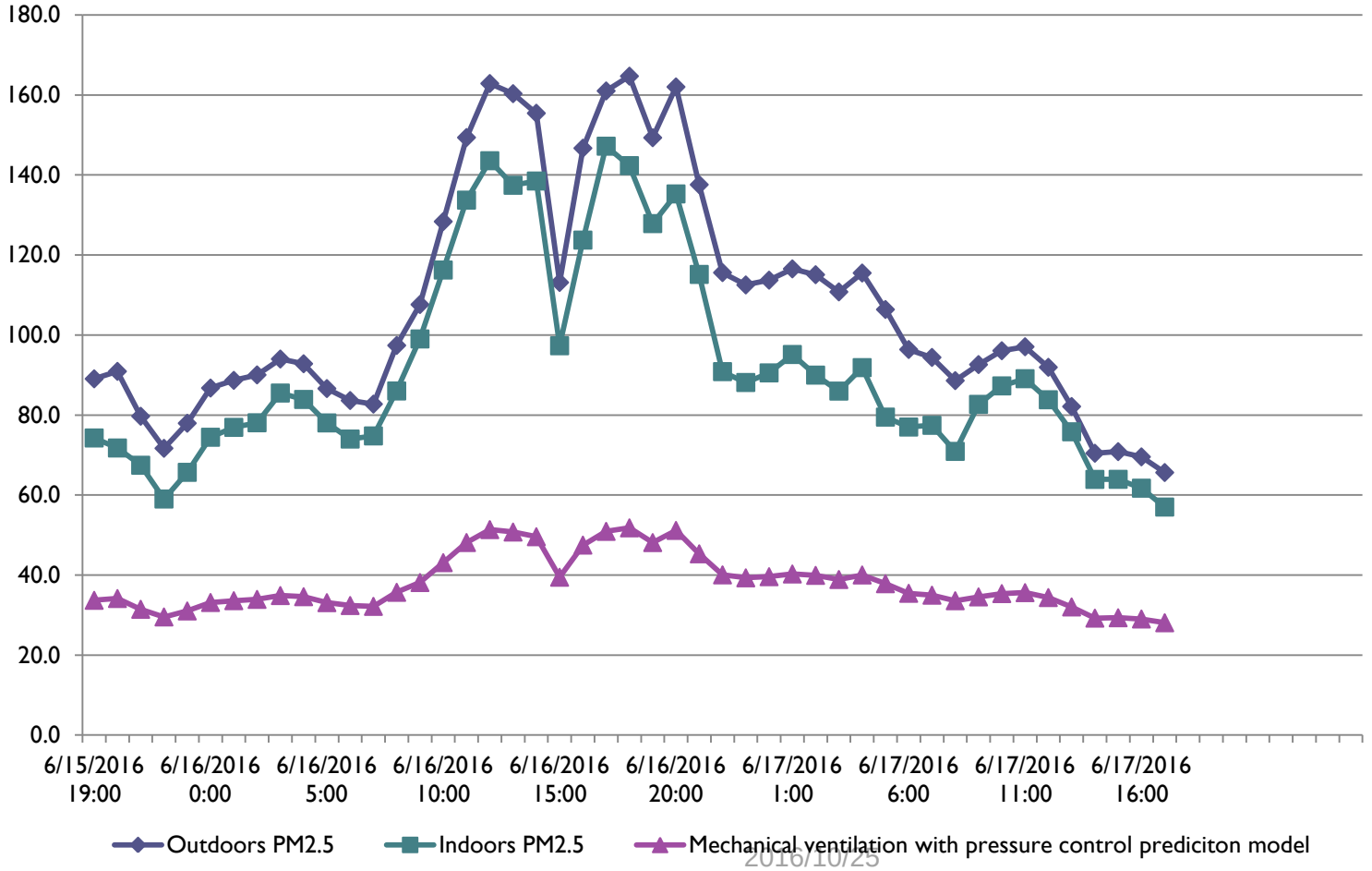
F7 filter + adjustable speed fan

三档调速

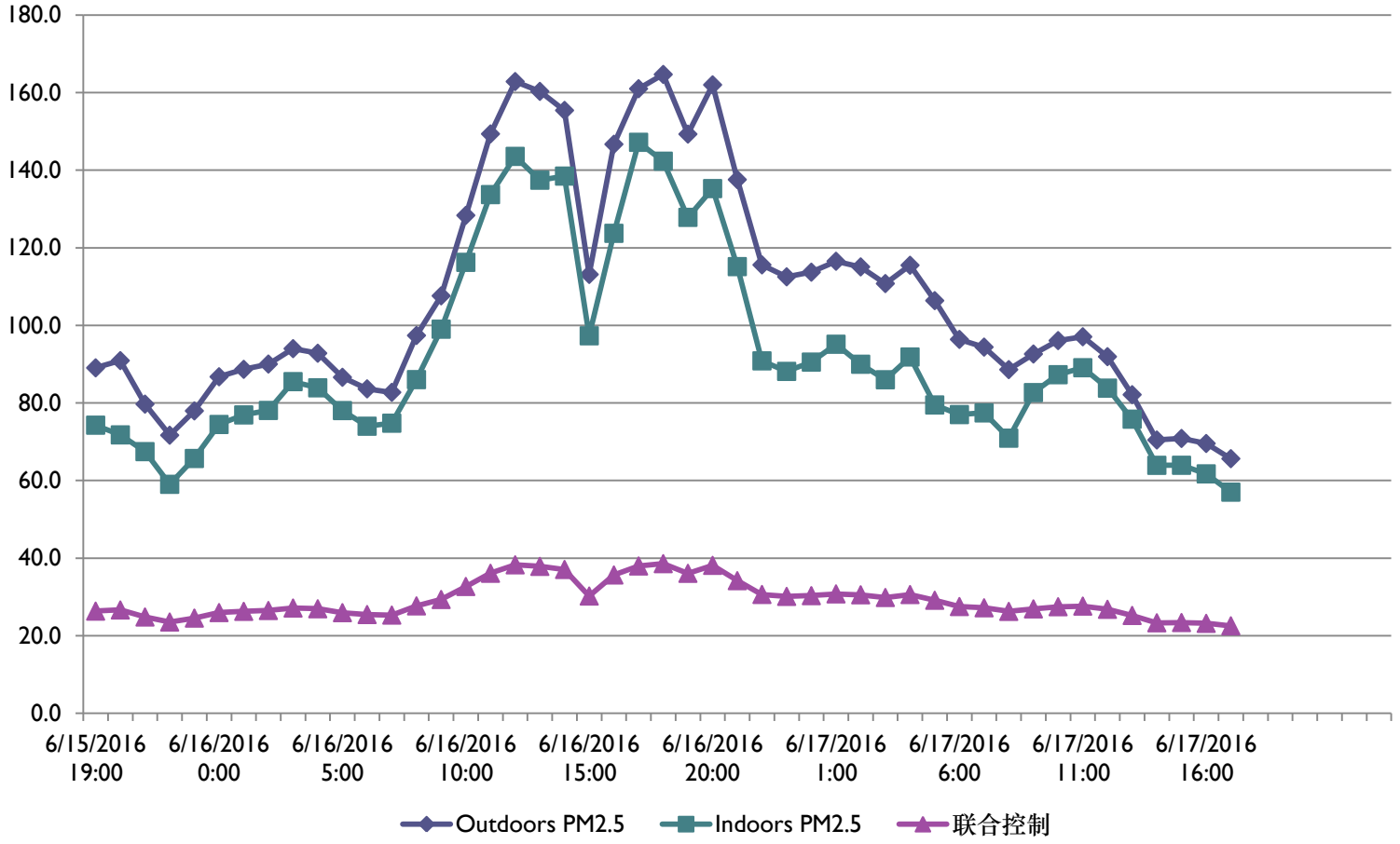
参数表

型号	电压/频率（V/Hz）	转速（RPM）	风量（m³/h）	风压（Pa）	功率（W）	噪音（dB）	防水（IP）
100H	220V-240V 50Hz	2300	202	157	28	30	IP44
		1900	167	132	25	25	
		1600	127	109	22	22	
150H	220V-240V 50Hz	2280	530	300	54	35	IP44
		2050	460	265	42	31	
		1600	400	230	34	28	
200H	220V-240V 50Hz	2250	830	350	125	40	IP44
		1950	690	274	115	36	
		1550	440	242	95	33	

气密性改造+压力控制


180.0
160.0
140.0
120.0
100.0
80.0
60.0
40.0
20.0
0.0
6/15/2016 19:00
6/16/2016 0:00
6/16/2016 5:00
6/16/2016 10:00
6/16/2016 15:00
6/16/2016 20:00
6/17/2016 1:00
6/17/2016 6:00
6/17/2016 11:00
6/17/2016 16:00
Outdoors PM2.5
Indoors PM2.5
Mechanical ventilation with pressure control prediciton model

气密性改造+压力控制+空气净化器

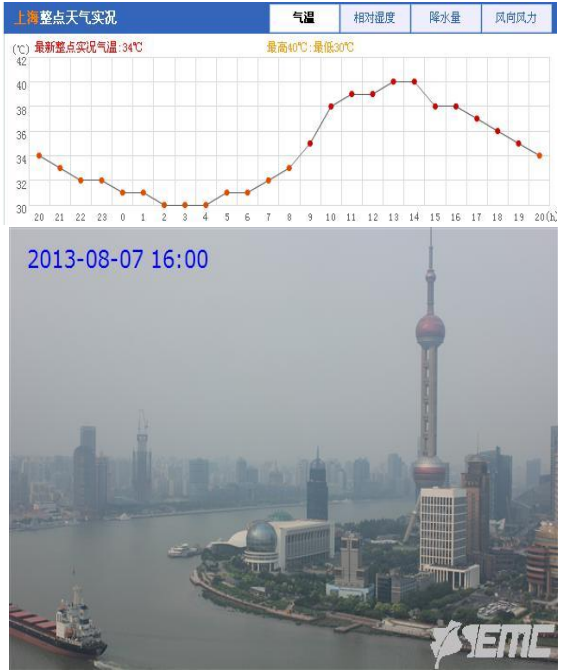


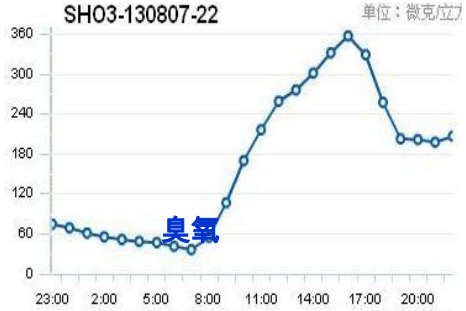
总结

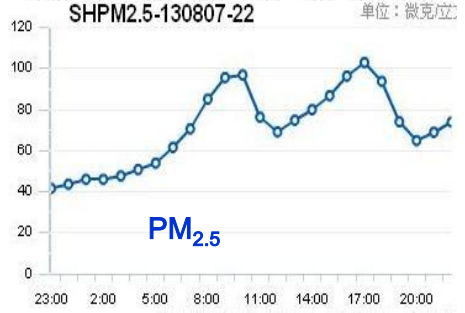
- 办公室和住宅必须做防雾霾改造
- 简单购买和使用空气净化器不足以保证健康的室内环境
- 改造应该从控制雾霾渗人的源头开始
- 维护结构气密性的改善是不可缺少的一步
- 压力控制比过滤成本要低
- 办公室空调通风设计基本过滤要求需要改变

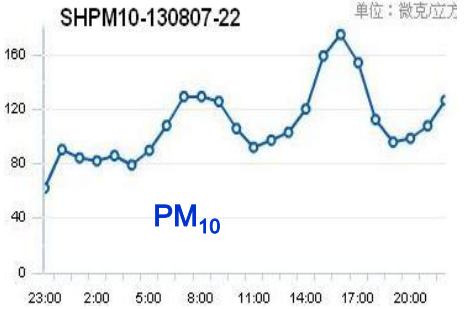
上海2013年8月高温和光化学烟雾

High temperature and light chemical smoke in August 2013 in Shanghai









2013年8月7日上海创纪录高温，气温超过40度。同时发生了严重光化学烟雾，O_3峰值达到360微克/立方米，罕见的五级严重空气污染，但$PM_{2.5}$峰值只刚刚超过100微克/立方米。**On August 7, 2013, Shanghai created a new record that the temperature researched more than 40 degrees. Serious photochemical smog happened at the same time, the O3 peak reached 360 micrograms per cubic meter, which is serious air pollution, but the PM2.5 peak is only just over 100 micrograms per cubic meter.**

THANKS