



民用建筑室内颗粒物 控制策略与问题

同济大学机械与能源工程学院

林忠平

2015年3月20日



zplin99@tongji.edu.cn



内容

1

民用建筑室内外颗粒物污染实测

2

室内颗粒物浓度平衡模型与影响因素

3

相关控制策略

4

存在问题



民用建筑室内颗粒物浓度实测 ——对象概述



TSI 8532型DUSTTRAK
粉尘监测仪

生活娱乐区：

- XX打印店1
- XX打印店2
- XX打印店3
- XX健身房
- XX食堂
- XX理发店
- XX麦当劳
- XX游戏厅
- XX超市

办公区：

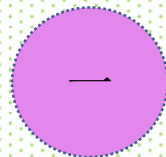
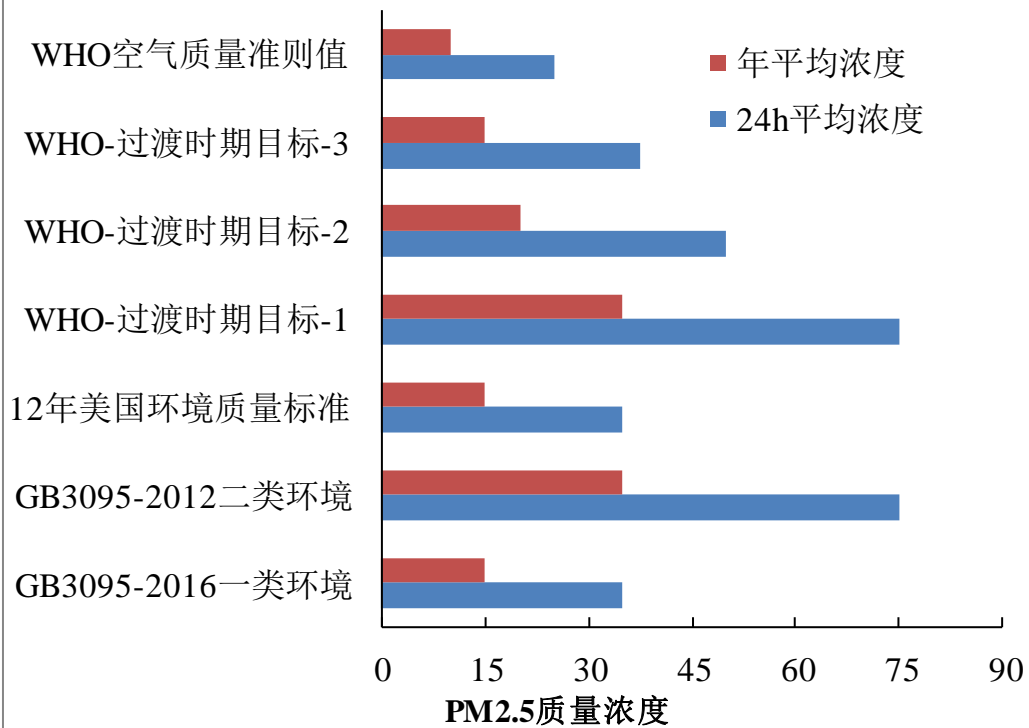
- 同济大学XX楼
- XX广场17楼F
- XX综合楼1F
- XX联合广场B楼17F
- XX建筑设计院3F



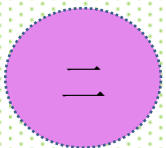


民用建筑室内颗粒物浓度实测 —— 相关标准对比

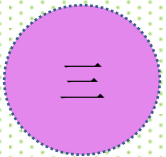
环境空气质量标准对PM2.5浓度的规定



中国二类环境（日常生活区）
相当于过渡时期目标1
中国一类环境（环境保护区）
相当于过渡时期目标3
美国处于过渡时期目标3



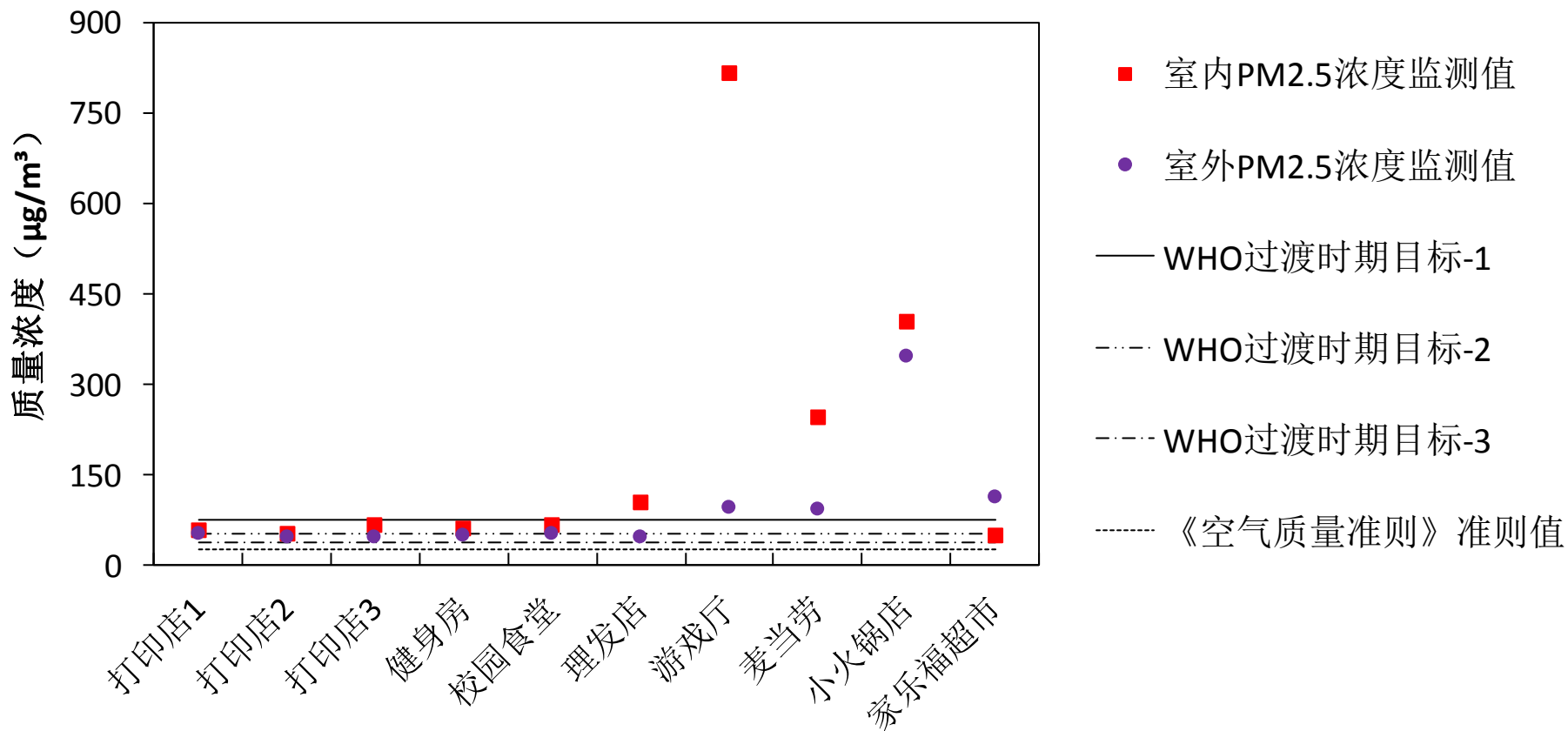
GB3095-2012规定：对未达标
规定，要求限期实现达标规划
美国标准：对于24h均值-三年
平均达标率不低于98%



中、美均未对室内PM2.5颗粒
物浓度作规定-沿用环境空气质
量标准
台湾《室内空气质量标准》规
定24h均值不超过35μg/m³

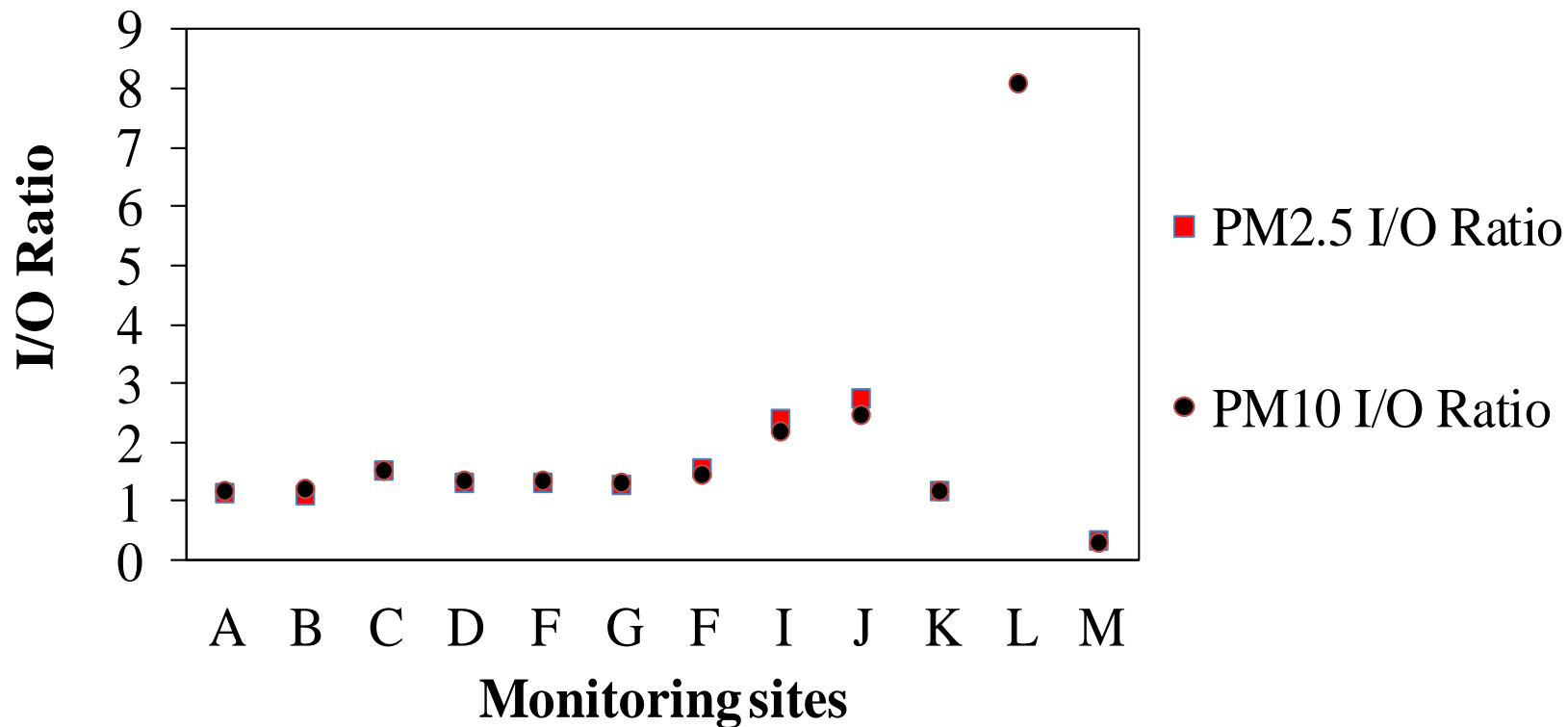


民用建筑室内颗粒物浓度实测 —— 生活娱乐区实测结果



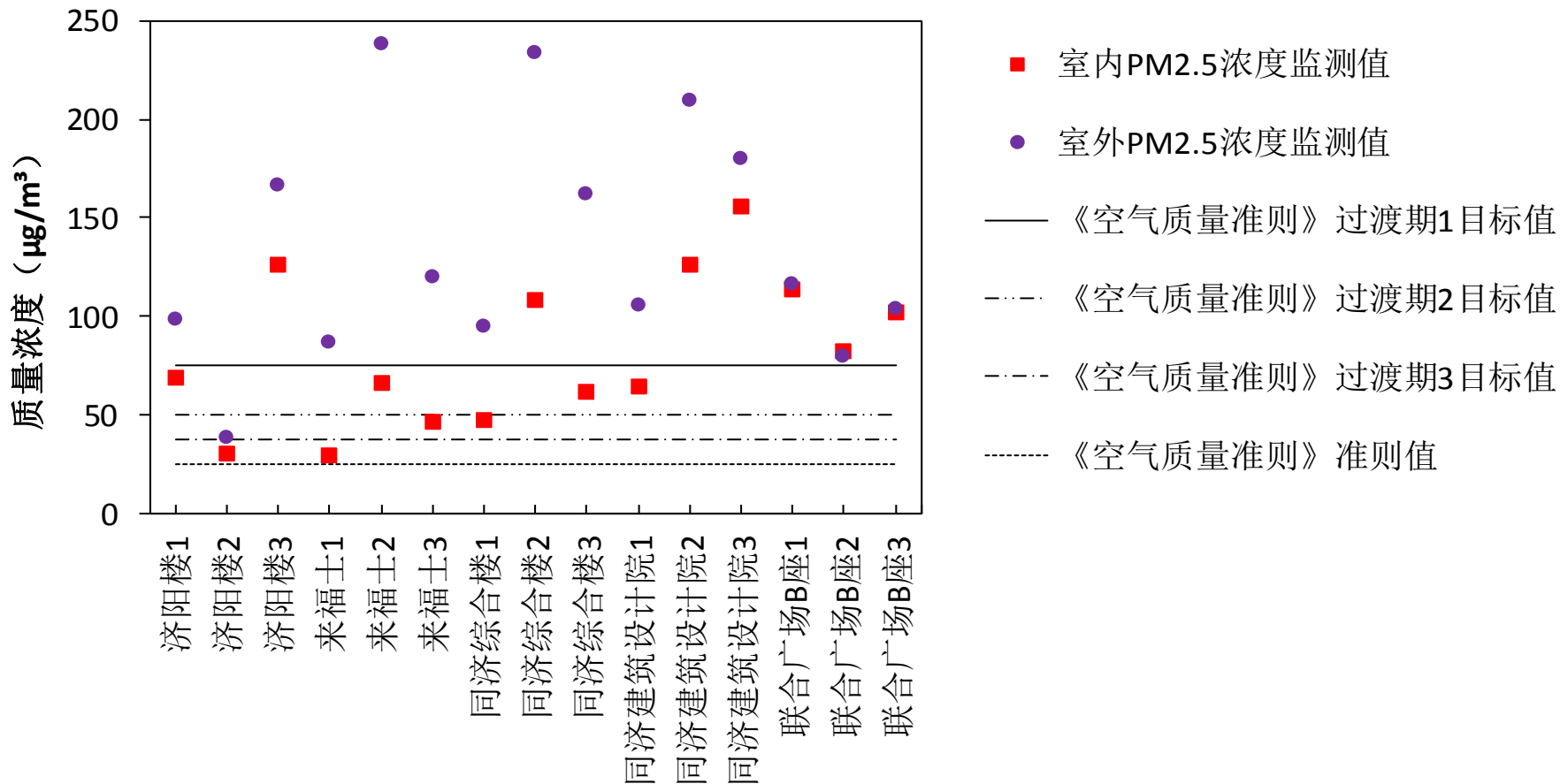


民用建筑室内颗粒物浓度实测 —— 生活娱乐区实测结果





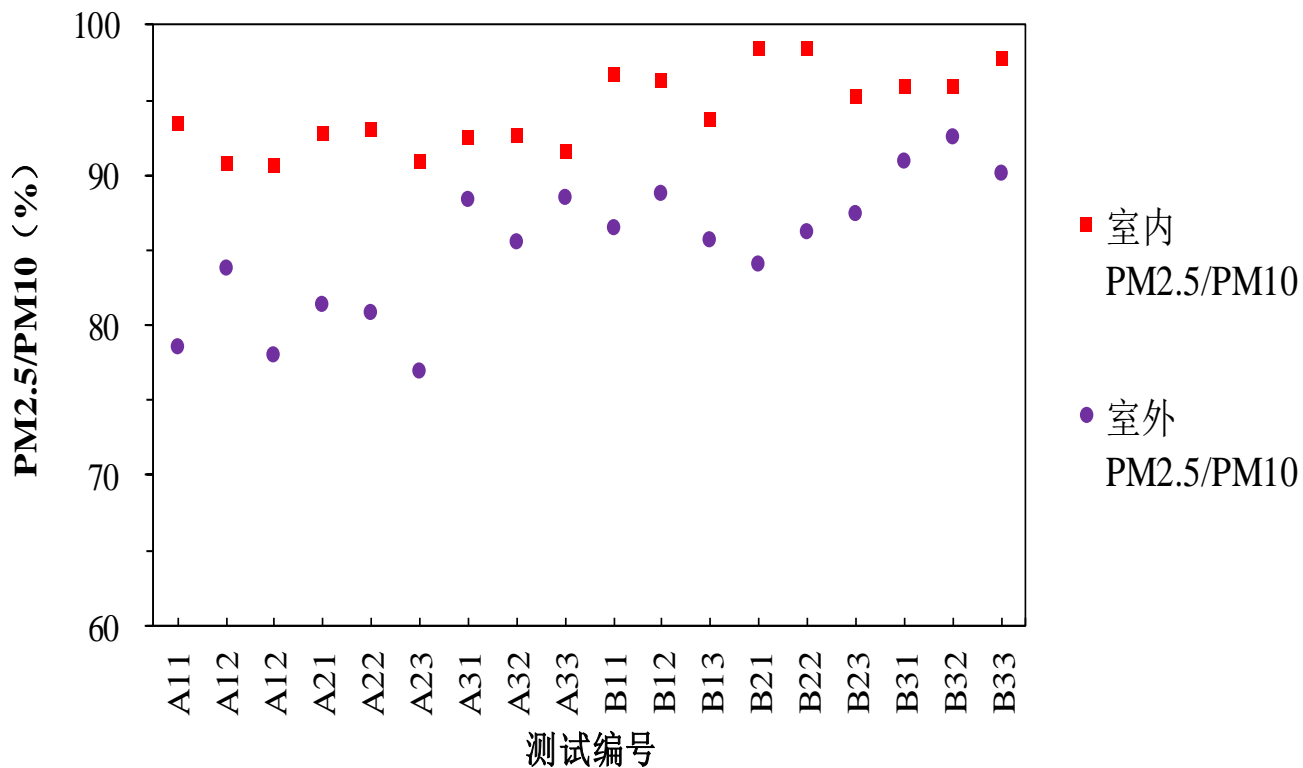
民用建筑室内颗粒物浓度实测 —— 办公区监测结果





民用建筑室内颗粒物浓度实测

——办公建筑A、B室内、外PM2.5/PM10

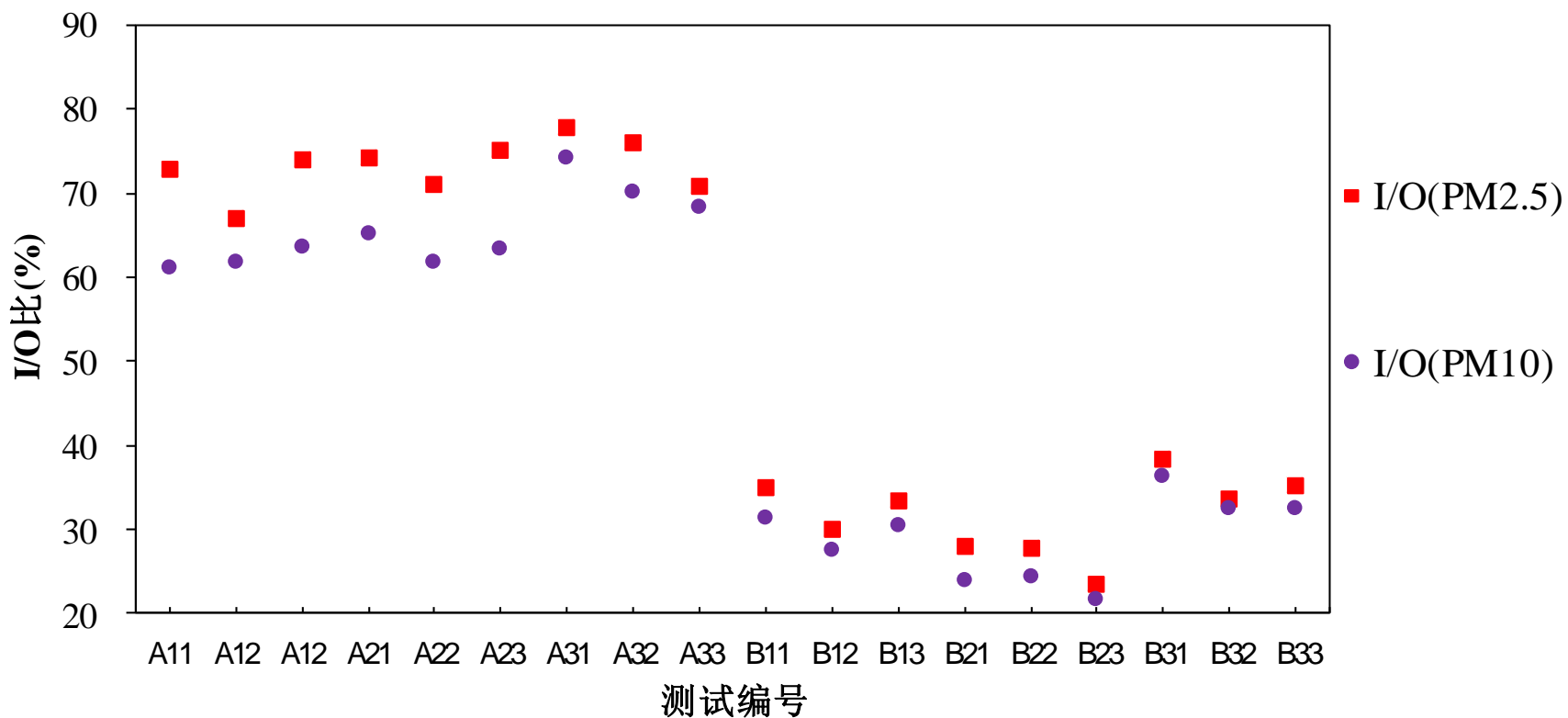


注：

- A为普通办公室
- B为甲级办公室



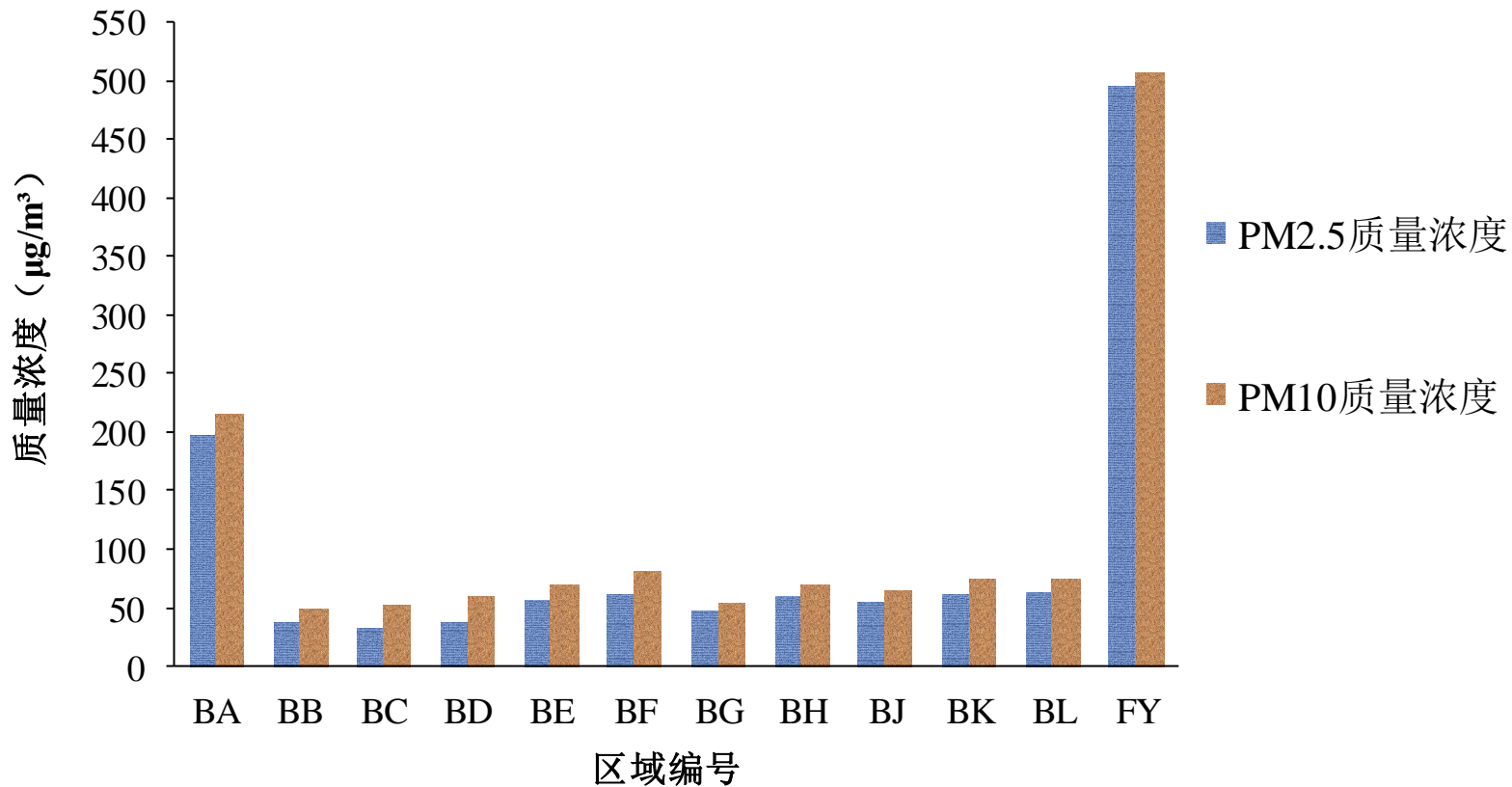
民用建筑室内颗粒物浓度实测 —— PM_{2.5}与PM₁₀的I/O比





民用建筑室内颗粒物浓度实测

——甲级办公楼其他区域的测试结果



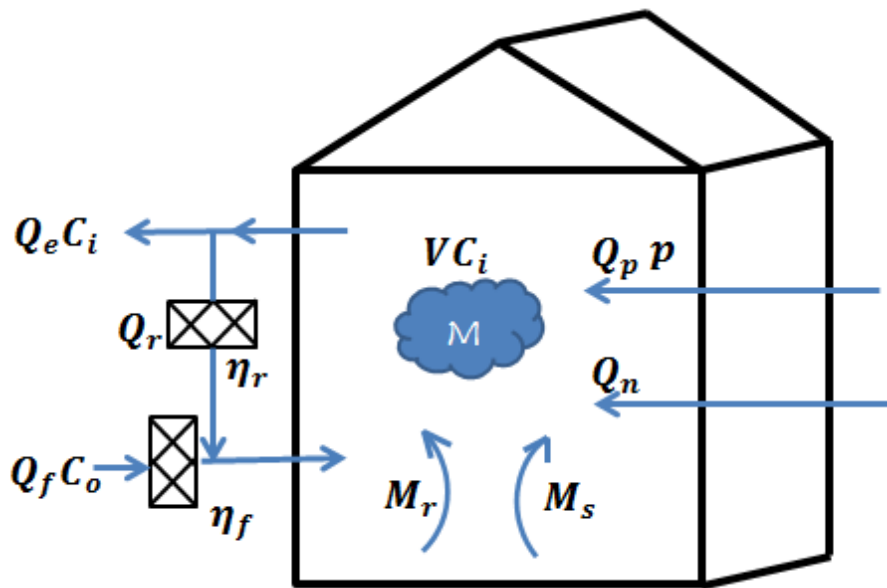


民用建筑室内颗粒物浓度实测——结论

- 游戏厅、麦当劳等人员密集生活娱乐区，**PM2.5**污染严重；
- 办公区室内**PM2.5**不容乐观。门窗开启将弱化室内外颗粒物浓度差；
- **PM2.5/PM10**：室内比室外大；
- **I/O**比： **PM2.5**比**PM10**大；
- 室内剧烈活动、吸烟等将产生大量颗粒物，造成严重室内颗粒物污染



室内颗粒物浓度平衡模型及控制措施 —— 浓度平衡模型



C_o 室外颗粒物浓度, C_i 室内颗粒物浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$;
 Q_f 空调系统新风, Q_e 室内排风, Q_r 空调系统回风, Q_n 室内自然风,
 Q_p 围护结构渗透风, m^3/h ; M_s 室内颗粒物沉降量,
 M_r 室内表面颗粒物扬尘量, M 室内人、物产尘量, μg ; η_f 新风过滤效率,
 η_r 回风过滤效率; p 渗透系数; V 室内体积, m^3

◆ 室内颗粒物浓度影响因素:

- 室内自然风和渗透风量
- 颗粒物沉降量和建筑表面扬尘量
- 人员和设备运行的产尘量
- 空调系统新风、回风、排风量
- 空调系统过滤器过滤效率
- 室外颗粒物浓度



室内颗粒物浓度平衡模型与控制措施 —— 浓度平衡模型

◆ 所有工况均可由以下公式表示

$$\begin{aligned} n_f C_o (1 - \eta_f) + n_r C_i (1 - \eta_r) + n_n C_o + n_p C_o p + M_i \\ = (n_r + n_e) C_i \end{aligned}$$



室内颗粒物浓度平衡模型与控制措施

——分体机+空气净化器模型

$$C_i = \frac{n_p C_o p + G_i}{n_p + n_j \eta_j}$$

式中：

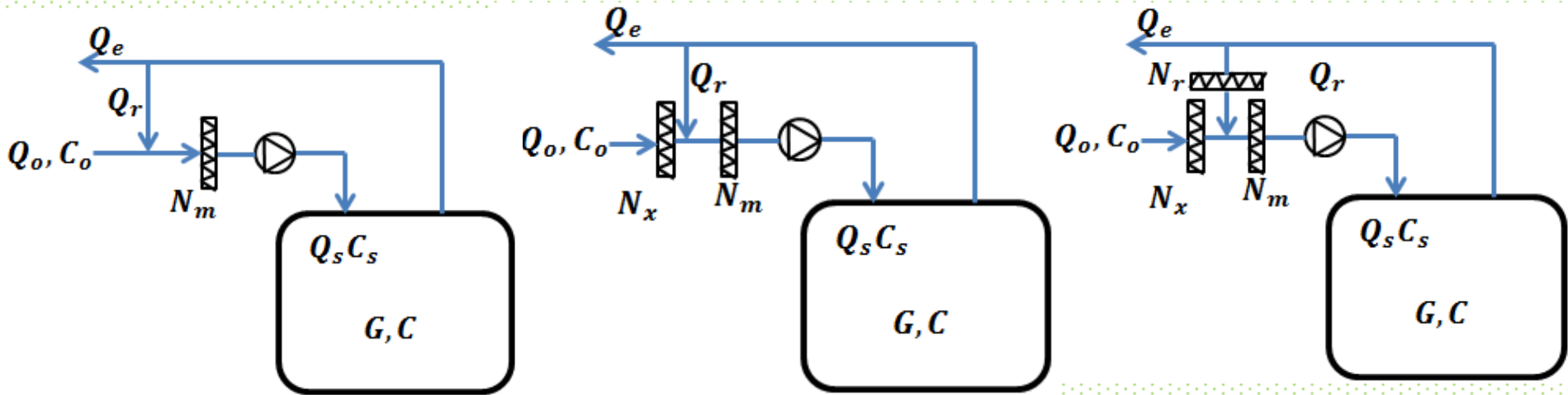
n_j 为净化器换气次数；

η_j 为净化器对颗粒物的过滤效率

◆ 模型简化

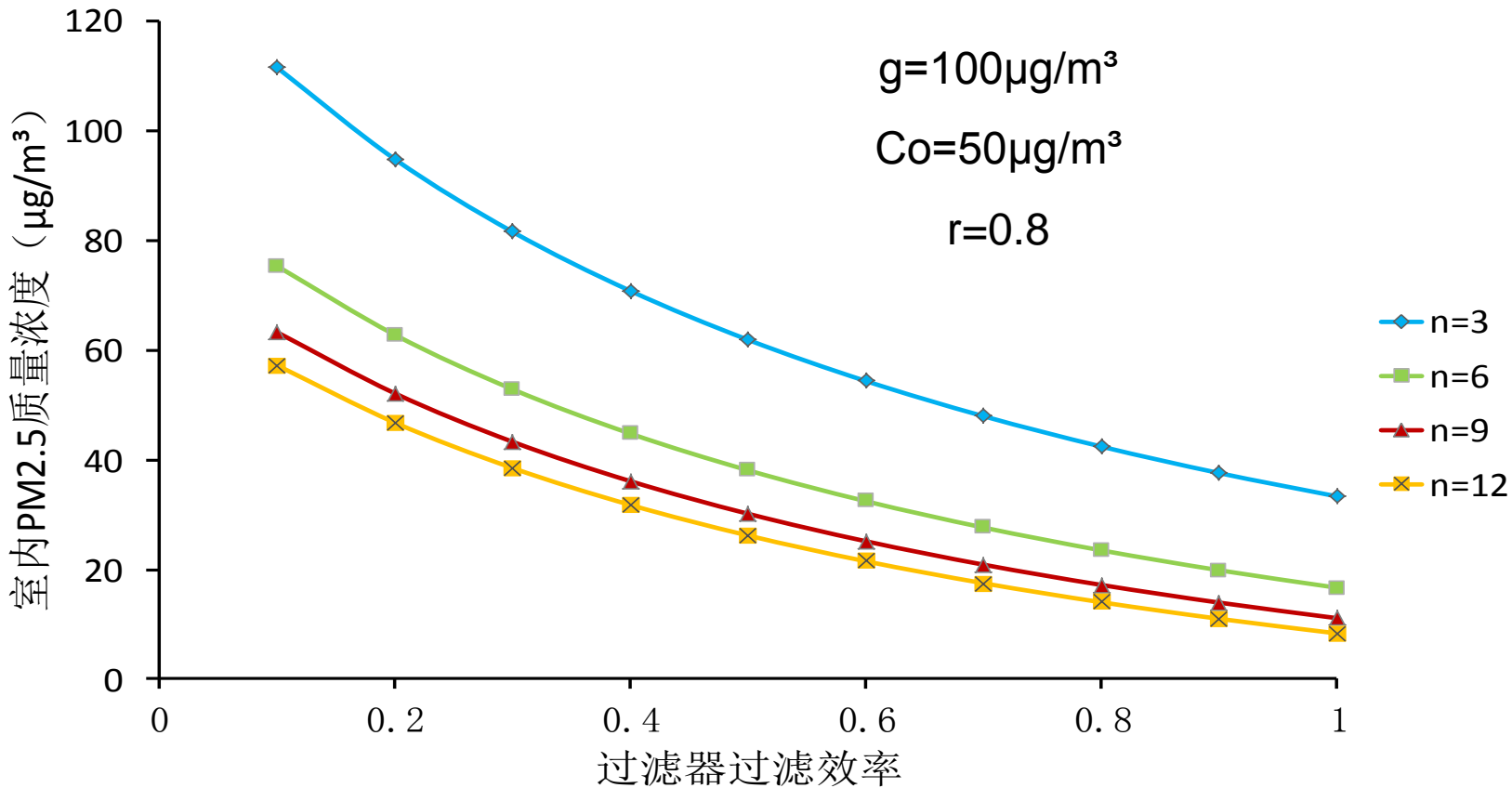
- 无新风系统
- 回风过滤效率为0
- 门窗关闭

一般集中式空调系统空气过滤器设置方式

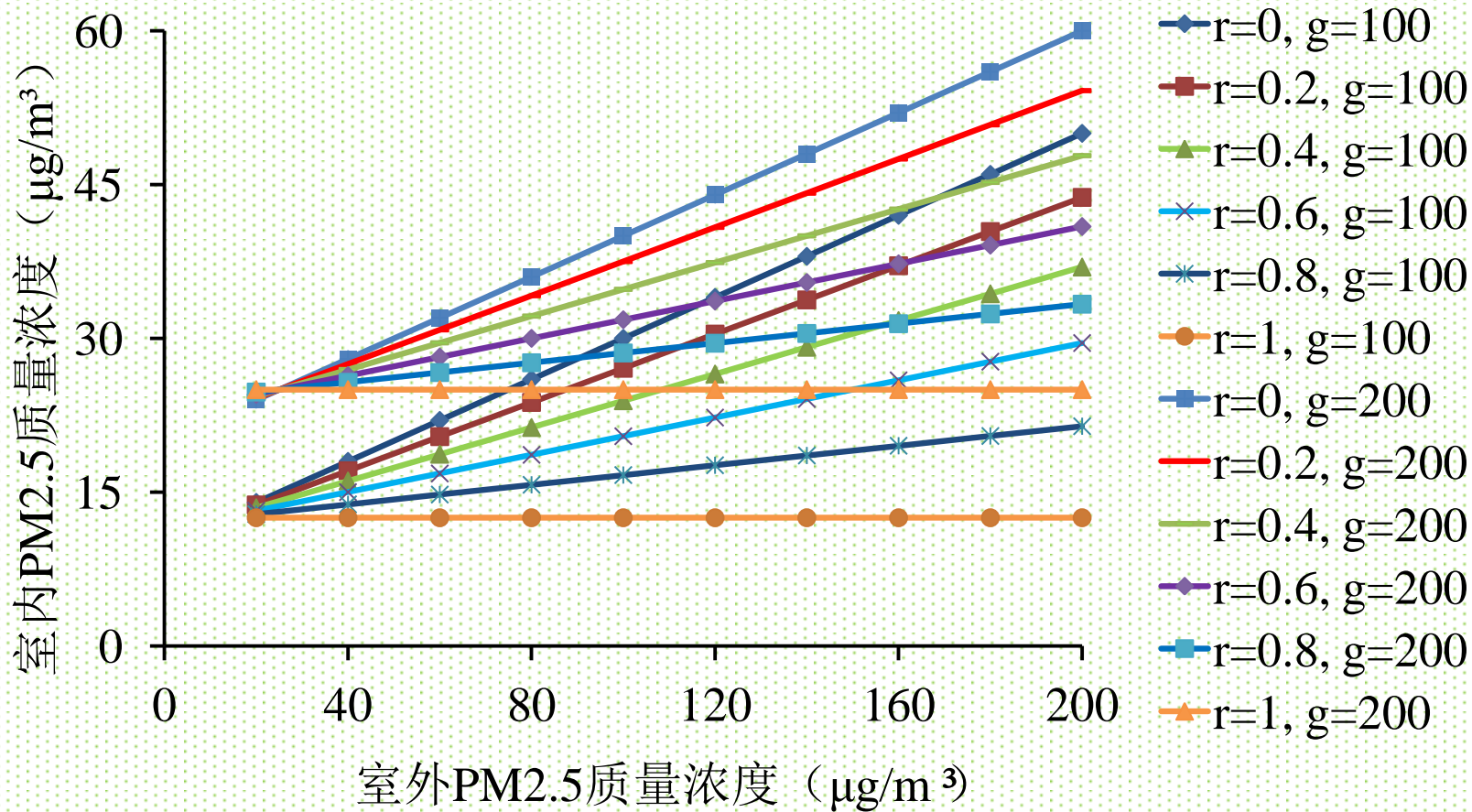


方式1为常用过滤器设置方式，此时 $\eta_m = \eta_r$

效率—室内颗粒物浓度曲线（不同换气次数）



室外颗粒物浓度—室内颗粒物浓度曲线





室内颗粒物浓度平衡模型与控制措施

——分体机+空气净化器模型计算条件

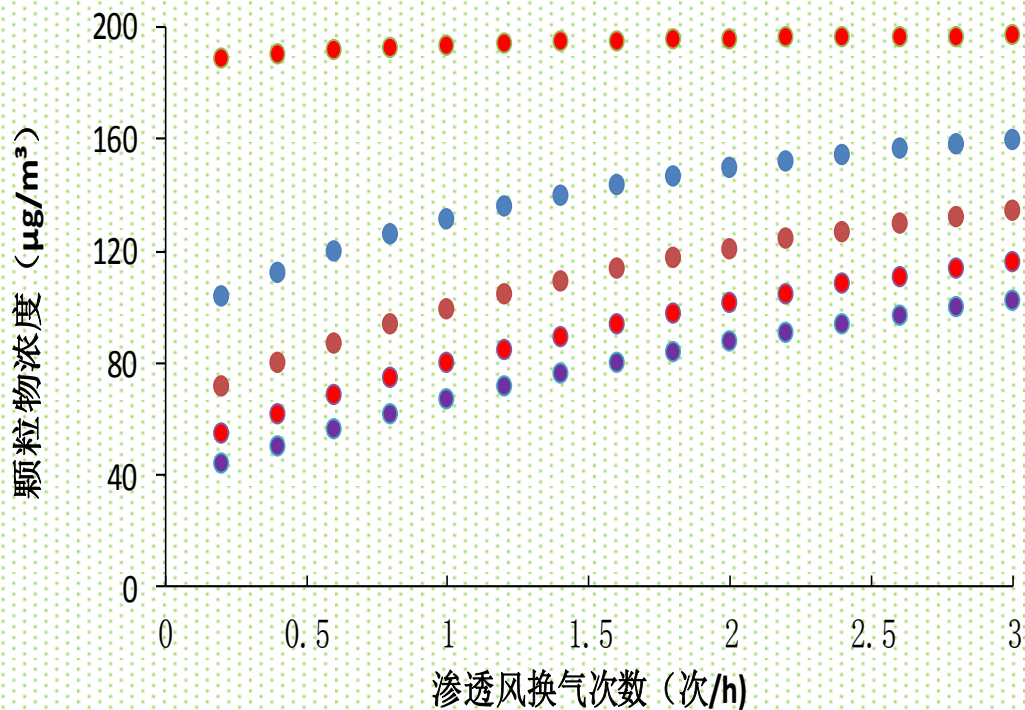
- ◆ 计算条件（考虑不同渗透风换气次数、净化器换气次数、过滤效率）
- 颗粒物穿透系数最不利为1
- 单位面积产尘量：考虑 $4*5*3\text{m}^3$ 的房间每小时吸一支烟（ $10\text{mg}/\text{支烟}$ ）
即为 $167\mu\text{g}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$
- 室外颗粒物浓度取 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$



室内颗粒物浓度平衡模型与控制措施

——分体机+空气净化器

◆ 条件：效率=0.9；



● 净化器换气次数=1

● 净化器换气次数=2

● 净化器换气次数=3

● 净化器换气次数=4

● 净化器换气次数=5

➤ 注：

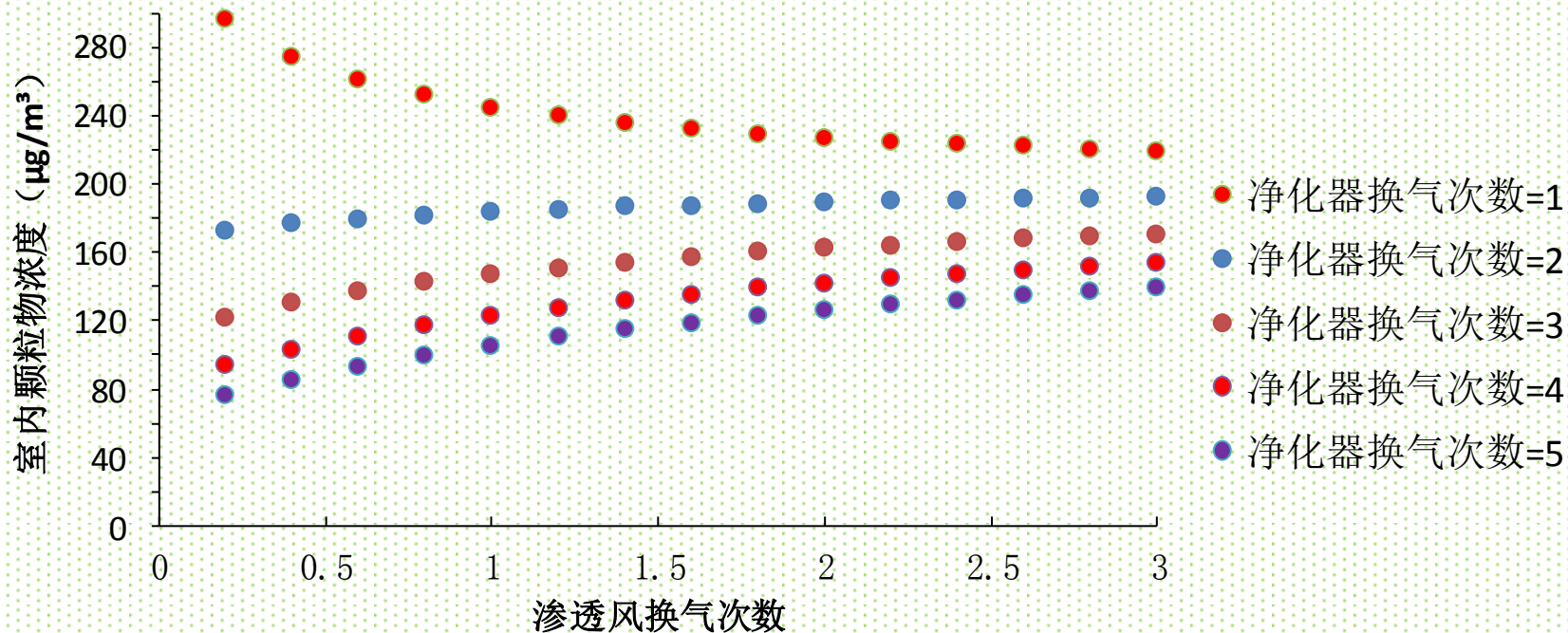
空气净化器标准评价指标为输出洁净空气量（CADR）



室内颗粒物浓度平衡模型与控制措施

——分体机+空气净化器

◆ 条件：效率=0.5；

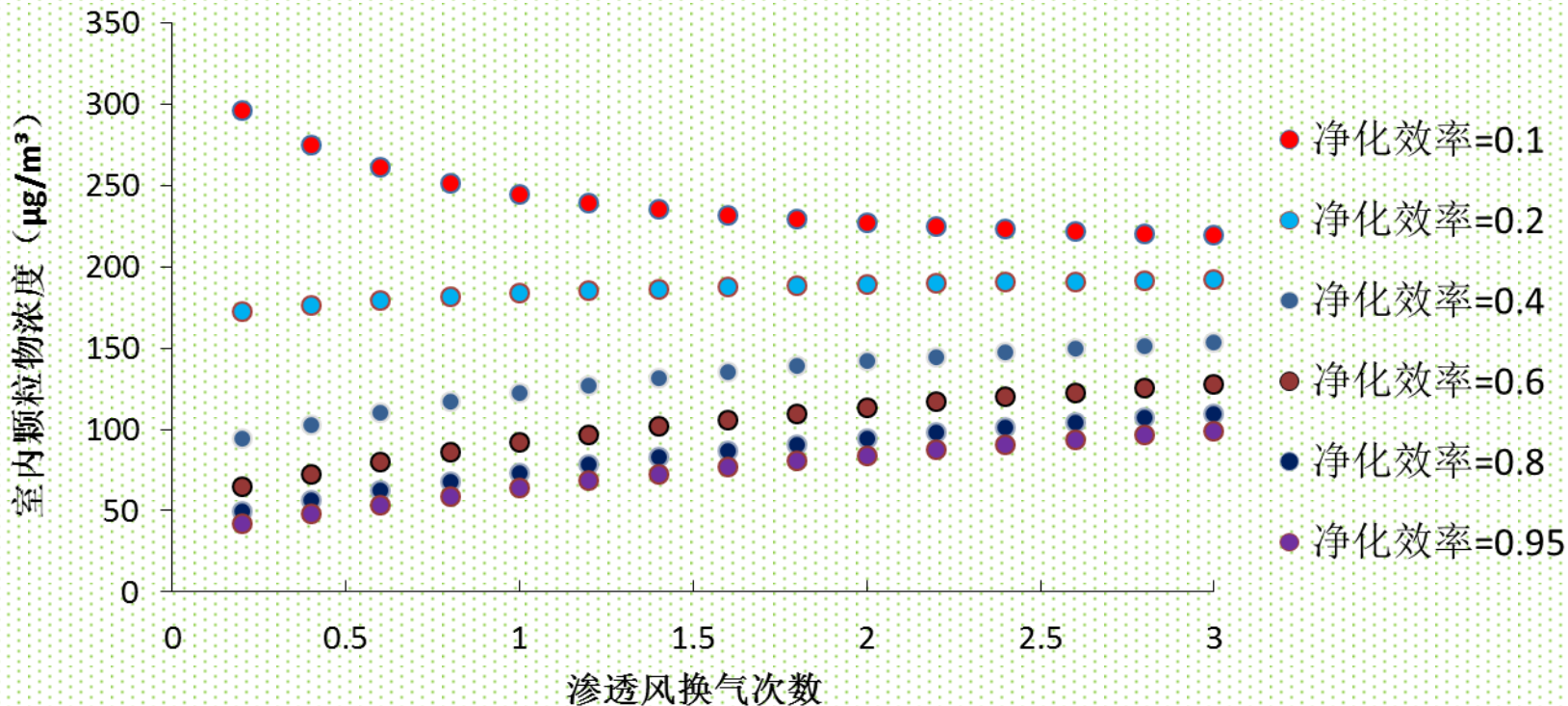




室内颗粒物浓度平衡模型与控制措施

——分体机+空气净化器

◆ 条件：净化器换气次数=5





室内颗粒物浓度平衡模型与控制措施

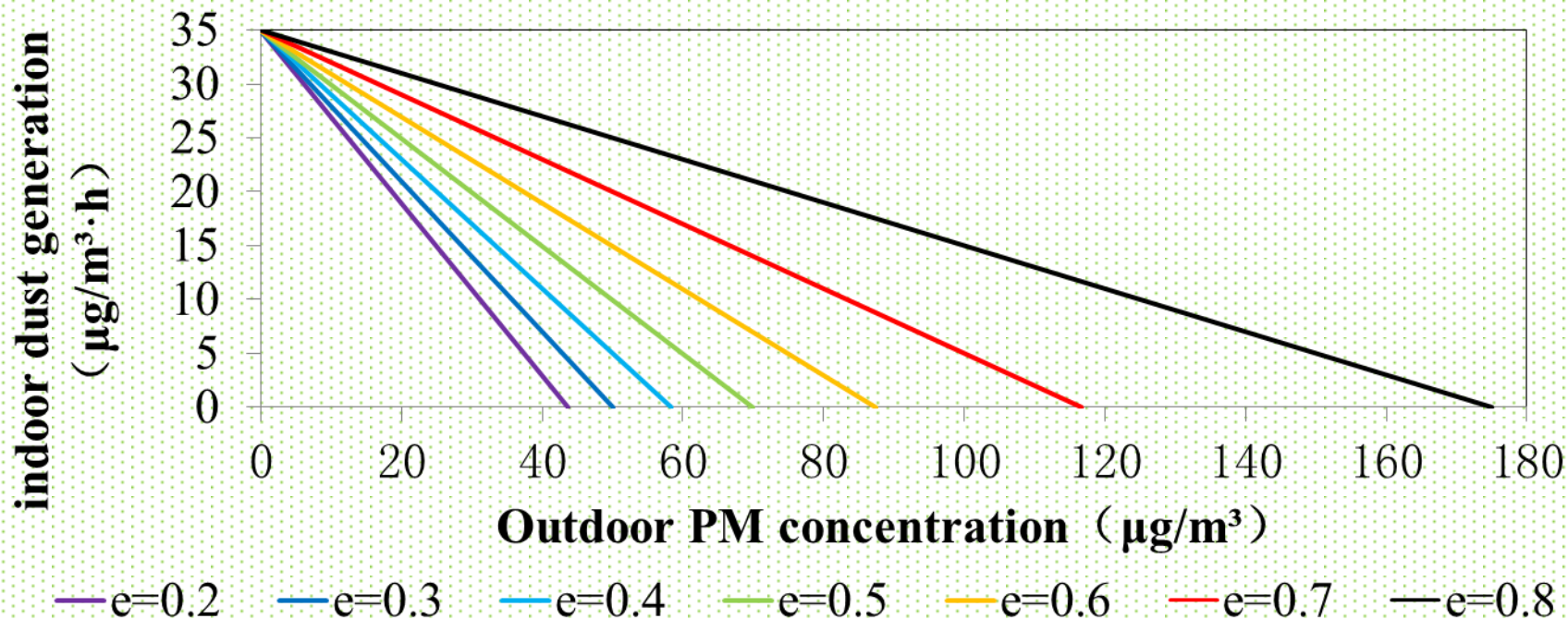
——分体机+空气净化器

- ▶ 吸烟产生颗粒物污染量大；
- ▶ 需保证净化效率与净化器换气次数的乘积（洁净换气次数）大于室内产尘量与室外颗粒物浓度之比；否则开窗有利于降低室内颗粒物浓度。



室内颗粒物浓度平衡模型与控制措施 ——FCU + FA

➤ 新风过滤；新风量（1次/h）；室内控制目标： $35\mu\text{g}/\text{m}^3$

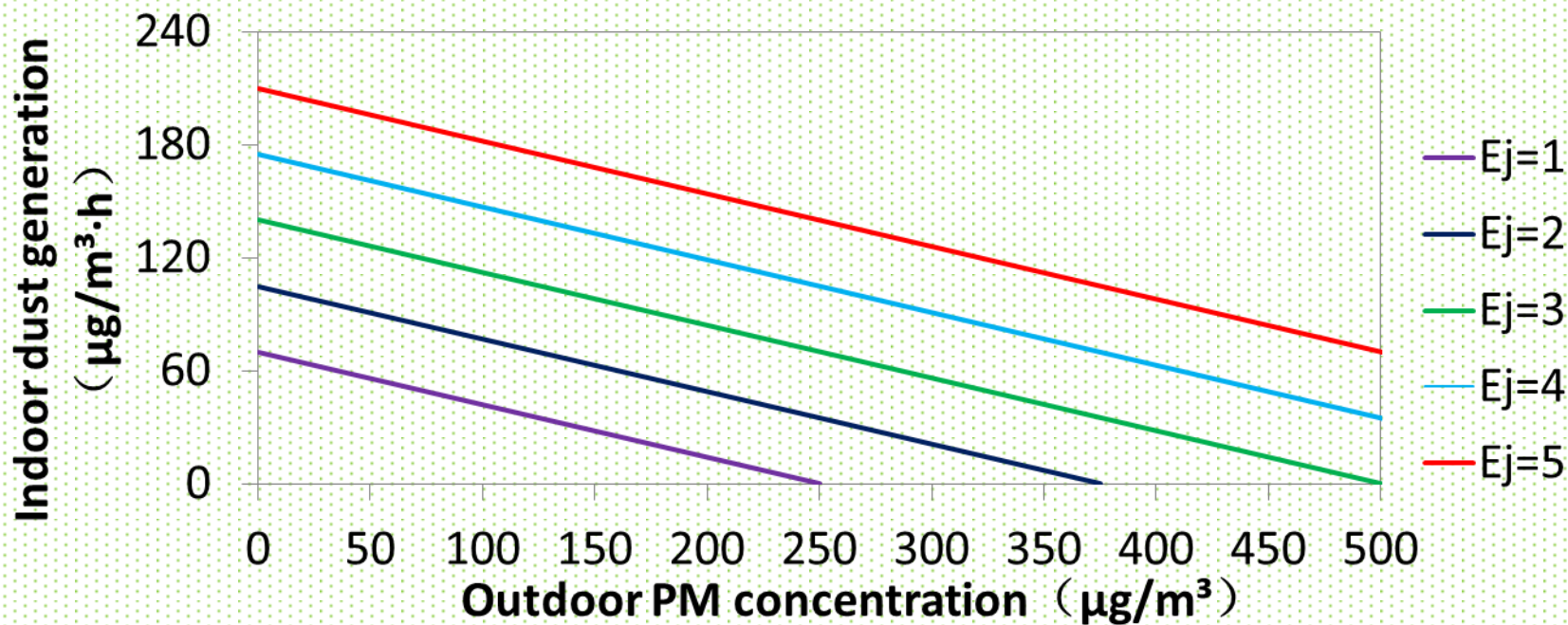




室内颗粒物浓度平衡模型与控制措施

——FCU + Air Cleaner

- 新风过滤G4+F7;
- 新风量 (1次/h) ; 室内控制目标: $35\mu\text{g}/\text{m}^3$

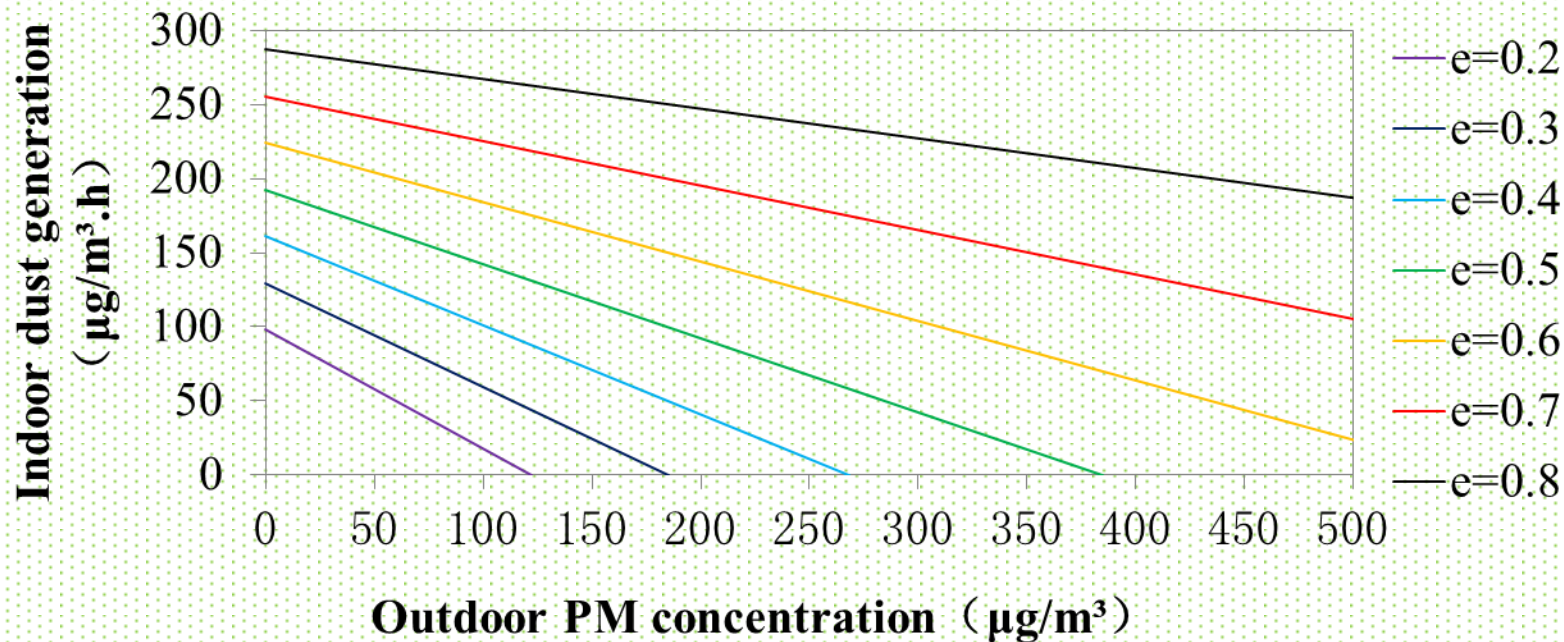




室内颗粒物浓度平衡模型与控制措施

——All-air AC system

- 送风量 (10次/h) ;
- 新风量 (1次/h) ; 室内控制目标: $35\mu\text{g}/\text{m}^3$





具体应用存在（应注意）的问题

■ 过滤方式

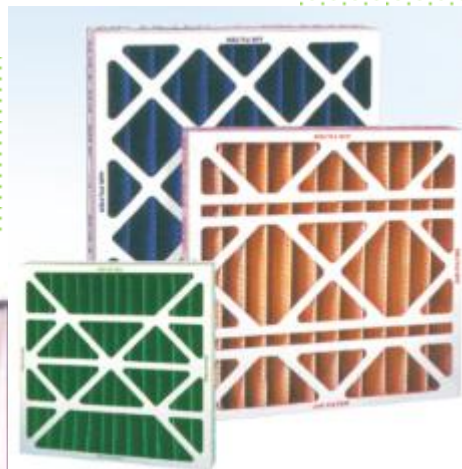
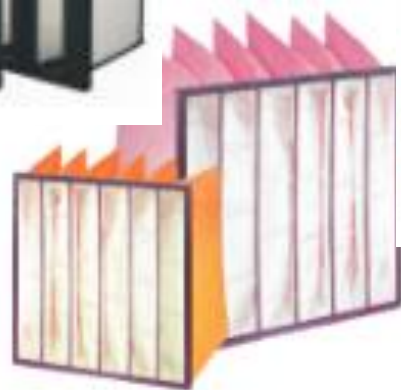
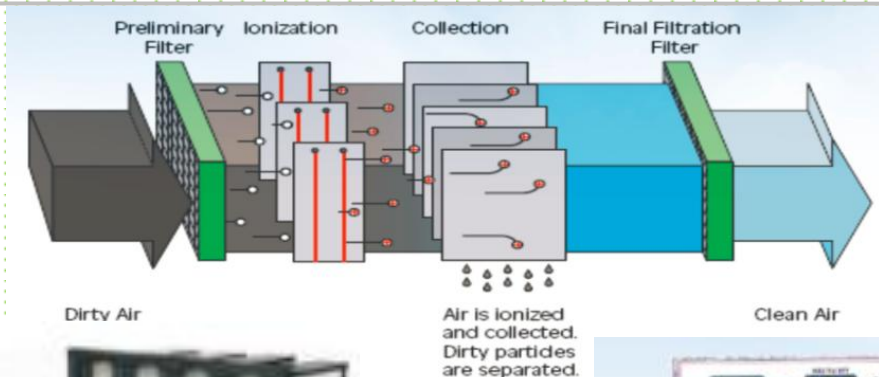
➤ 纤维过滤

- 纤维不带静电

- 纤维带静电

➤ 静电过滤器

➤ “离子”过滤



◆ 效率、阻力、容尘、尺寸、
副作用



具体应用存在（应注意）的问题

——不同过滤方式优、缺点

| 过滤方式 | 效率 | 阻力 | 容尘 (清洗) | 尺寸 (厚度) | 其它 |
|--------------------|--------------------|----|--------------|------------|-------------|
| 纤维过滤（玻纤） 纤维不带静电 | 效率高，且效率随使用时间提高 | 大 | 不可清洗 日常更换 | 较大 | 无副作用 |
| 纤维过滤（化纤） 纤维带静电 | 初始效率高，但效率随使用时间逐渐降低 | 较大 | 清洗次数有限 | 较大 | 无副作用 |
| 传统静电过滤器 | 可高可低 (效率保持?) | 小 | 可清洗 | 较大 | 二次污染、 脱尘 |
| 驻电极静电过滤 | 可高可低 (效率保持?) | 小 | 可清洗 | 小 | 脱尘 |



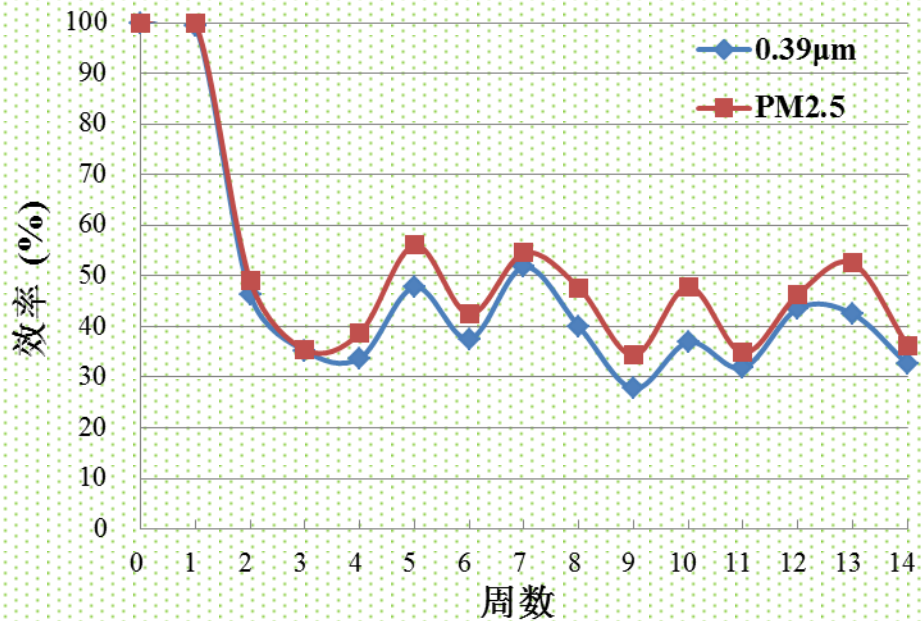
具体应用存在（应注意）的问题

- 过滤效率保持
- 实际使用效率与实验室效率（密封）
- HEPA使用？
- 更换问题（某研发中心弃用F9）
- PM效率

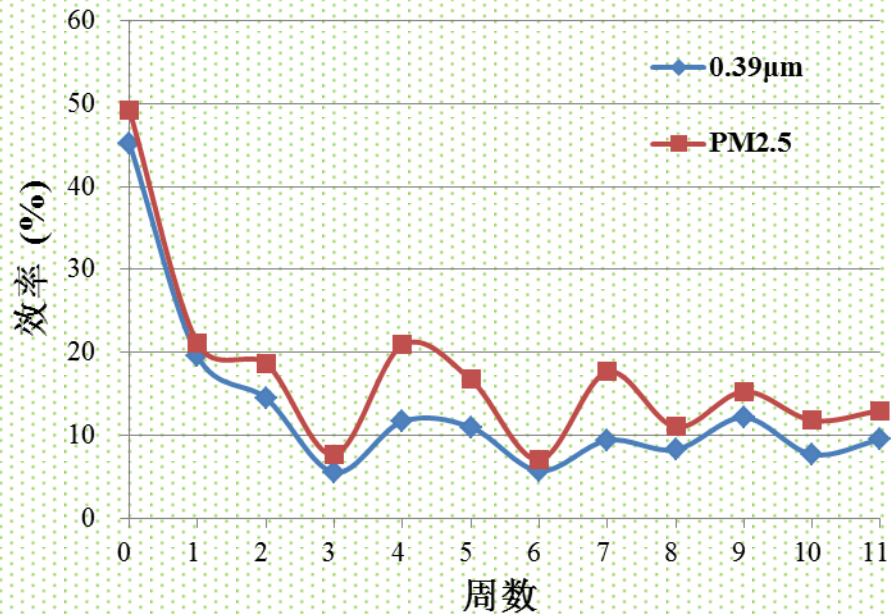




具体应用存在（应注意）的问题



空气净化器A

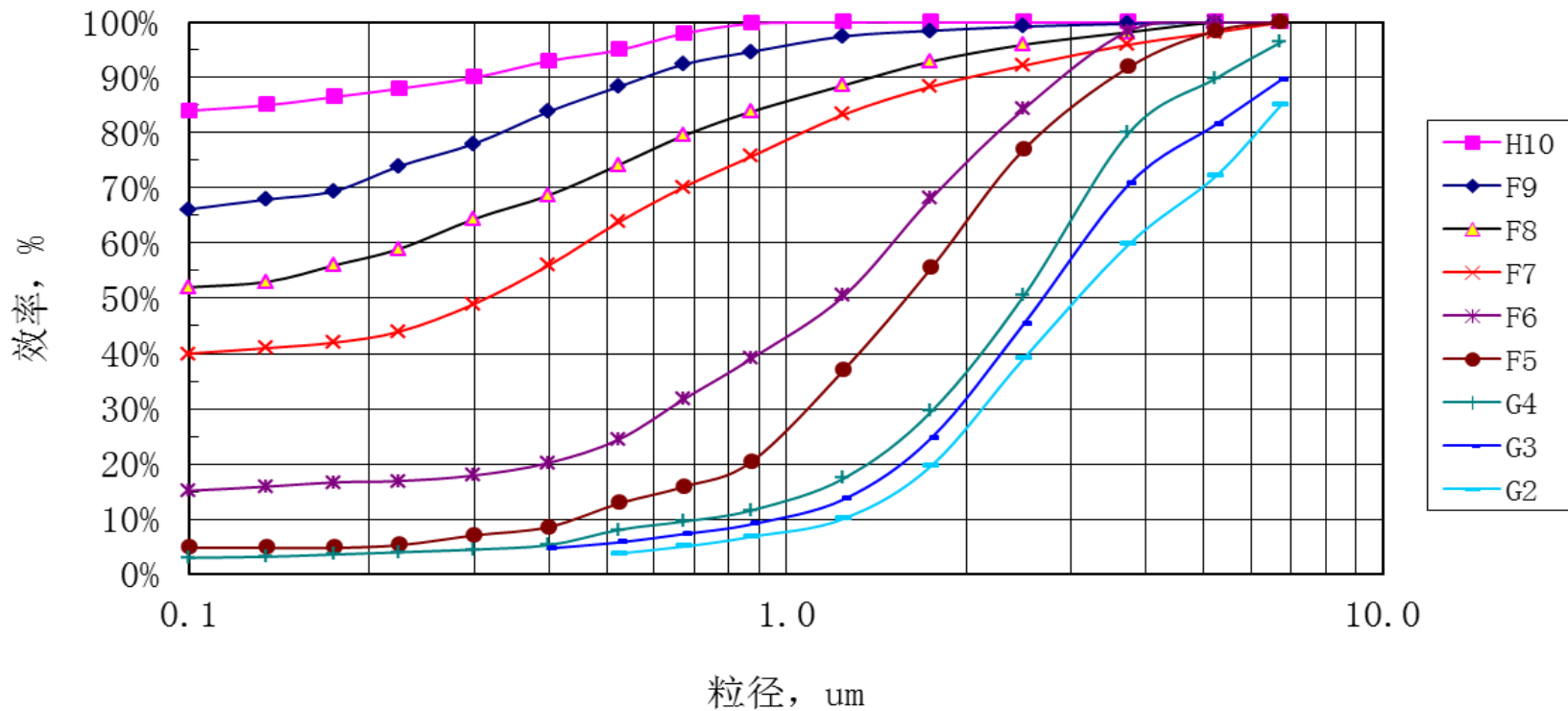


空气净化器B



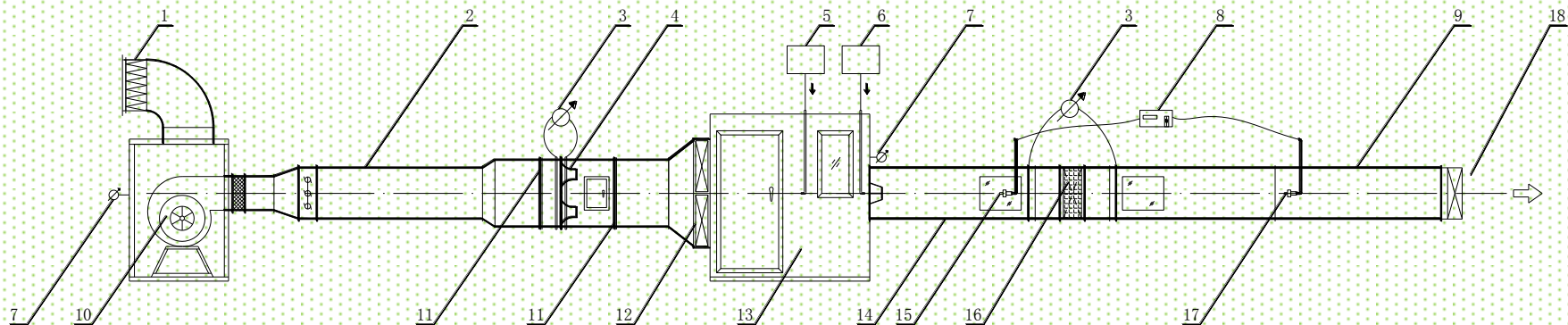
具体应用存在（应注意）的问题——过滤器PM2.5效率

过滤器初效率分级图





具体应用存在（应注意）的问题——过滤器PM2.5效率



- 气溶胶粒径谱仪
- DUSTTRAK





具体应用存在（应注意）的问题——过滤器PM2.5效率

◆ GB/T 14295-2008标准C2-GZ级空气过滤器对PM2.5的过滤效率

| 过滤级别 | C2 | C1 | Z3 | Z2 | Z1 | GZ |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| PM2.5过滤效率 (%) | 12.2 | 30.9 | 49.5 | 68.0 | 75.2 | 82.6 |

◆ EN779标准 G4-F8级空气过滤器对PM2.5的过滤效率

| 过滤级别 | G4 | M5 | M6 | F7 | F8 |
|------------------|------|------|-------|------|------|
| PM2.5过滤效率 (%) | 10.8 | 37.7 | 55.30 | 64.3 | 70.1 |

IS016890 -1: Air filters for general ventilation — Part 1:

Efficiency classification system based upon Particulate Matter (PM)

一般通风用过滤器按PM效率分级 (2015年3月11日)

- 总体思想：将分级效率按各粒径档对应的对数粒度分布概率进行加权平均
- 对受试过滤器进行容尘与效率检测、获得初始分级效率 E_i 和去除静电后效率 $E_{D,i}$
- 过滤器平均分级效率 $E_{A,i} = 0.5(E_i + E_{D,i})$
- 确定测试效率用气溶胶粒度分布

$$q_3(d) = \frac{dQ_3(d)}{d \ln d} = y \cdot f(d, \sigma_{gA}, d_{50A}) + (1-y) \cdot f(d, \sigma_{gB}, d_{50B})$$

σ 为粒子对数正态分布的标准差， d_{50} 为对数均值粒径， Y 代表混合比， A 表示细粒径， B 表示粗粒径

$$f(d, \sigma_g, d_{50}) = \frac{1}{\ln \sigma_g \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln d - \ln d_{50})^2}{2 \cdot (\ln \sigma_g)^2}\right]$$

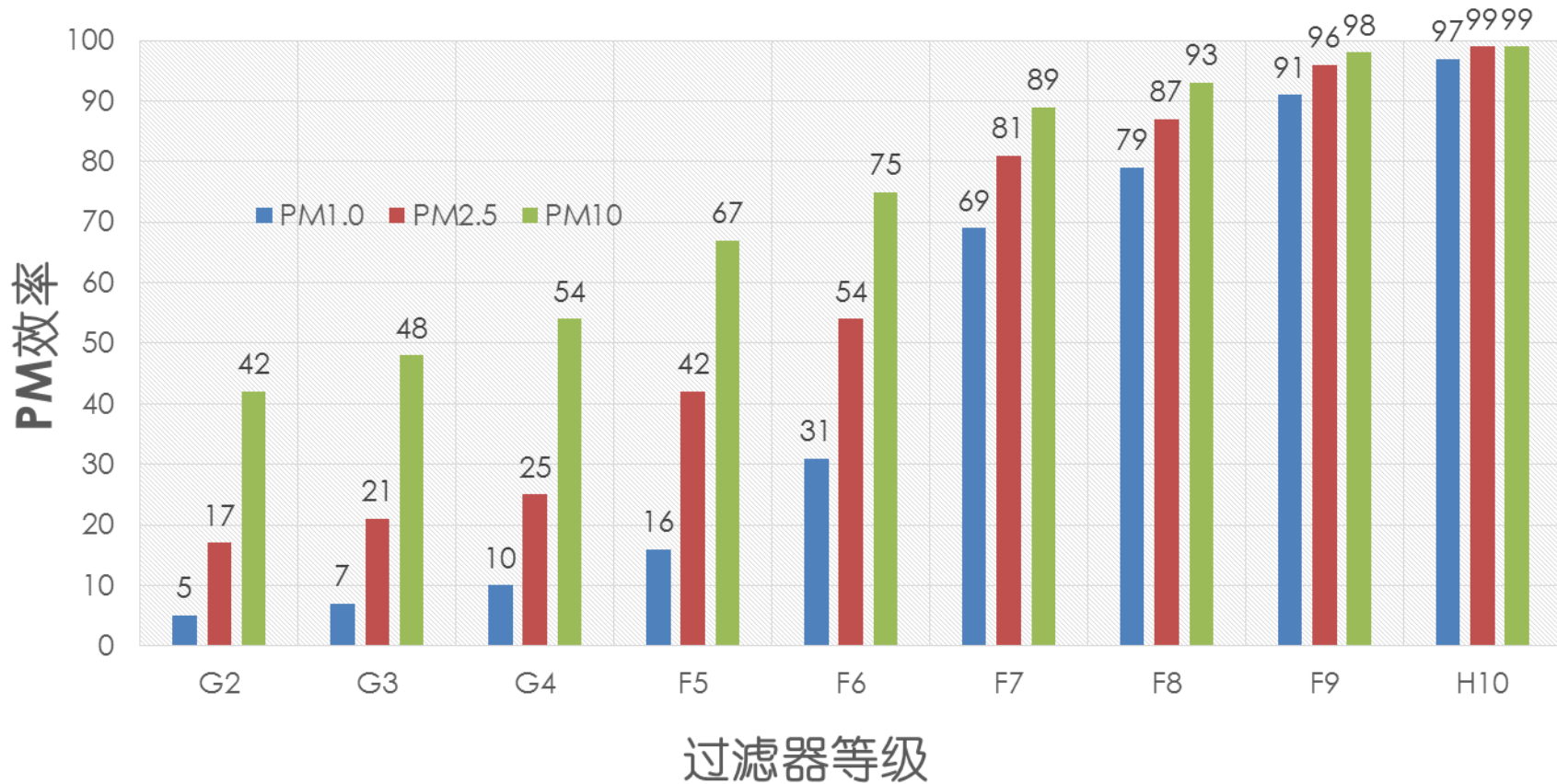
- 计算PM效率 $E(PM_x) = \sum_{i=1}^n E_{A,i} \cdot q_3(\bar{d}_i) \cdot \Delta \ln d_i / \sum_{i=1}^n q_3(\bar{d}_i) \cdot \Delta \ln d_i$

$$\Delta \ln d_i = \ln d_{i+1} - \ln d_i$$

i 为粒子技术器通道编号， n 为所计算PM效率包含的粒子通道数量。

ISO16890 -1: 一般通风用过滤器按PM效率分级

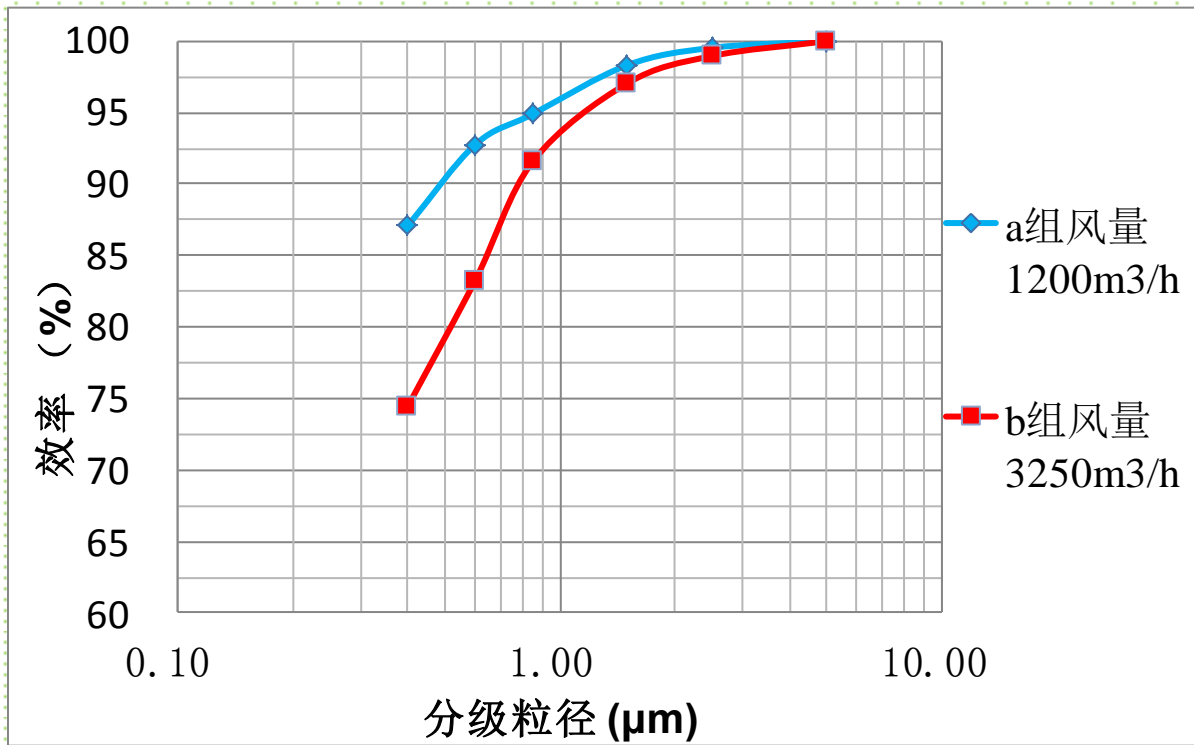
不同级别过滤器对应的PM效率





具体应用存在（应注意）的问题

——某厂家PM2.5空气过滤器

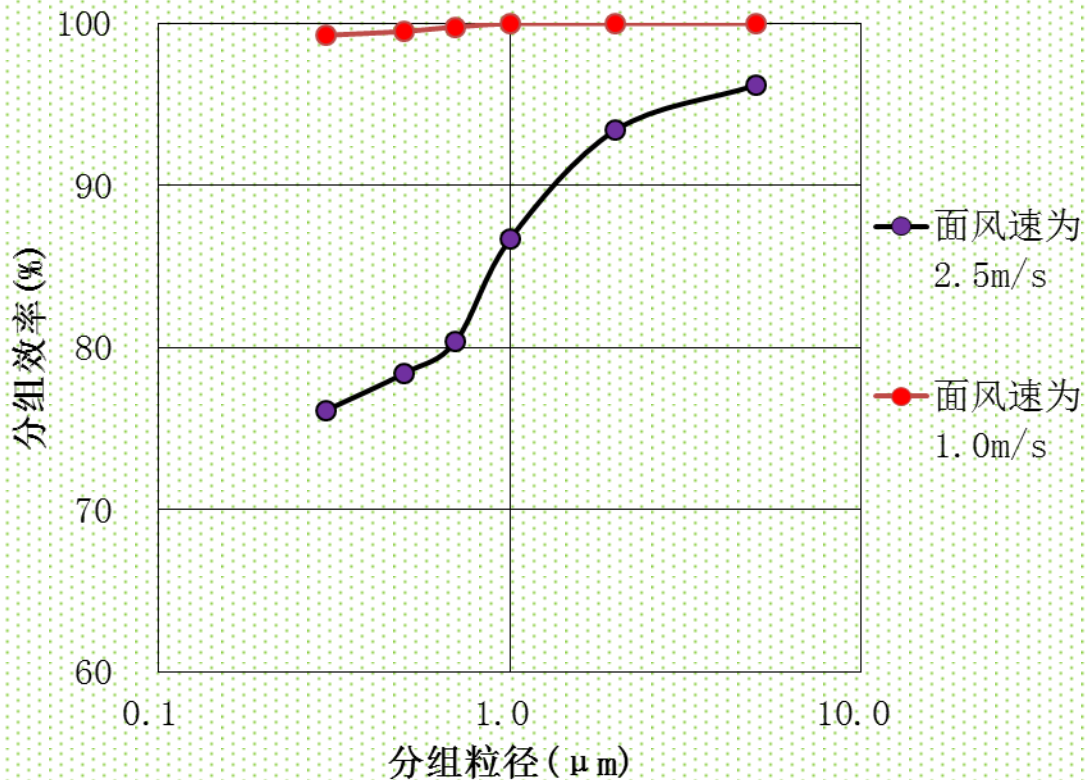


3250m³/h风量时阻力**92Pa**



具体应用存在（应注意）的问题

——某驻电极静电空气过滤器



3400m³/h风量时阻力49Pa



民用建筑室内PM2.5控制策略

- 源头控制（减少室内发尘量）
- 合理配置过滤系统（根据系统方式）
 - 全空气系统： AHU设置
 - FCU+FA： 净化器（相当于增加回风量及其过滤效率）
- 现有AC系统应注意过滤器阻力、容尘等
- 多种AC方式，根据具体项目具体分析



结论

- 民用建筑室内PM2.5状况并不令人满意
- 办公建筑室内颗粒物污染以细颗粒物为主
- 室内PM2.5浓度受多种因素影响，如室外浓度、风量（总风量、新风量）、室内发尘量（活动、吸烟）、过滤器效率等
- 控制策略根据具体项目（新建、改造、系统方式及**控制要求**等）具体分析
- 全空气系统AHU采用较高效率空气过滤器（F7）
- FCU+AHU、VRV等：选择**合适**的室内空气净化器
- 过滤器生命周期的效率



谢谢!

