

中国特色住宅通风和 空气净化技术

刘俊杰

“室内空气环境质量控制”天津市重点实验室

天津大学环境学院

2021年4月8日

汇报提纲

- 居民通风和空气净化现状：习惯和效果
- 通风与室内空气质量关系
- 室内净化方式对比分析、未来发展重点

住宅的“内忧”不断增加

● 室内空气质量的“健康”：从生理到心理环境标准不断提高



厨房油烟

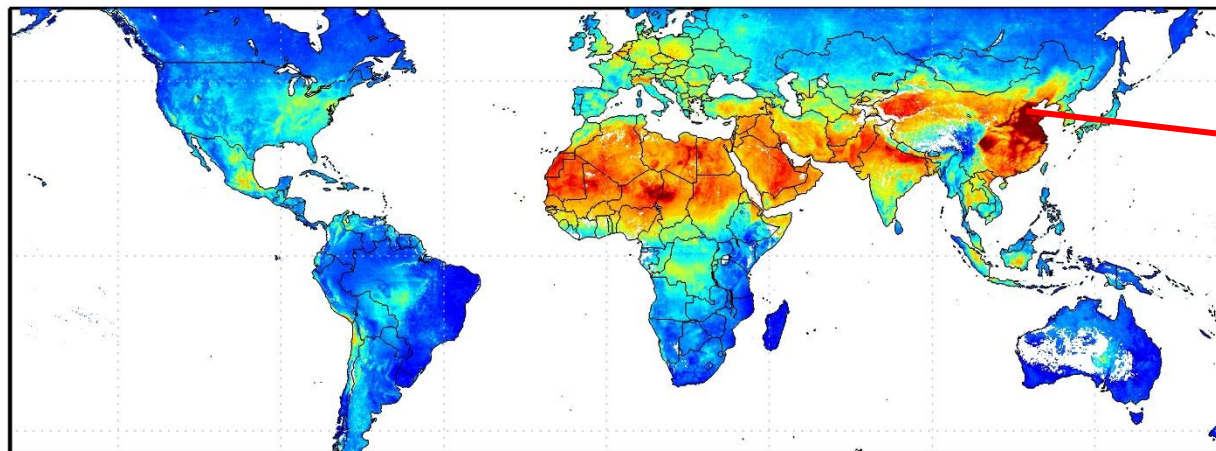


二手烟

- 化学污染物：主要是建材家具散发
- 颗粒物：烹饪油烟、二手烟、宠物皮毛
- 通风目的：空气吐旧纳新，污染物、热湿去除

住宅的“外患” 逐渐改善

● 我国住宅室内空气质量的“外患”：房子需要呼吸，通风不新鲜



0 5 10 15 20 50 80

全球大气PM_{2.5}浓度分布[μg/m³]



北京雾霾

● 化学污染物：臭氧、氮氧化物等

● 颗粒物：PM_{2.5}

两个矛盾：

1、室外污染物通过通风和风渗透进入室内

2、被动自然通风不足或超量；主动机械通风有初投资、消耗输送能源

十三五项目实测大数据

- 通风原理：被动自然风压、热压产生、不花钱大气搬运VS主动流体机械用电
- 当前住宅如何通风？居民通风习惯如何？通风与室内空气质量关系如何？
- 常见的住宅通风净化方式有哪些优缺点？我国住宅该如何通风？



我国绝大多数住宅的通风方式为自然通风，采用机械通风的住宅不到1%，且大多数位于北方和长三角地区。

中国机械通风形式

系统形式	屋内压力	净化过滤
	正压	有
	局部正压	有
	局部负压	无

通风和IAQ现状调研

室内在线监测WIFI物联网传感器组合



门窗传感器



空气品质传感器

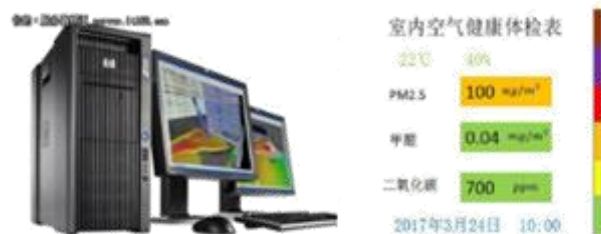


能耗传感器



机械设备传感器

监测参数：压差（风口）、温湿度、PM_{2.5}浓度（风口+室内）、能耗、门窗状态、CO₂浓度等



数据清洗、
在线标定



云端-中央服务器

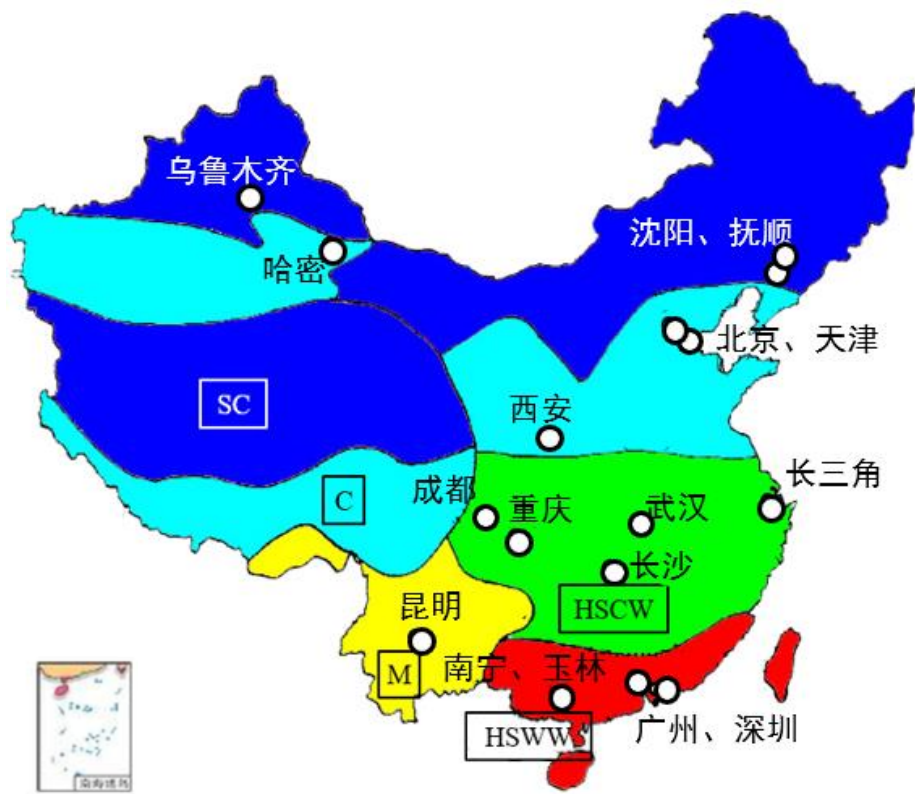
室内信息采集系统

十三五居住建筑通风和IAQ现状调研

调研样本量情况：5个气候区、涉及20个大中城市居住建筑

长期监测：自然通风住户共监测221户，机械通风住户共监测64户（其中带热回收33户）
入户检测：完成全国5个气候区224户全年四季入户检测（312户做过入户测试）
数据量：已经达到约11.5亿条，总数据大小接近50GB，长期监测时间跨度两年半（16-18）

超过一年长期监测样本量分布表

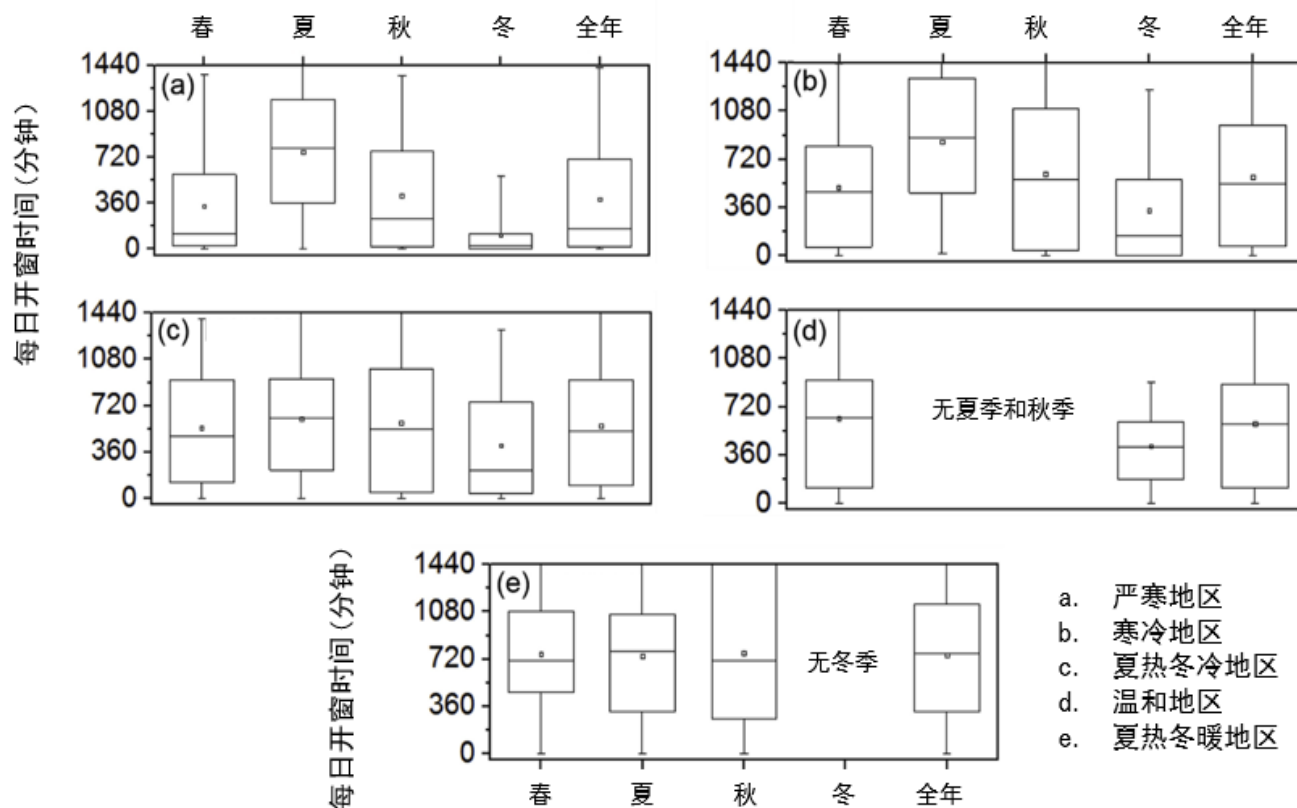


入户测试住宅样本分布

	自然通风住宅	机械通风 (带热回收)
沈阳、营口等	20	8(8)
乌鲁木齐	18	6(5)
北京、天津	33	14(10)
哈密	2	0(0)
西安	20	6(3)
武汉、长沙	7	2(0)
重庆、成都	23	6(0)
上海、南京	40	10(7)
昆明	21	6(0)
广州、南宁等*	37	6(0)

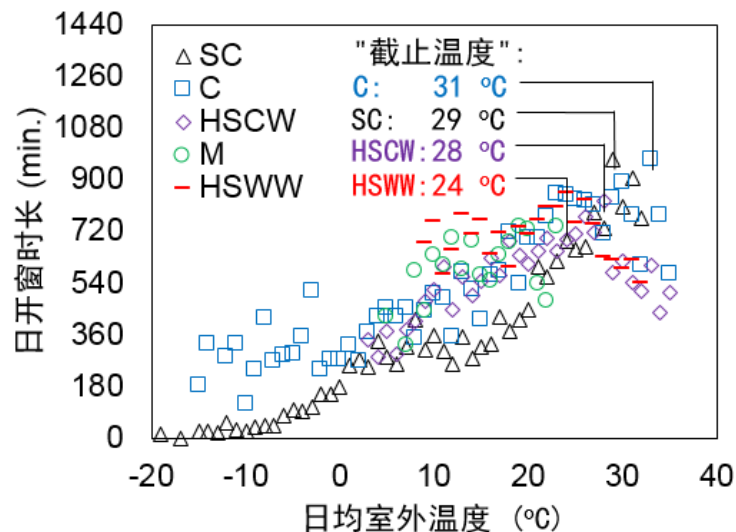
开关窗行为：气候适宜、能开就开

- 每日开窗时长的全年中位数依次是：2.6小时（严寒地区~ 10%时间）、9小时（寒冷地区）、8.6小时（夏热冬冷地区）、9.9小时（温和地区）、12.7小时（夏热冬暖地区，超过50%时间）
- 从北往南，日开窗时长的全年均值增加，开窗时长的季节性差异变小。



开关窗行为：大气温度影响

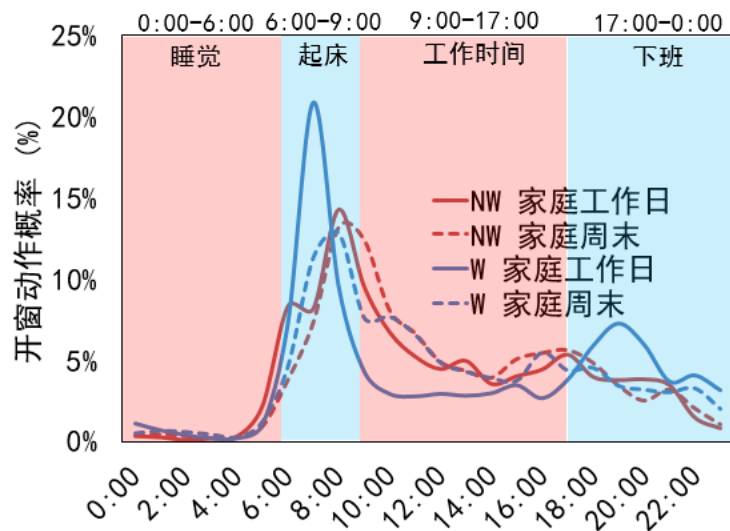
开窗时长与开关窗时刻



- 温度转折点
- 室外寒冷是不开窗的主要原因
 $\leq 28^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{out}} \uparrow$, 开窗时长 $\uparrow$;
 $> 28^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{out}} \uparrow$, 开窗时长 $\downarrow$, A/C开始使用, 室外热舒适影响开窗。

- 存在地区差异

同样的室外日均温度, 由北到南开窗时长逐渐增加, 生活习惯养成。



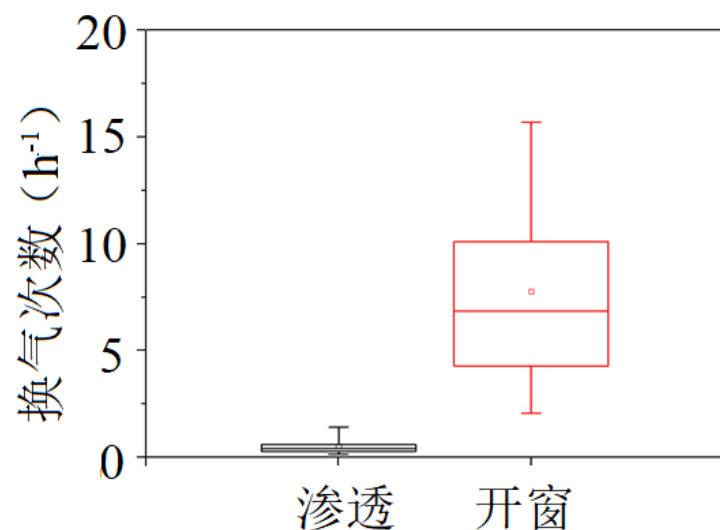
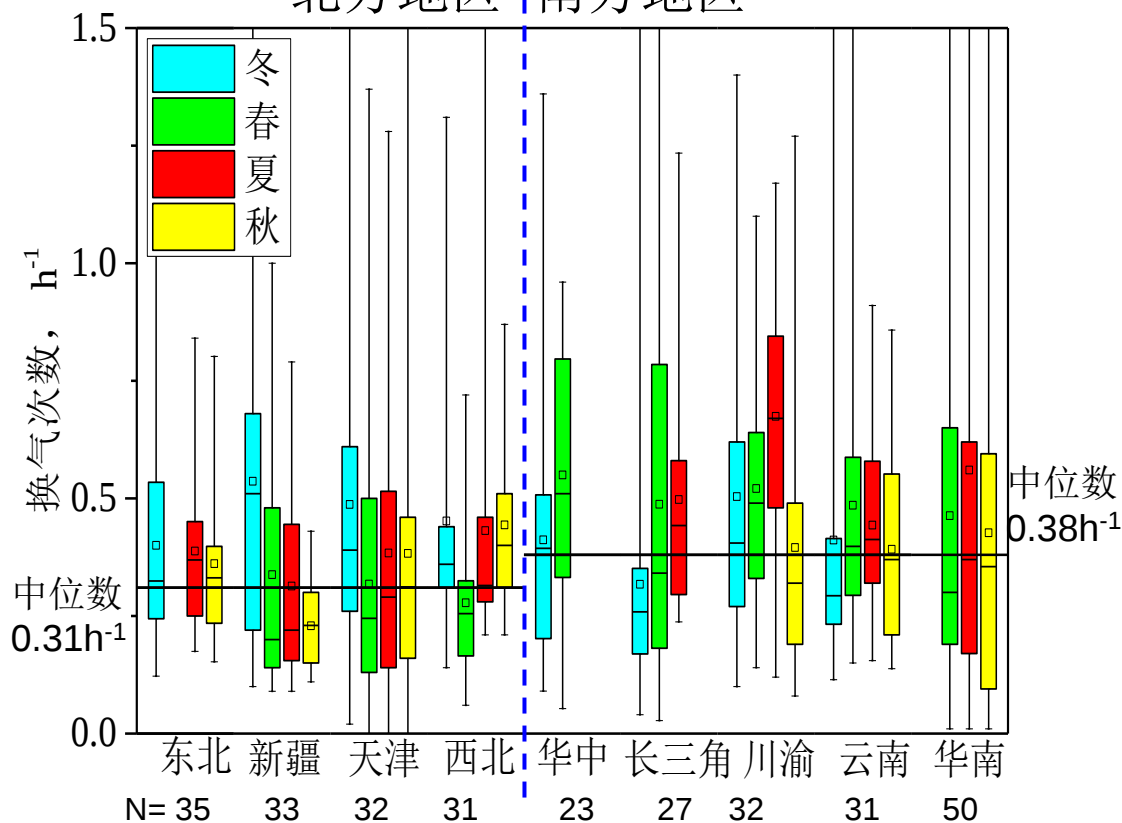
- 40%的开窗发生在早上6:00-9:00;
- 同一家庭结构, 周末早上开窗比工作日晚;
- 工作日的9:00-11:00, 上班族家庭开窗动作概率更低。

自然通风量：渗透和开窗

住宅关窗渗透和开窗通风下换气次数

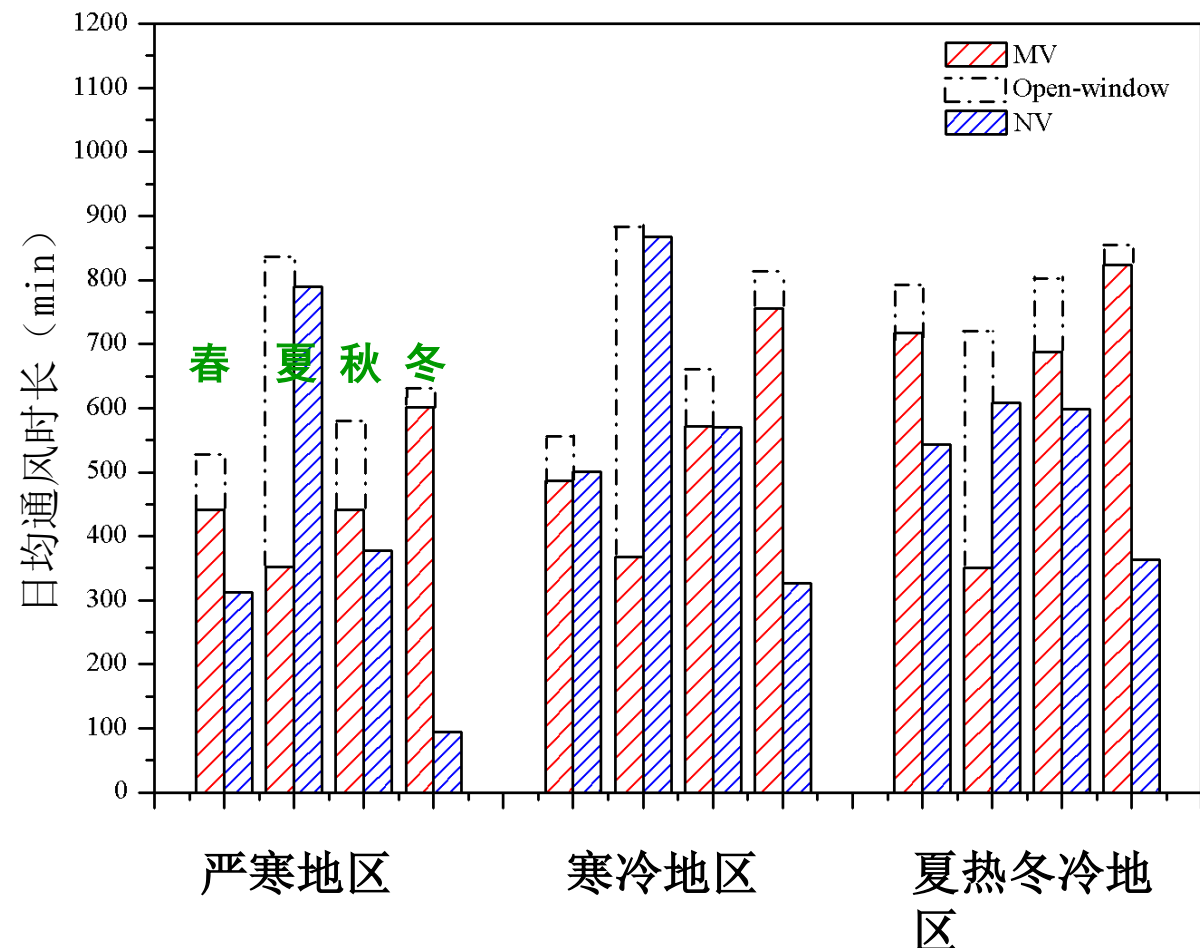
- 关窗渗透换气次数中位数=0.34 h^{-1}
- 北方地区对比南方地区渗透换气次数低~20%，房子气密性好。
- 开窗换气次数/渗透换气次数 ≈ 18 倍，开窗自然通风有满足通风需求的潜力。

北方地区 | 南方地区



机械通风VS自然通风

被动自然通风与主动机械通风四季日均通风时长对比



- 机械开启时长日均9.1h, 自然通风日均时长9.4h, 有同时开现象;
- 机械通风习惯与开窗自然通风习惯相同;
- 机械通风夏季最短, 冬季最长, 自然通风相反
- 在中国主动机械通风更多为呼吸的“备胎”

汇报提纲

- 居民通风现状：习惯和效果
- 通风与室内空气质量关系
- 室内净化方式对比分析、未来发展重点

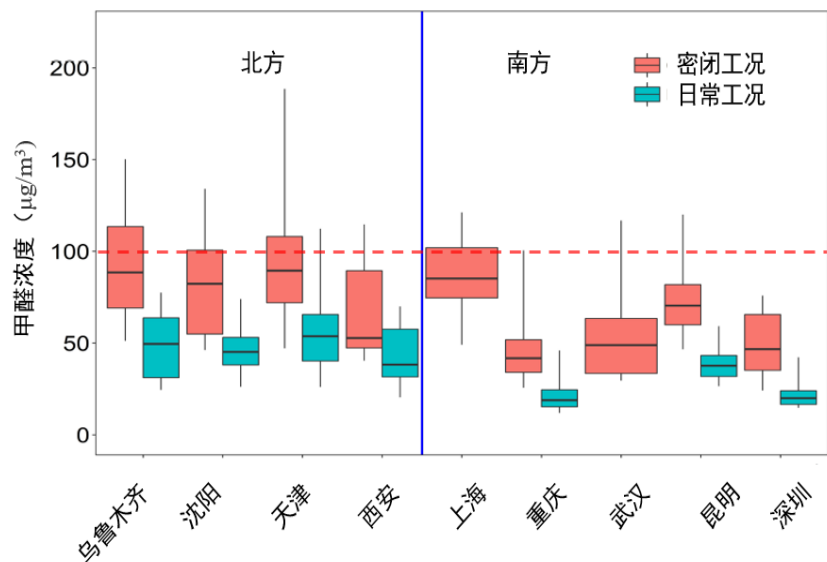
室内甲醛浓度

入户检测表明：北方地区关窗密闭室内甲醛浓度高于南方地区，**气密性造成**；按照标准来测试，**夏季室内甲醛浓度最高**，全国约有**35%的住宅室内甲醛浓度超过国家标准规定的限值**；

密闭工况下甲醛浓度显著**提高~50%**，长期关窗有害；

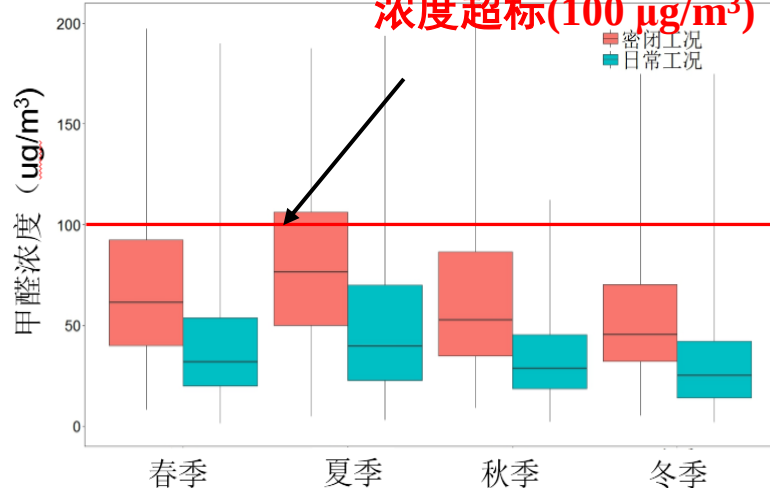
追求节能的被动房或零能耗建筑过度密闭增加窗户密封性，必须辅助新风系统

35%的住宅室内甲醛浓度超标($100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)



各地区全年甲醛平均浓度

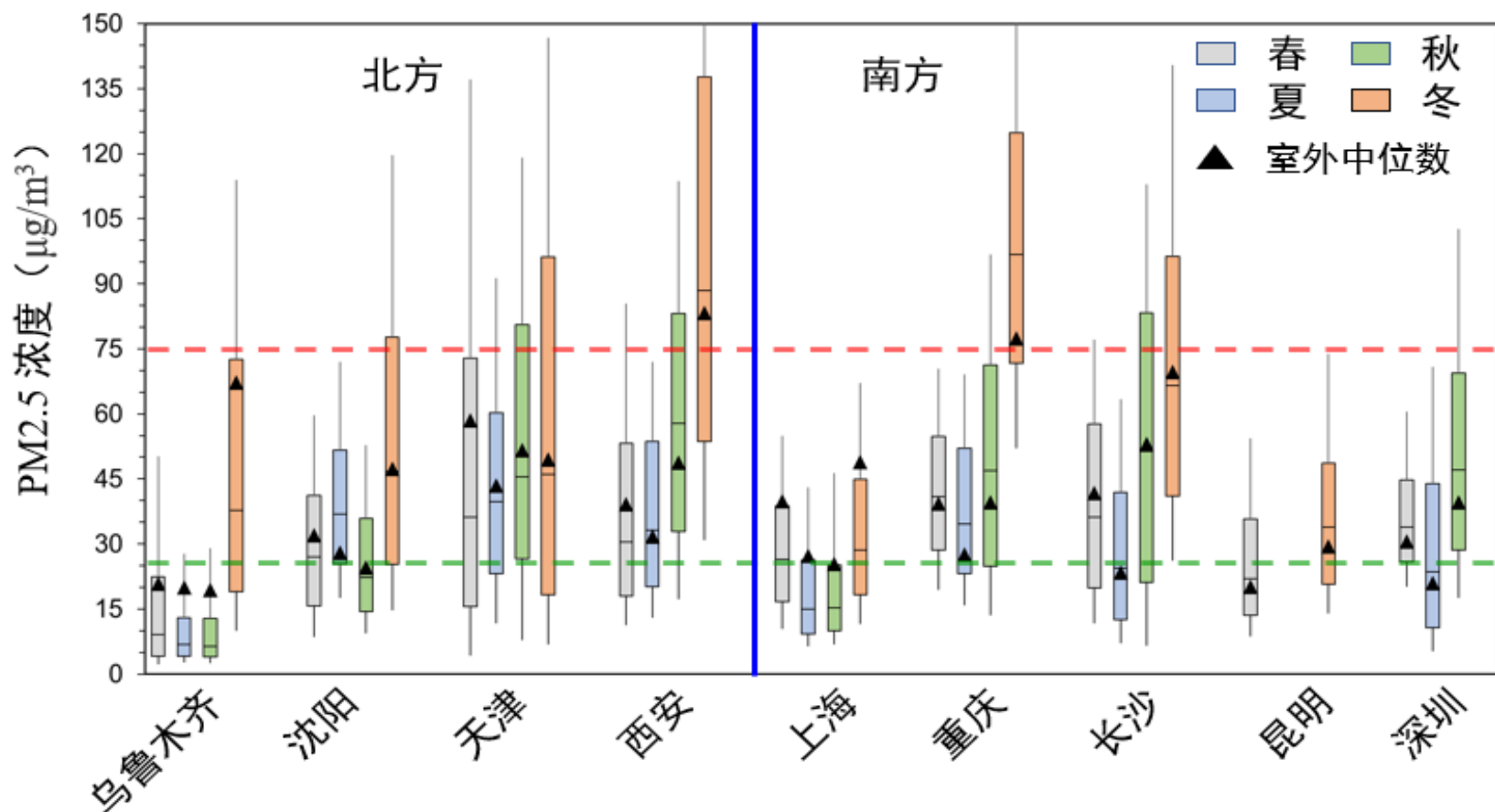
90分位数
75分位数
中位数
25分位数
10分位数



各季节全国甲醛平均浓度

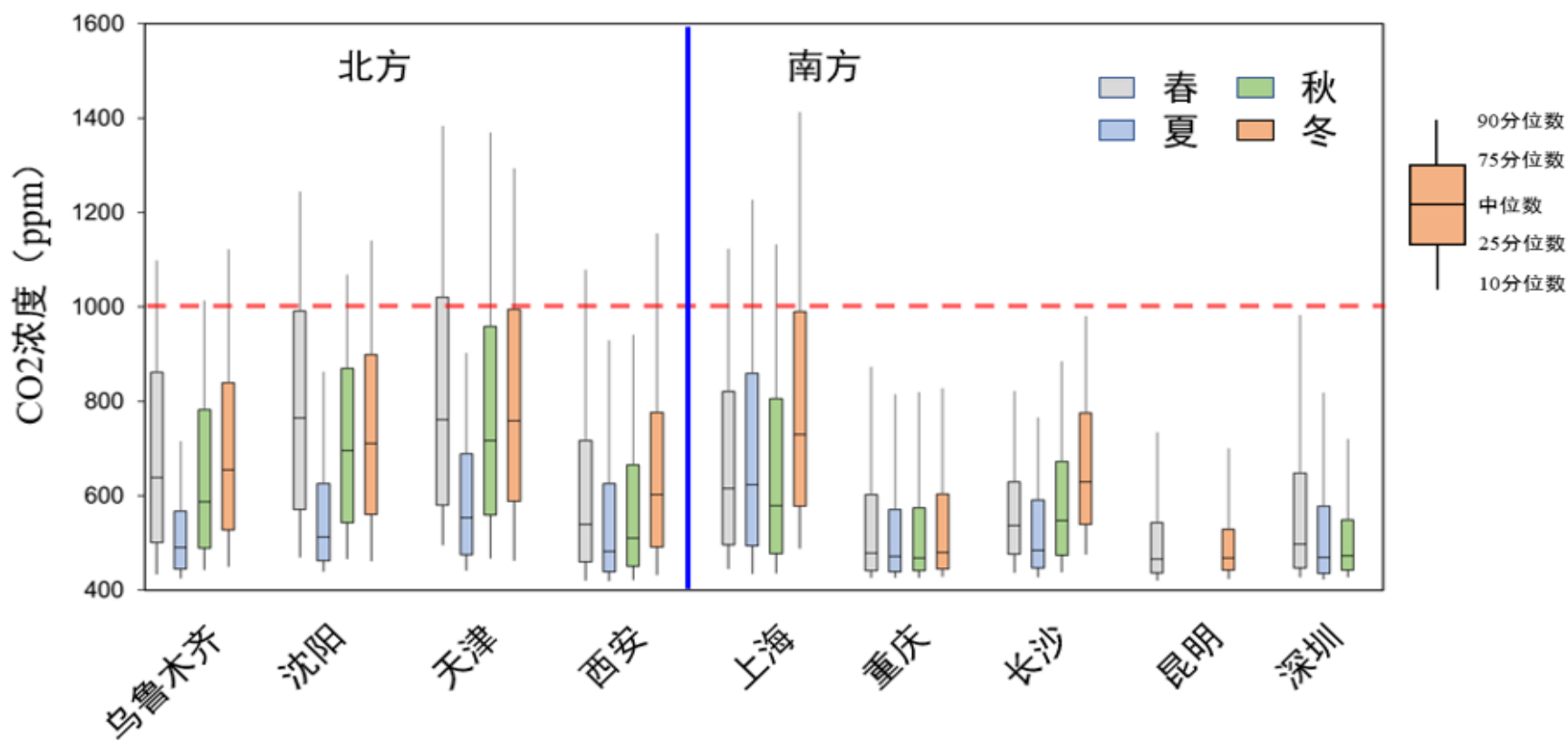
室内PM2.5浓度

- 室外雾霾严重的西安、重庆住宅室内PM2.5浓度较高，**多开窗使PM污染严重**
- 大多数城市室内外PM2.5浓度中位数接近：主要通风引入室外PM2.5
- 目前中国住宅的内源不多



室内CO₂浓度

- 对于北方住宅，所有城市在**春季和冬季~25%时间**日均CO₂浓度高于1000ppm，**需要加强通风，夏季通风充足**
- 对于南方住宅，**上海住宅冬季~25%的时间**室内CO₂浓度均高于1000ppm，**其他城市通风较好**



室内VOC浓度

全国住宅VOCs浓度水平：气态污染物种类比飞机和汽车座舱中多三倍，内源

单种VOC的中值浓度分布在 $1.4 - 14.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间

共检测到1206种VOC，其中29种检出率高于40%，即为中国家庭中普遍存在的VOCs

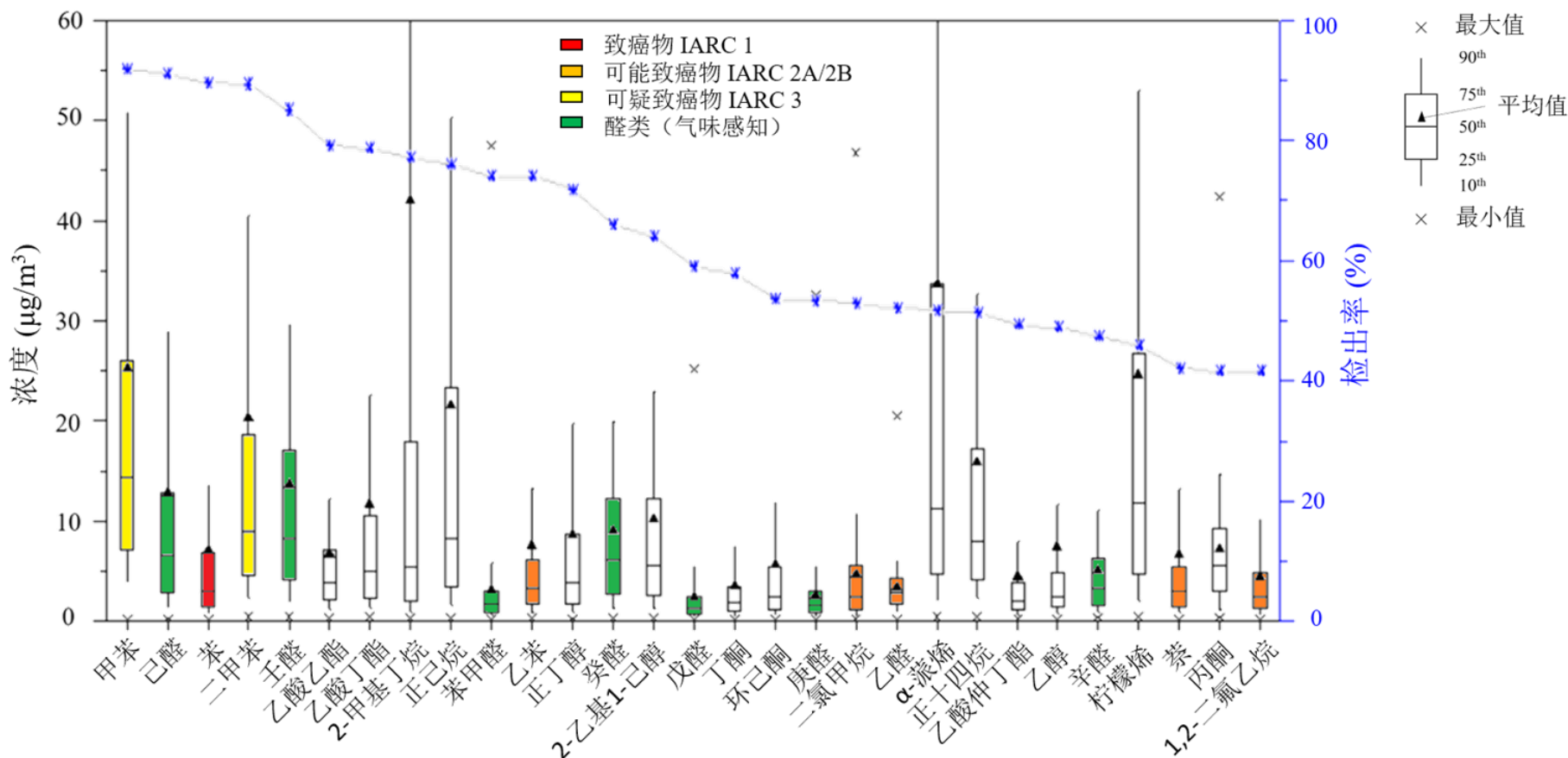


图. 中国住宅内检出率高于40%的VOCs及其浓度水平

室内VOC浓度

室内VOCs源分析

- 高检出率的VOC中，**醛类（21.76%）**占比最大，其次是**苯系物**、烯烃和烷烃
- 我国**烹饪过程**产生的醛类物质残留或是住宅建筑室内**VOCs的重要来源**，**厨房现有通风不足！没有新风配合的油烟机效果不佳，造成大量VOCs残留！**

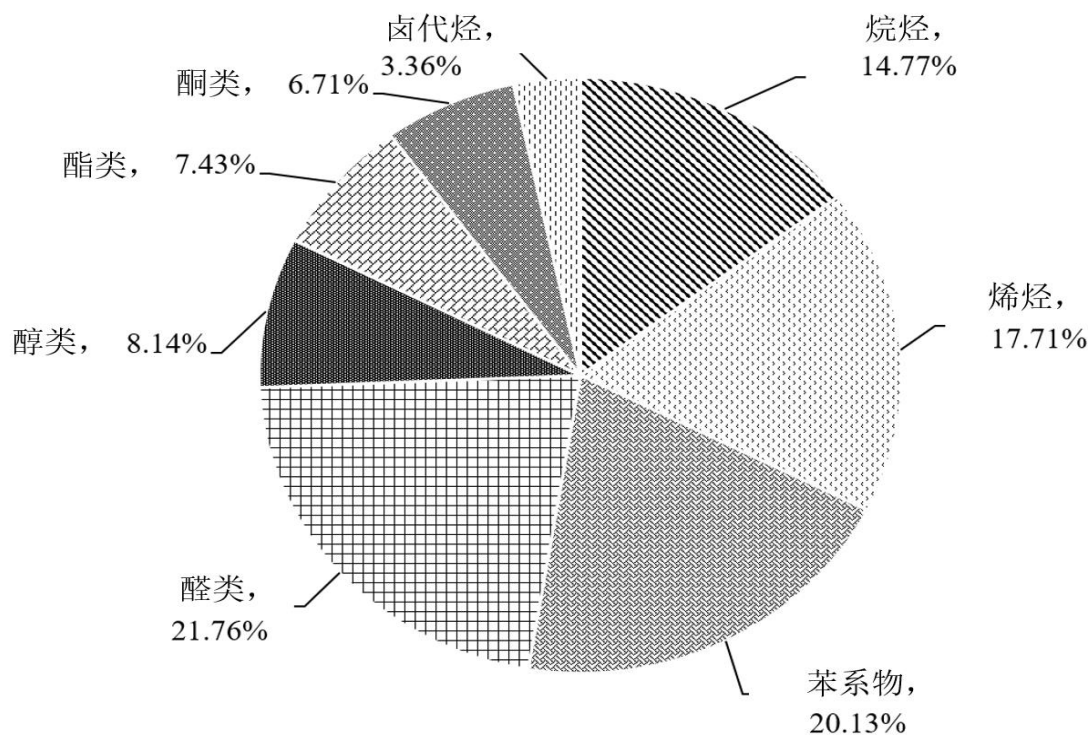


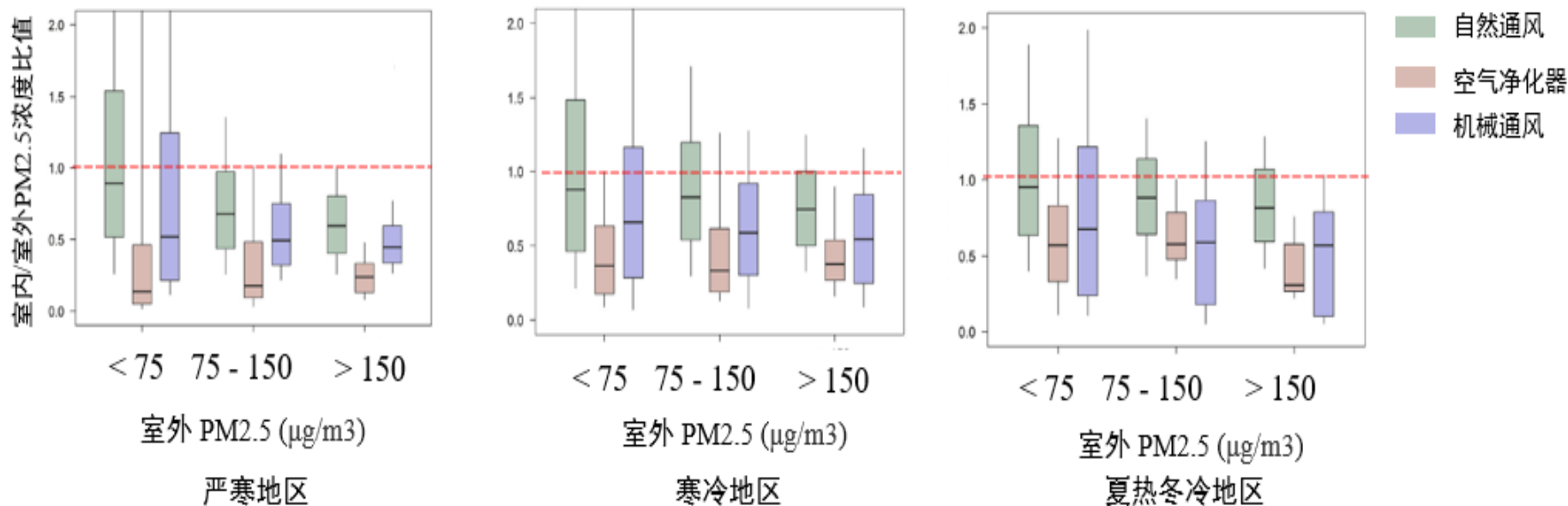
图. 中国住宅内检出率高于40%的VOCs及其浓度水平

汇报提纲

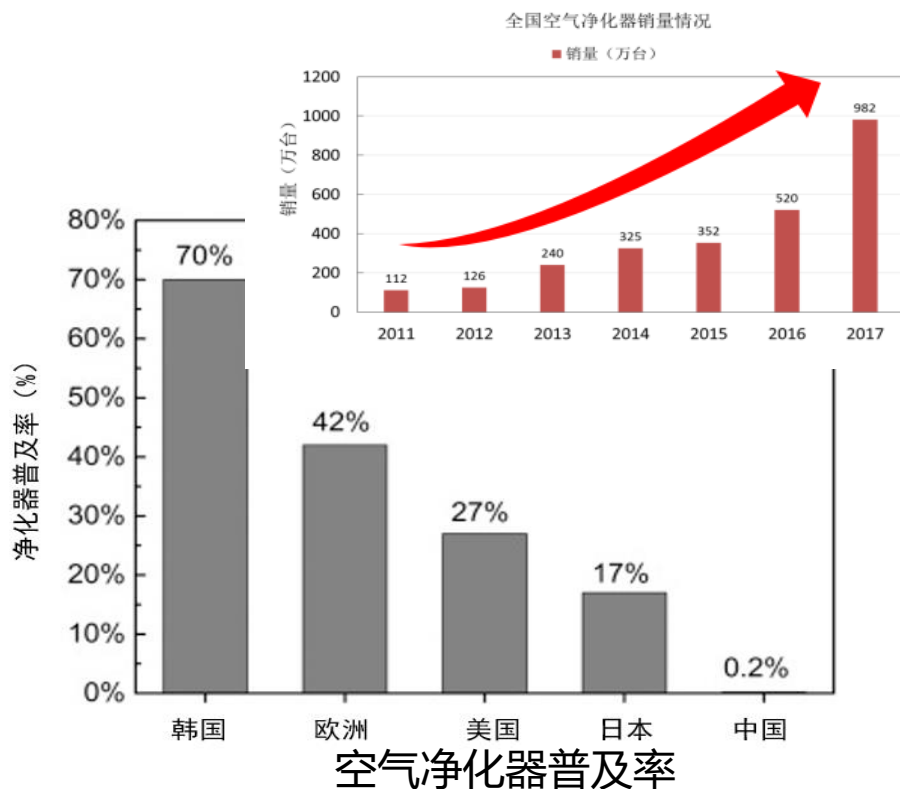
- 居民通风现状：习惯和效果
- 通风与室内空气质量关系
- 室内净化方式对比分析、未来发展重点

净化方案对比

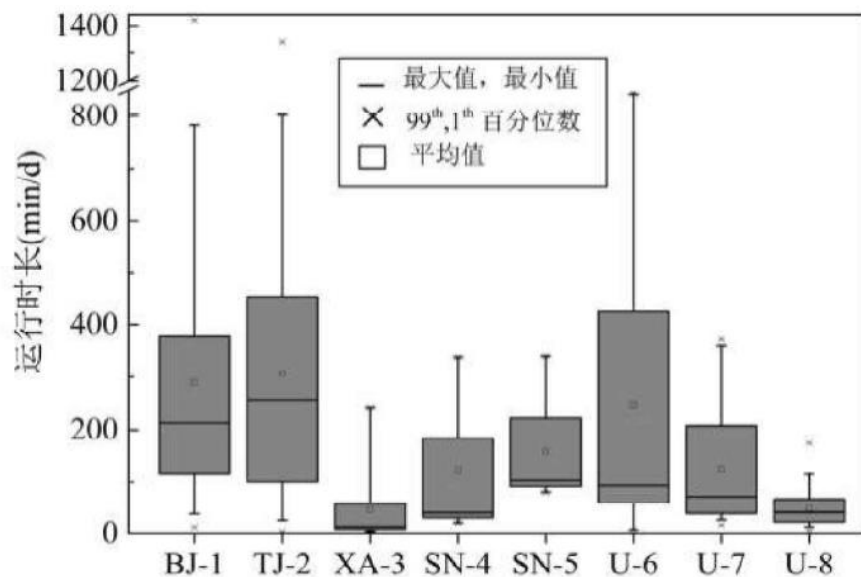
- 实测室内外浓度I/O比，CADR值差5倍以上，空气净化器对PM2.5净化效果最好
- 从北到南，随着住宅气密性降低，空气净化器使用效果略微有所降低
- 严寒地区住宅通过关窗，能在一定程度上降低PM2.5浓度I/O比
- 机械新风系统净化性能受室外PM2.5源浓度变化影响最大



空气净化器普及率及使用情况



长期监测



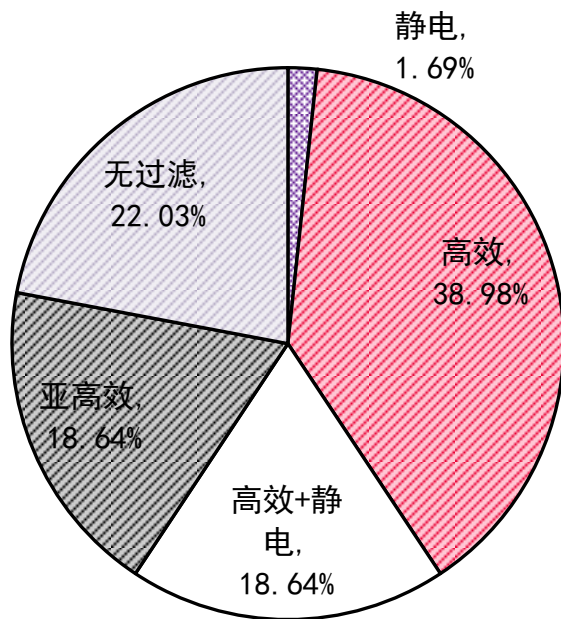
监测住户净化器日常运行时长

- 我国空气净化器的普及率远远低于其他发达国家，仅为0.2%左右（2016-17）
- 拥有空气净化器的使用积极性很低
- 中国需要推出洁净空气物业服务
- 采取间歇式运行的模式，平均约开启1-4小时/天。
- 开启时长有明显的个性化差异，且多数用户使用的时长没有规律性。

机械通风系统性能调研

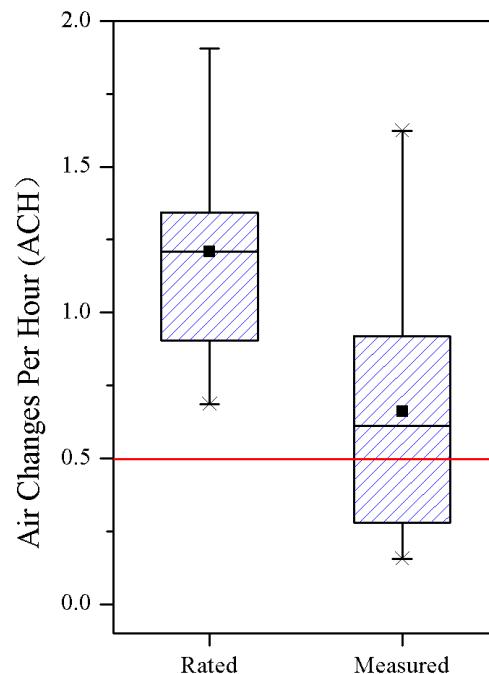
机械通风系统性能研究

机械通风系统净化技术统计



- 除西南地区负压系统，其余系统均有过滤技术
- 系统PM2.5过滤标称效率均大于95%

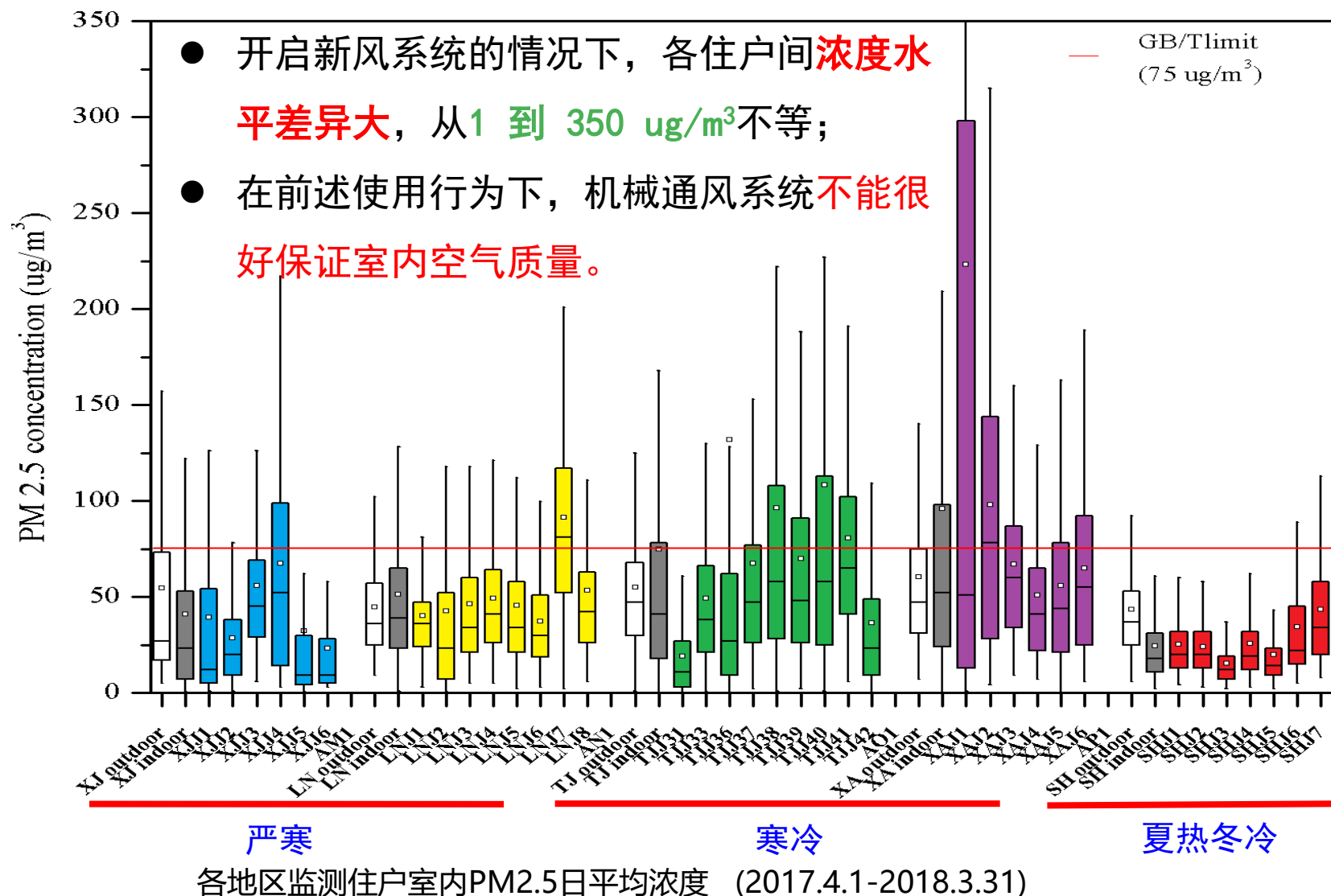
机械通风实测换气次数与标称换气次数对比图



- 标称风量大部分1ACH以上，实测0.65ACH左右（余压不足，维护不佳）
- 考虑运行行为，实际每日换气次数6.1ACH，机械系统效果相当于渗透通风换气！

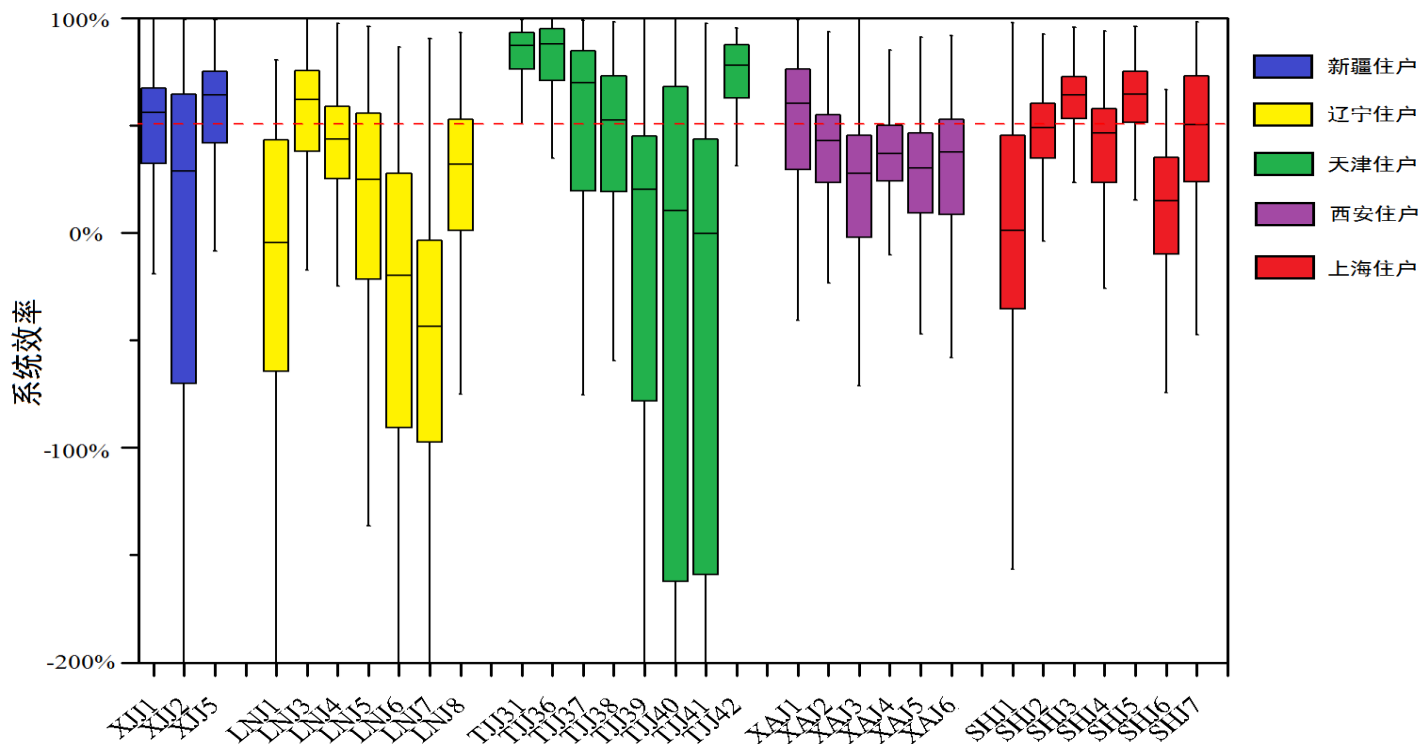
机械通风控霾效果调研

机械通风系统使用效果



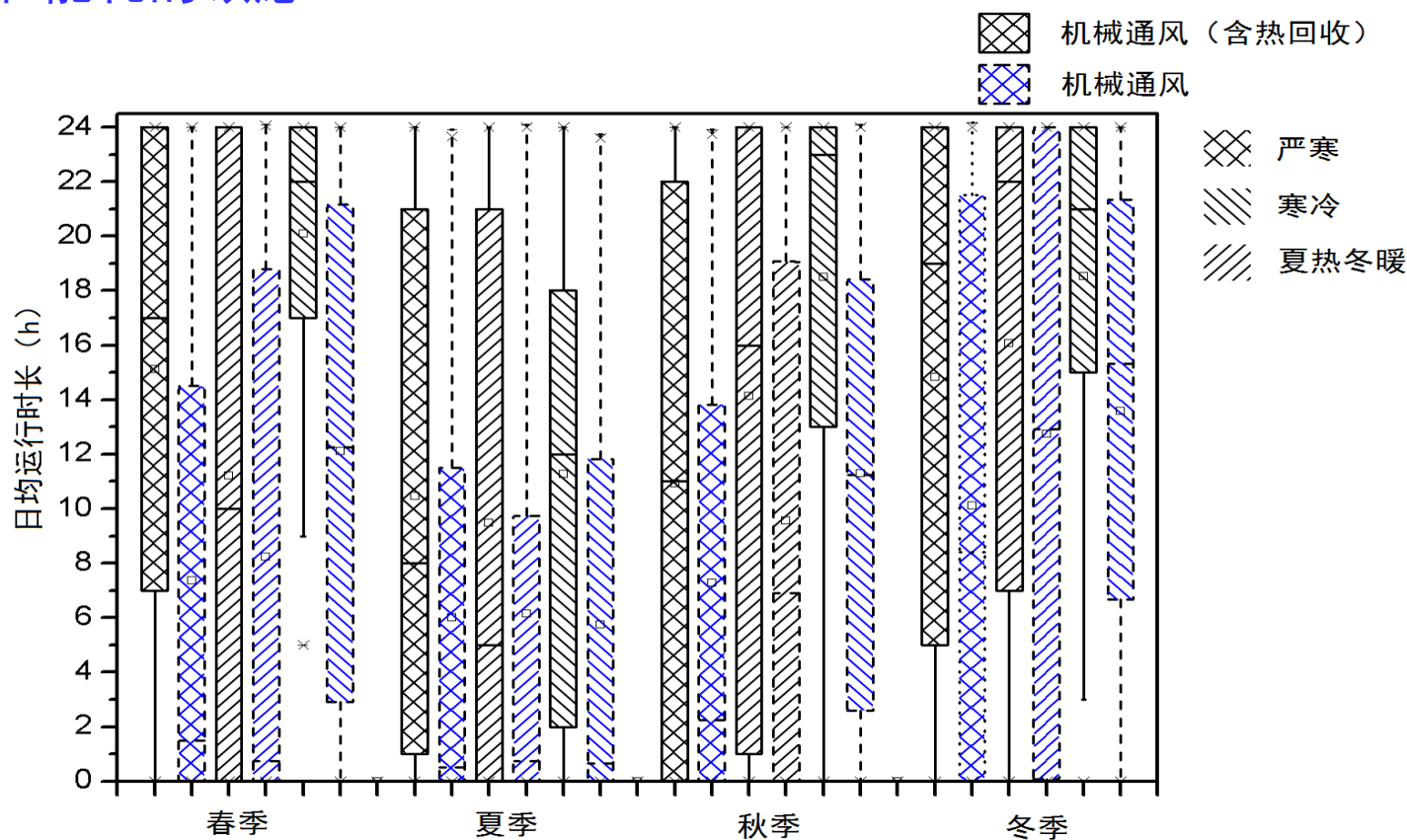
机械通风系统使用效果

- 在线效率测量，超过80%的住户系统甚至会出现负效率运行状态
- 不维护的机械通风系统不仅不会有效去除室外污染物，还可能引入室外颗粒物，造成对室内的二次污染
- 监测住宅建筑中机械通风系统的监测平均效率仅约为50%，远远低于系统铭牌的标称过滤效率



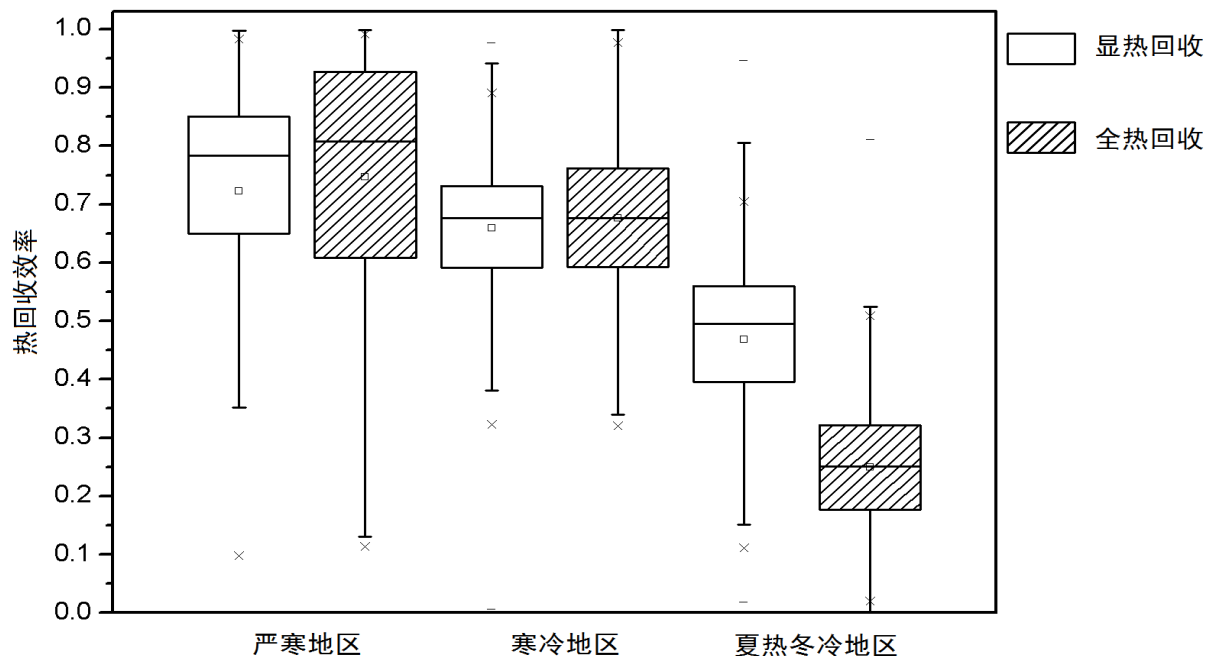
机械通风系统使用行为

- 不含有热回收功能的机械通风系统其日平均开启时长为9.1小时，而含有热回收功能的机械通风系统其日平均开启时长为13.4小时（增加50%时间）。
- 含热回收的功能的机械通风系统缓解了居民在使用机械通风系统时新风温度不适和能耗的顾虑！



热回收使用效果

不同地区机械通风潜热/显热回收实测效率



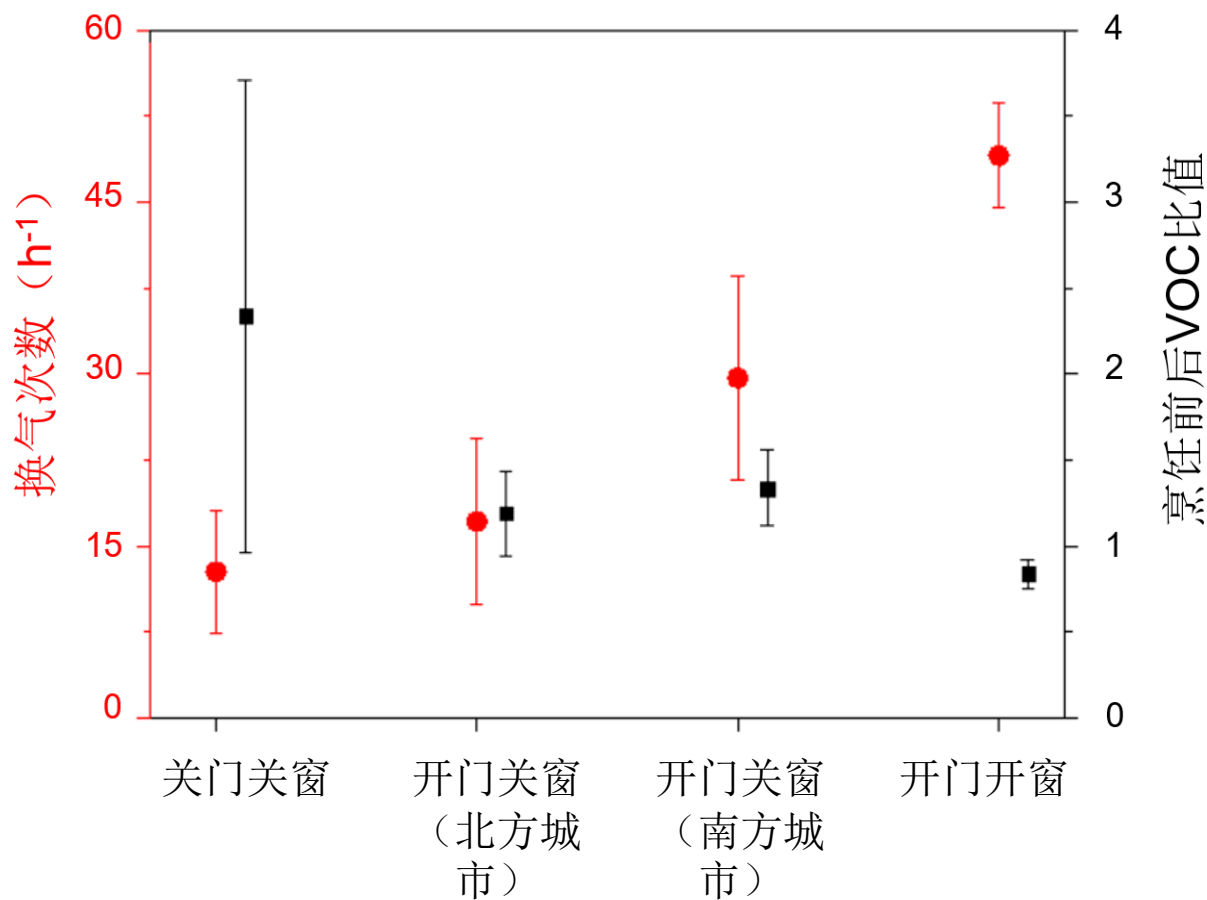
- 冬季各区实测热回收效率差异大，10%-95%；
- 冬季严寒地区热回收效率大于80%，全热回收效果更佳，推荐使用！
- 寒冷地区热回收平均效率仅60%，全热回收提升不大，节能效果一般。
- 夏热冬冷地区热回收效率低于40%，不推荐使用！

油烟机通风使用效果调研

抽油烟机排风量调研

烹饪期间冬季入户实测数据

现状：厨房实际换气次数受气密性影响波动，不能满足颗粒物、VOC净化的需求；抽油烟机实际有效排风量低，需要改进标准



$$\text{抽油烟机:} \quad \frac{\text{有效排风量}}{\text{额定排风量}} = 10\%-40\%$$

空气净化器Vs机械通风

自然通风+空气净化器:

- ✓ 大风量空气净化器
- ✓ PM2.5净化效果好
- ✓ 布置灵活
- ✓ 经济性好
- ✓ 循环净化室内空气PM
- × 部分时间通风不足
- × 更换滤芯不及时

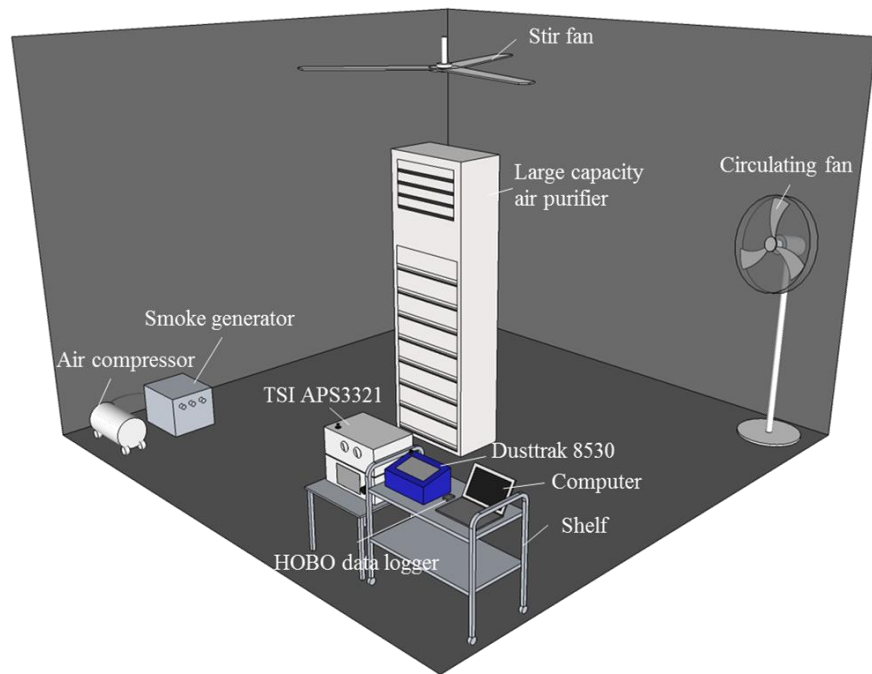
机械通风:

- × 小风量
- × 二次污染
- × 单次净化新风
- × 清洗麻烦
- × 高成本
- ✓ 风量稳定、可控
- ✓ 室内气态污染净化好

- 目前空气净化的主流：空气净化器适宜我国住宅
- 经济条件提升，大城市住宅冬季需要机械通风补充通风量
- 自然通风和夜间通风可能为制冷系统贡献10%-50%的节能潜力

大风量空气净化器性能测试

天津大学合作研发大风量（CADR=800+）空气净化器：GB测试方法探索、性能分析



测试各研发滤芯净化性能



a



b

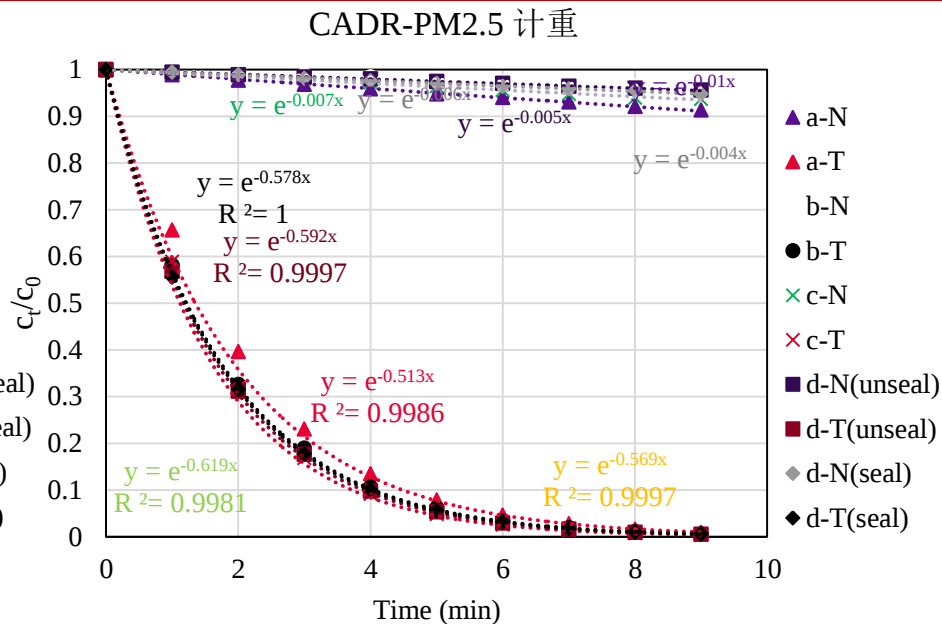
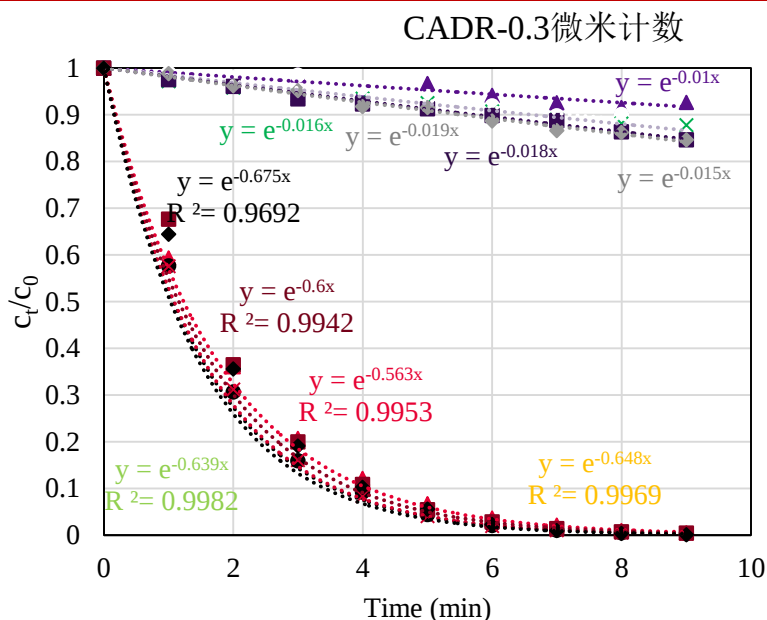


c



d

大风量空气净化器性能测试



➤ 注: N-自然衰减, T- 总衰减

滤芯种类	a	b	c	d (未密封)	d (密封)
CADR-0.3微米计数 (m ³ /h)	1121	995	1139	1047	1180
CADR-PM _{2.5} 计重(m ³ /h)	1101	905	1017	940	1029

- 该大风空气净化器可提供1100m³ /h洁净空气，是普通空气净化器3-6倍；
- 用于超市、办公室、病房或豪宅，每15分钟净化一次全部空气
- 对各种气溶胶净化效率大于99.9% (**超过N95口罩95%的净化效率**)

空气净化器净化效力

不同气流组织形式下空气交换效率

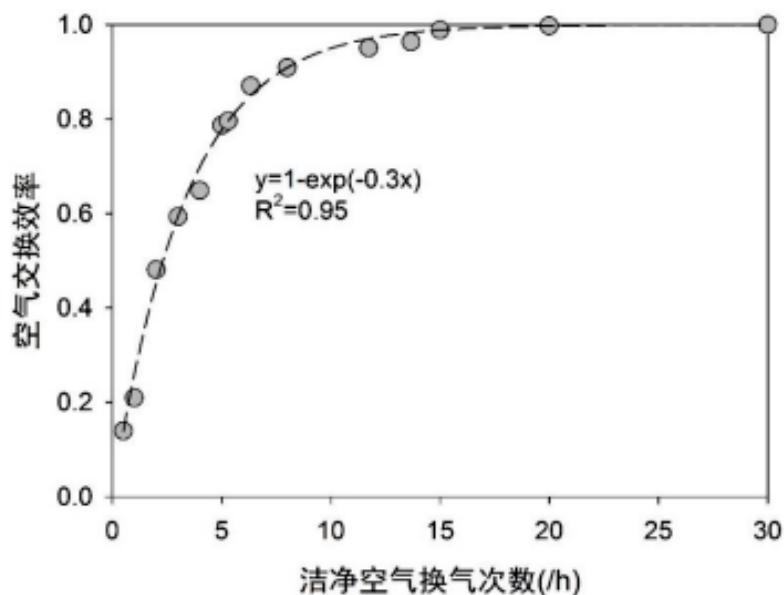
气流组织形式	空气交换效率	室内平均换气时间和最短换气时间的关系
单向流	0.5-1.0	$\tau_n < \tau_{exc} < 2\tau_n$
均匀混合	0.5	$\tau_{exc} = 2\tau_n$
短路循环	0-0.5	$\tau_{exc} > 2\tau_n$

$$CADR = Q\eta[1 - \exp(-n_{PAC})]$$

Q-净化器风量

η -单通净化效率

n_{PAC} -洁净换气次数



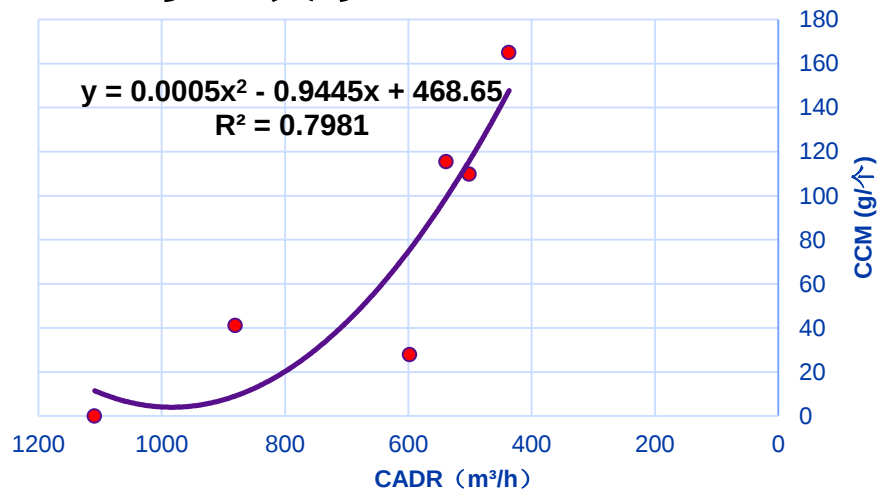
- 对于空气净化器，其洁净空气输送量是由**空气净化器风量、单通效率**和空气净化器放置在房间中时其**气流组织形式**共同决定的
- 空气交换效率会随着风量的增加而增大。
- 空气交换效率和洁净空气换气次数呈指数关系，**换气次数大效率高**

空气交换效率和洁净空气换气次数关系

空气净化器油烟净化效果

净化器厨房油烟净化效果寿命不长

CADR与CCM关系：



- 空气净化器可用作室内油烟净化捕集
- PP聚丙烯静电材料（口罩滤层材料相同）滤芯，在过滤收集油烟颗粒物同时静电消失，效率下降，导致洁净空气量（CADR）衰减迅速
- 有油烟情况下需要更加频繁更换滤芯

结论

- 住宅需要开窗通风，大气改善后VOCs污染是解决关键
- 净化方案中空气净化器解决PM2.5效果好
- 新风系统解决二氧化碳问题
- 需要提高空气净化器和新风的维护保养
- 大风量空气净化器是未来，厨房油烟对滤芯影响大

致谢：参加国家十三五绿色建筑重点研发项目各位老师 and 同学

谢谢批评指正 jjliu@tju.edu.cn