

如何营造健康舒适的室内环境？ ——可持续建筑领域面临的新挑战

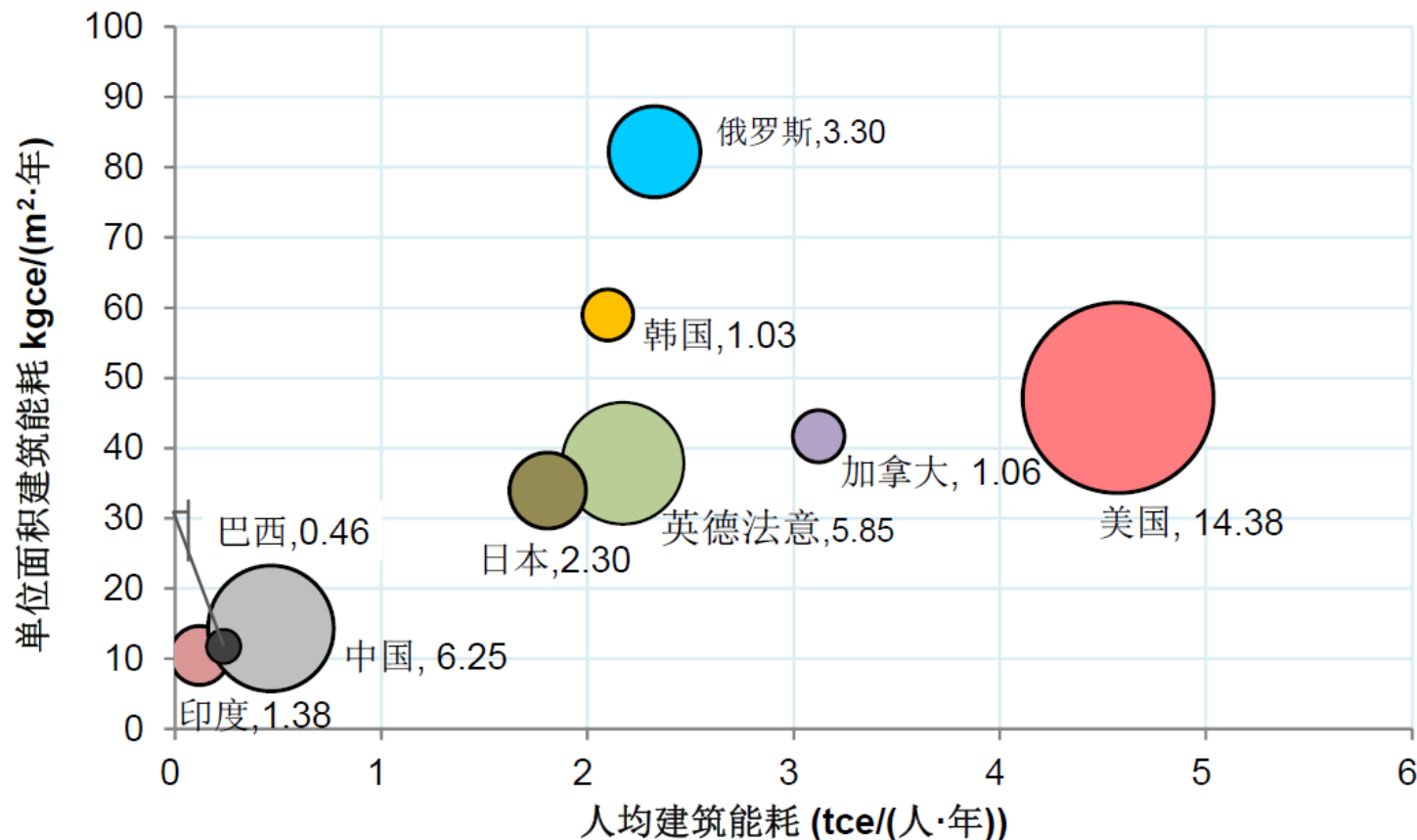
朱颖心

清华大学 建筑学院
2018年8月10日



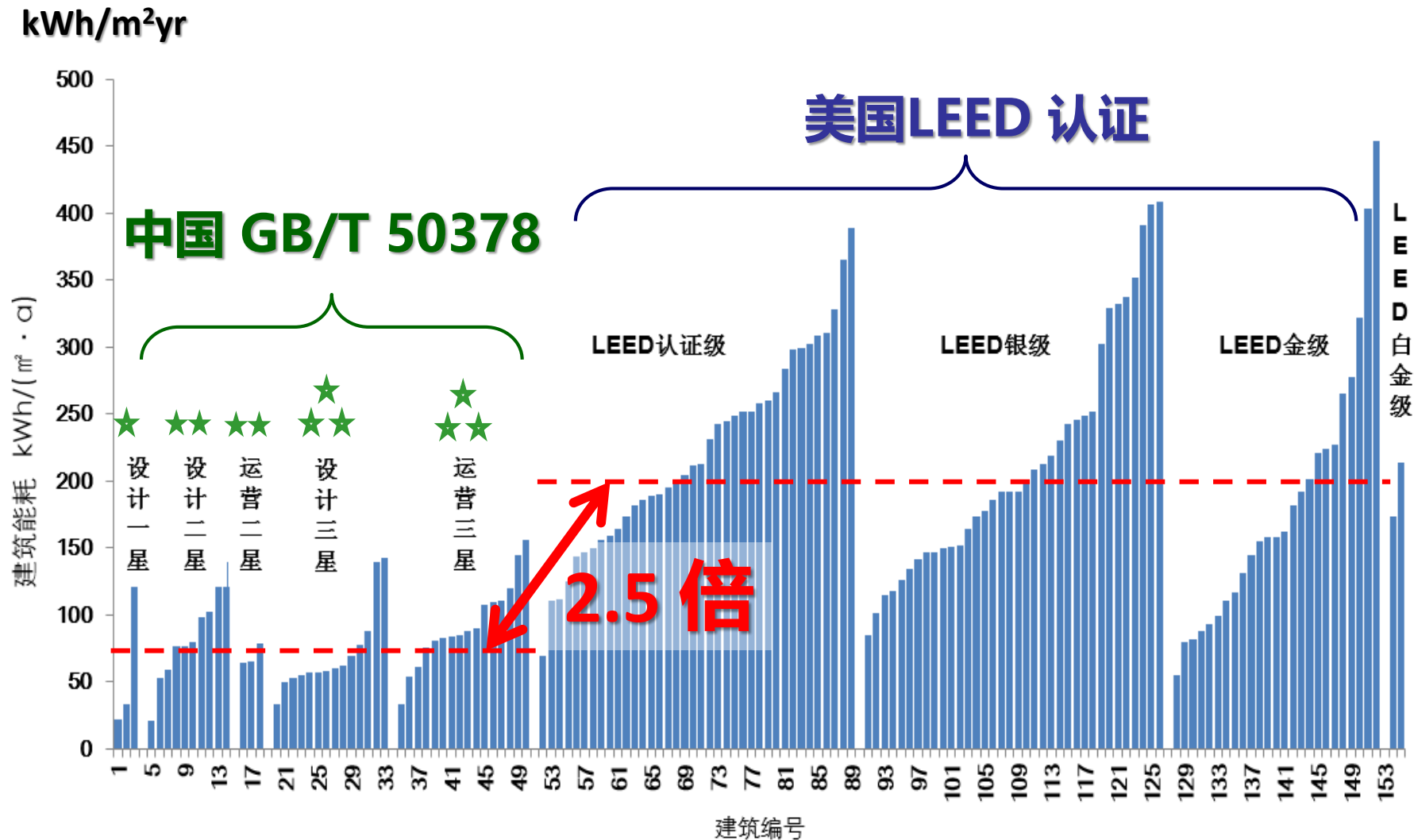
1. 关于建筑能耗

世界各国建筑能耗比较

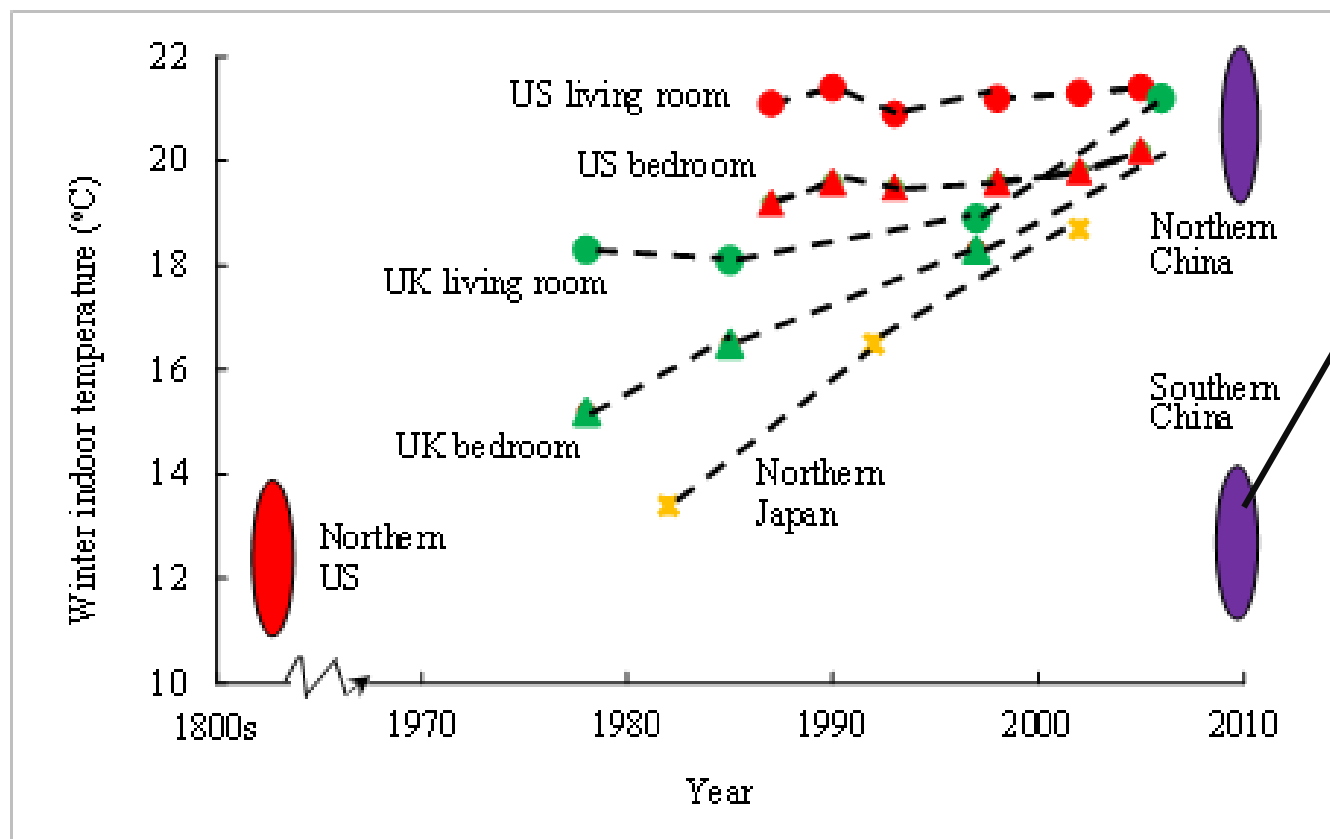


(1) D&R International, Ltd. 2010 Buildings Energy Data Book; (2) Eurostat;
(3) The Energy Data and Modeling Center, Handbook of Energy & Economic Statistics in Japan. 2011

中国绿标建筑 vs. LEED 认证建筑



各国住宅冬季室内采暖温度的变迁历史



Maohui Luo, Richard de Dear, et al. The dynamics of thermal comfort expectations: The problem, challenge and implication. Building and Environment. 95(2016): 322-329

我们的供暖空调未来要走向何方？

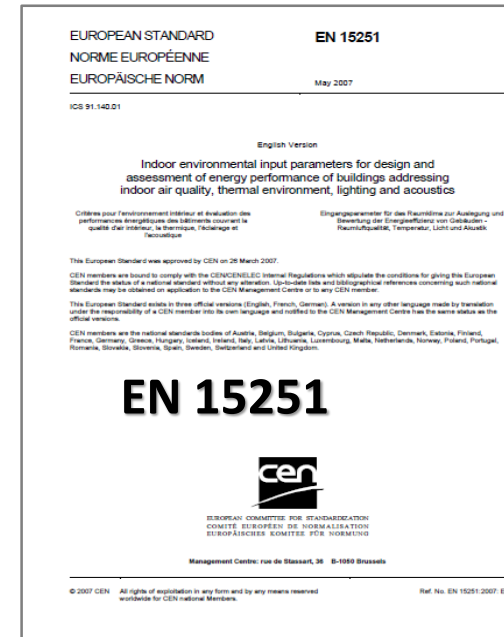
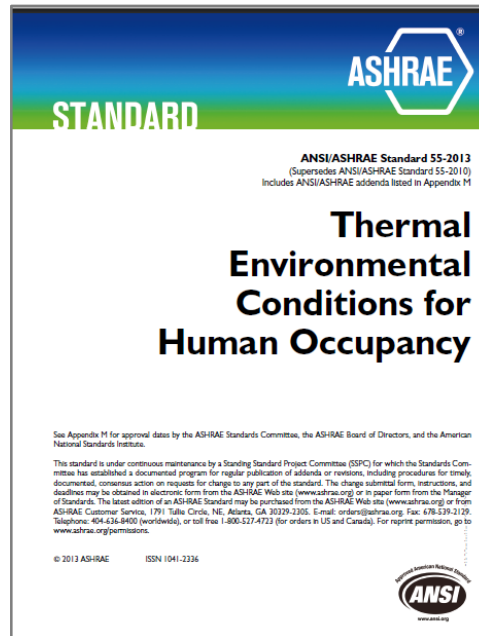
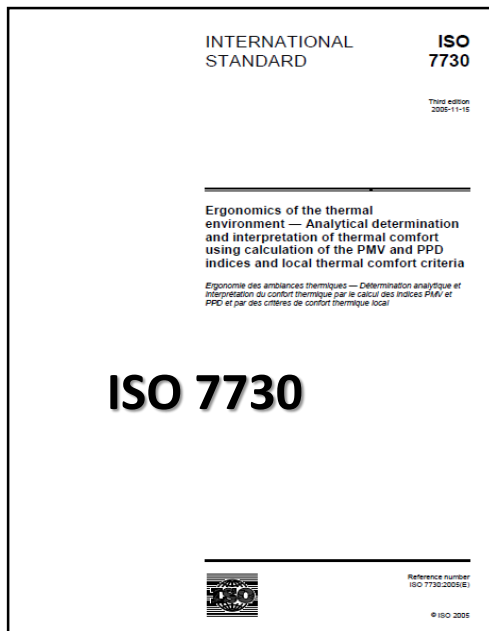
- 室内热环境，怎么样才算够舒适？



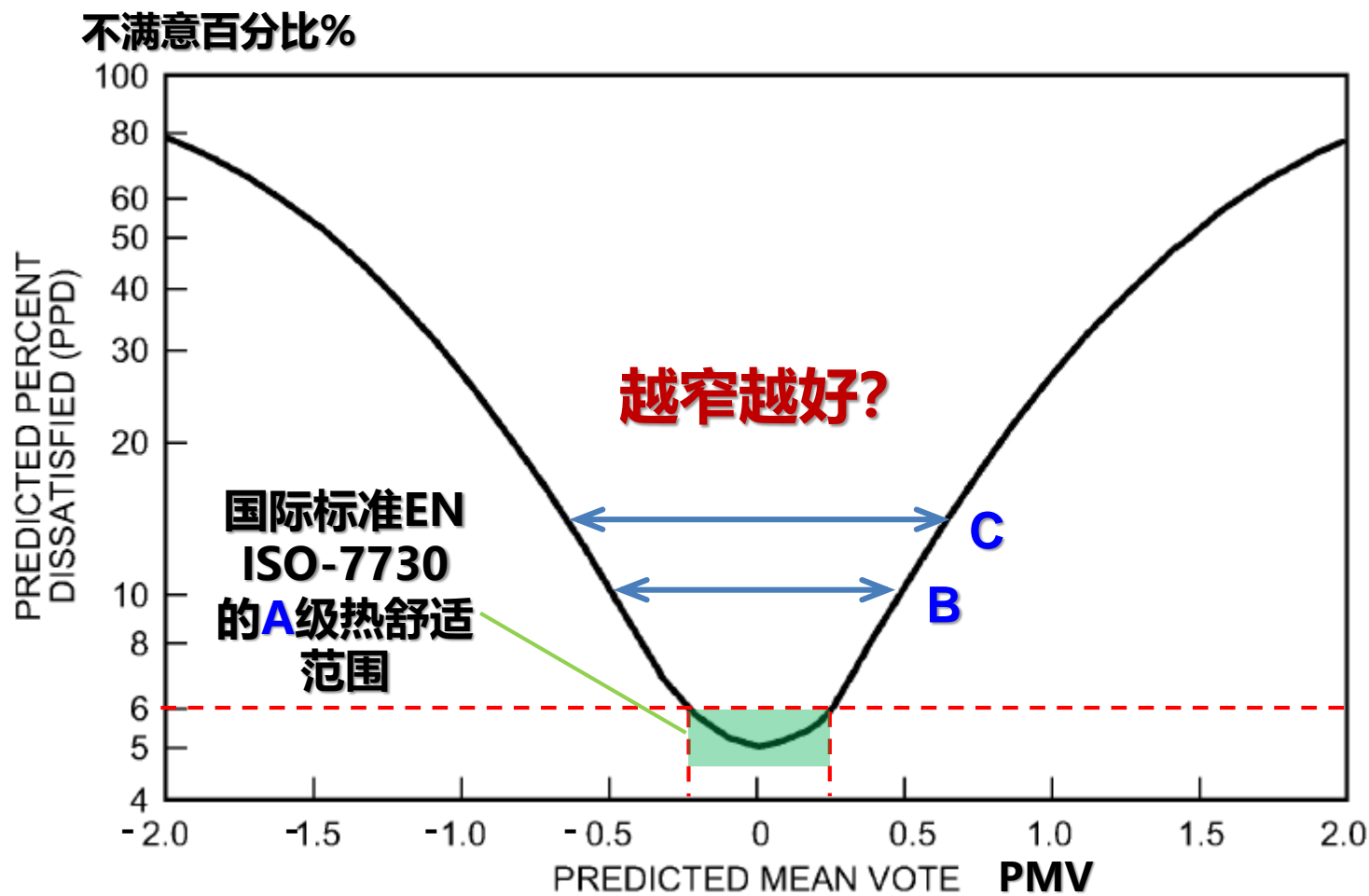
2. 热舒适

热舒适该怎么衡量？

- 当前世界各国空调建筑的室内热环境标准都基于均匀稳态热环境导出的PMV-PPD模型。舒适范围是很窄的。
- EN ISO 7730
 - A级, $-0.2 < PMV < +0.2$, $24.5 \pm 1.0^\circ\text{C}$
 - B级, $-0.5 < PMV < +0.5$, $24.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$
 - C级, $-0.7 < PMV < +0.7$, $24.5 \pm 2.5^\circ\text{C}$



Fanger 教授的 PMV-PPD 指标

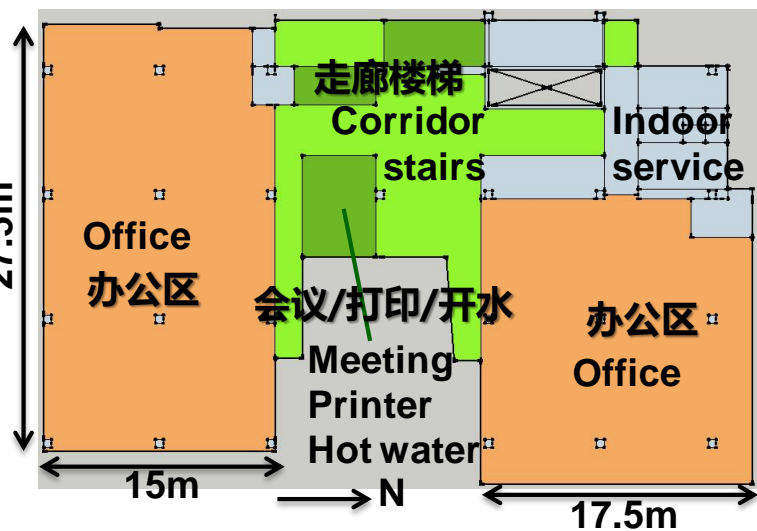


在海南省和东南亚非常普 遍的酒店公共区设计

没有空调，宾客们却感到很舒适



Mix-mode 办公楼



室外平台



深圳建科院大楼
绿色建筑运行三星标识

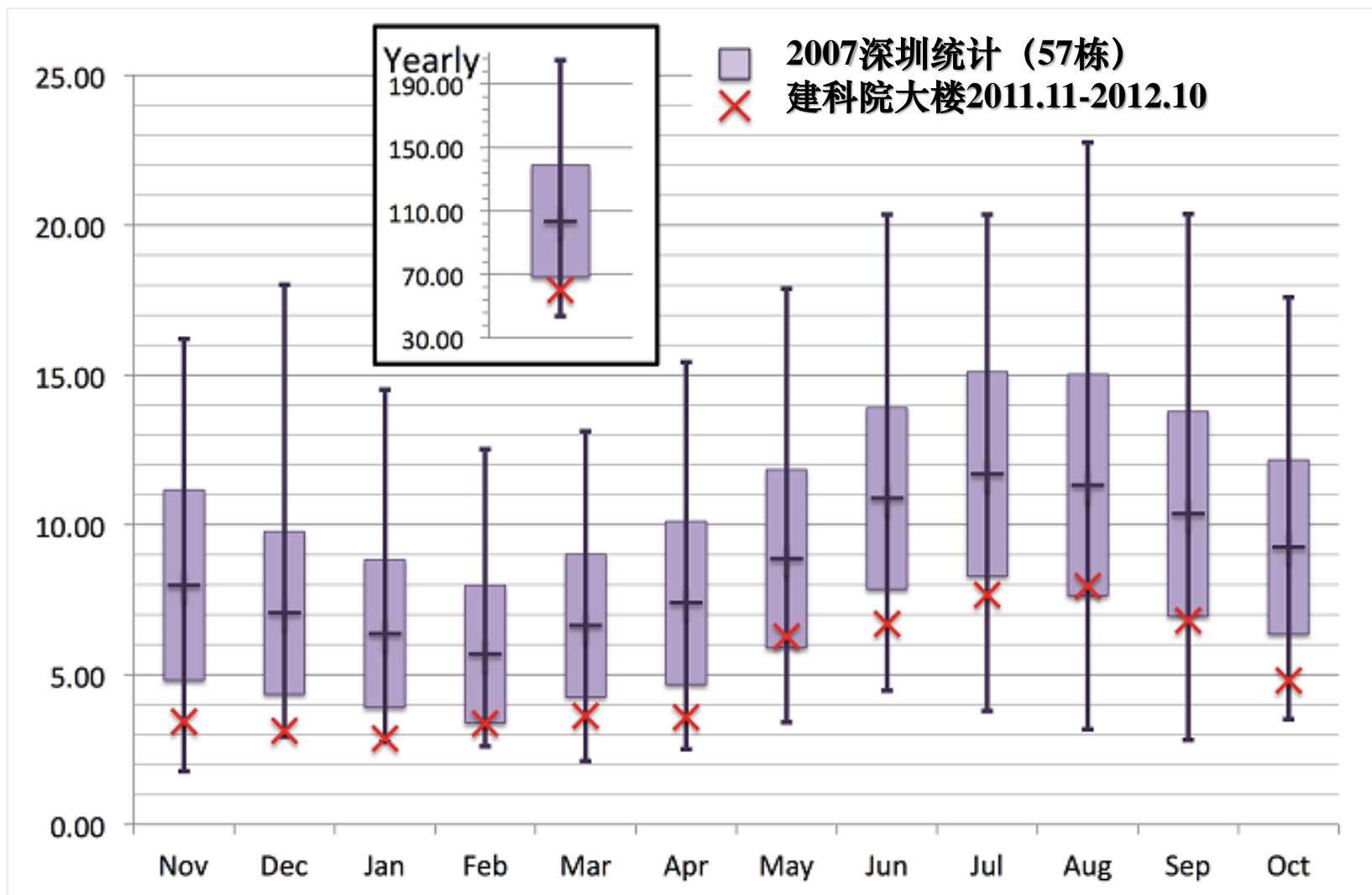
会议厅

六层室外花园

茶水间



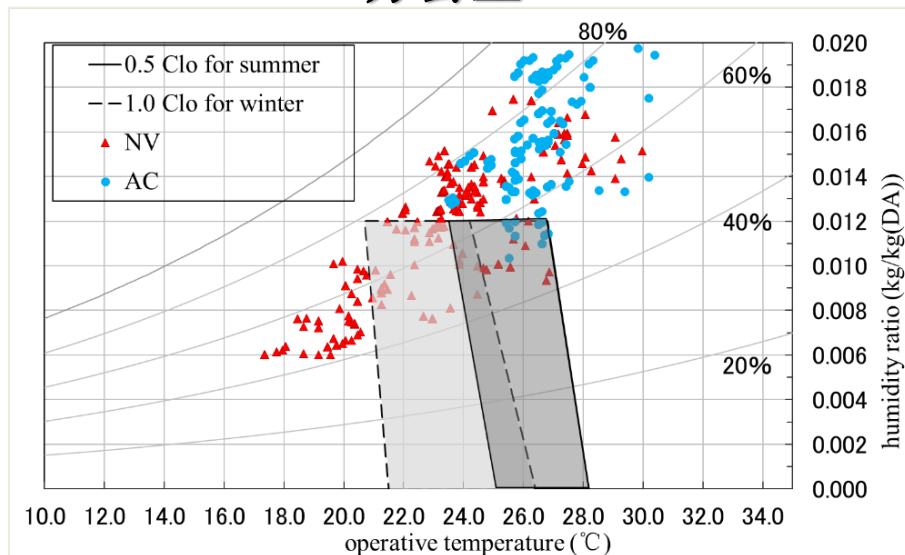
同类办公楼单位面积电耗比较



能耗仅为60%，人们会不会感到不舒服？

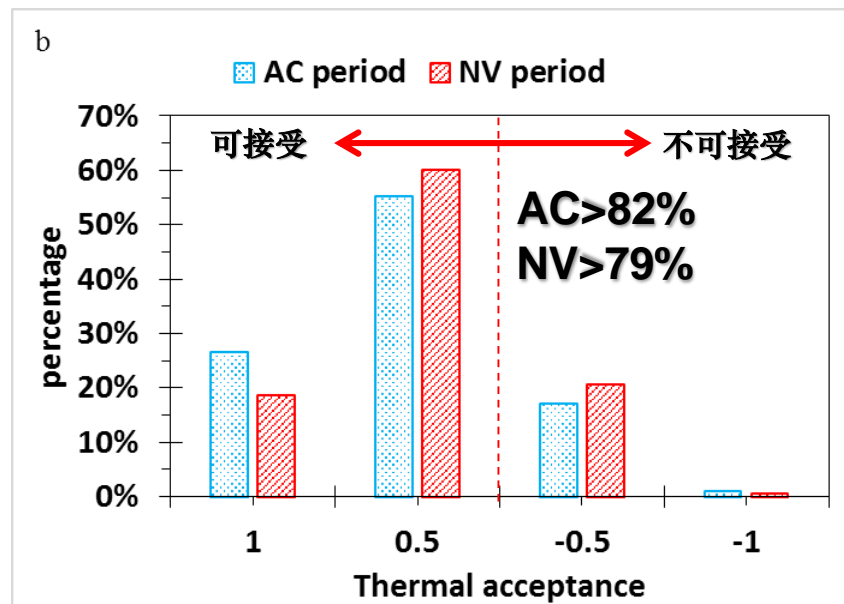
办公室热环境参数绝大部分都在 ASHRAE舒适区之外，但人们的接受度都很高，感到满意

办公室



超过90% 的空调环境参数
都在ASHRAE舒适区之外

⇒ 无论通风还是空调期间，
都有80%的室内人员感到满意



300座会议室，墙可以全打开



2013年11月11日，8:40—10:00，满员，仅自然通风，人们均感到舒适

室外：24.6℃

室内：26.3~27.4℃

相对湿度：73~84%

满意率：81%

室外平台

人们喜欢在平台上开小组会

实测温度29~30.5°C

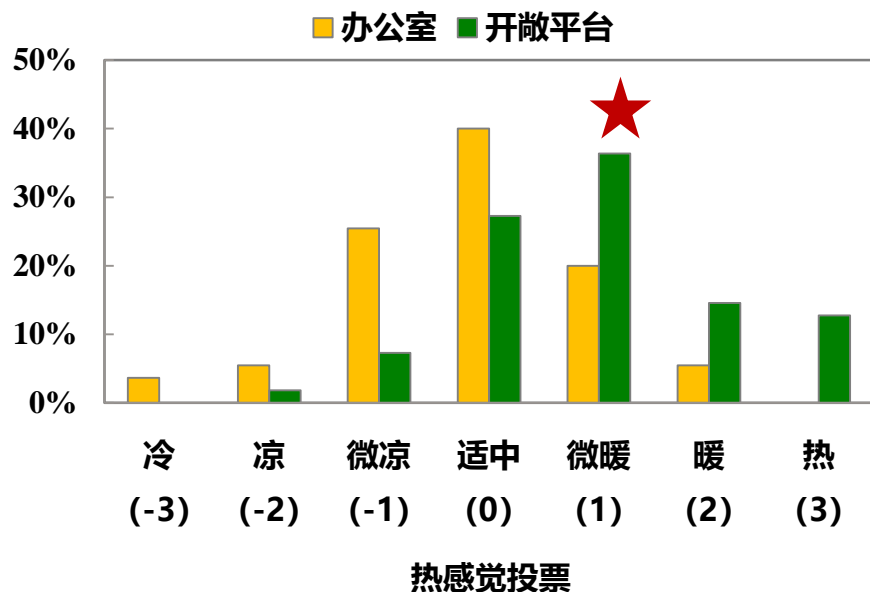
相对湿度66%~77%

风速0.5~0.6m/s

PMV=0.66~0.81

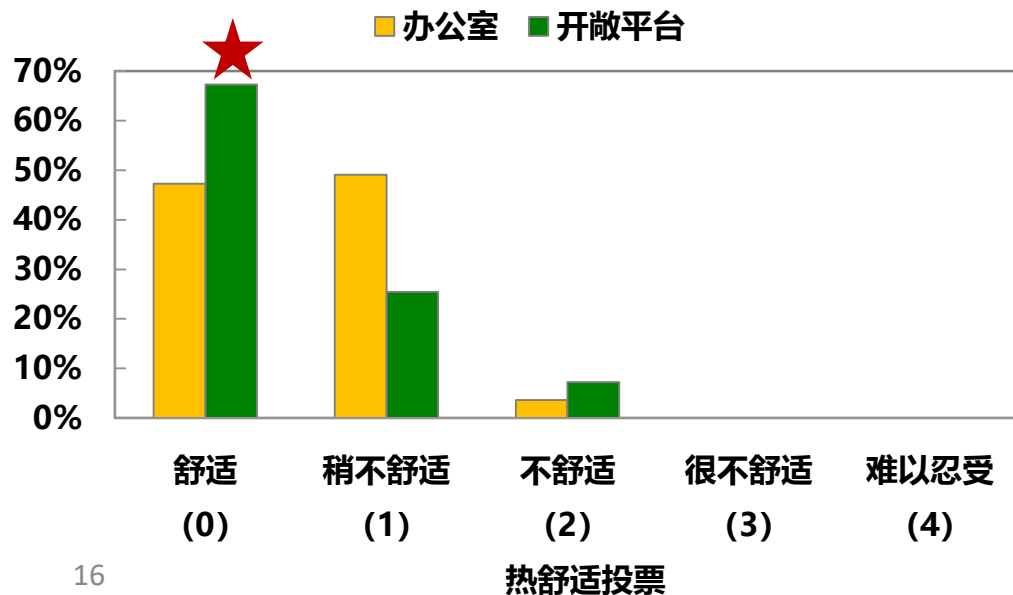


室外平台有点热，但是更舒适

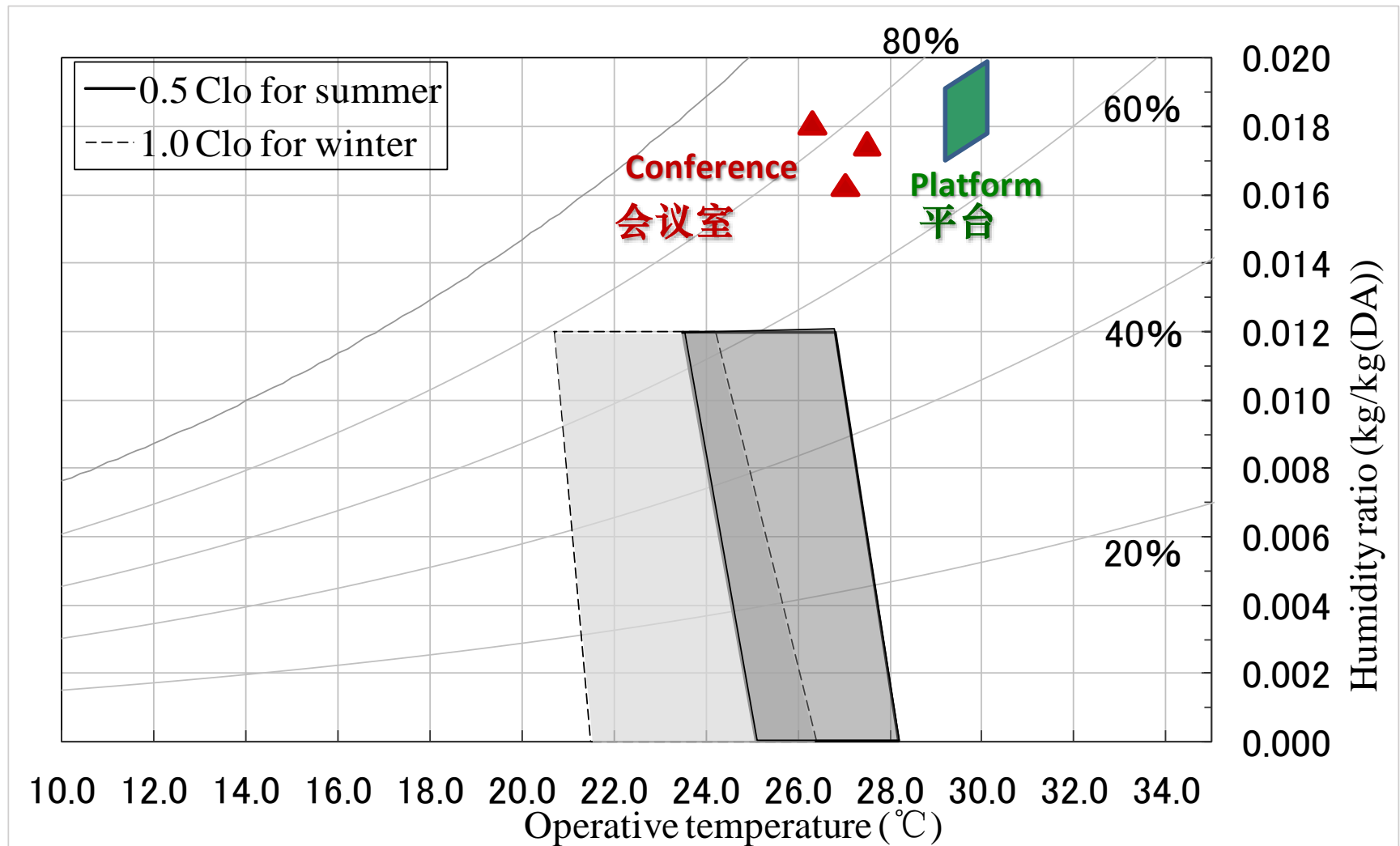


热感觉投票TSV
平台: **69%** 接受度

热舒适投票TCV
平台: **93%** 接受度



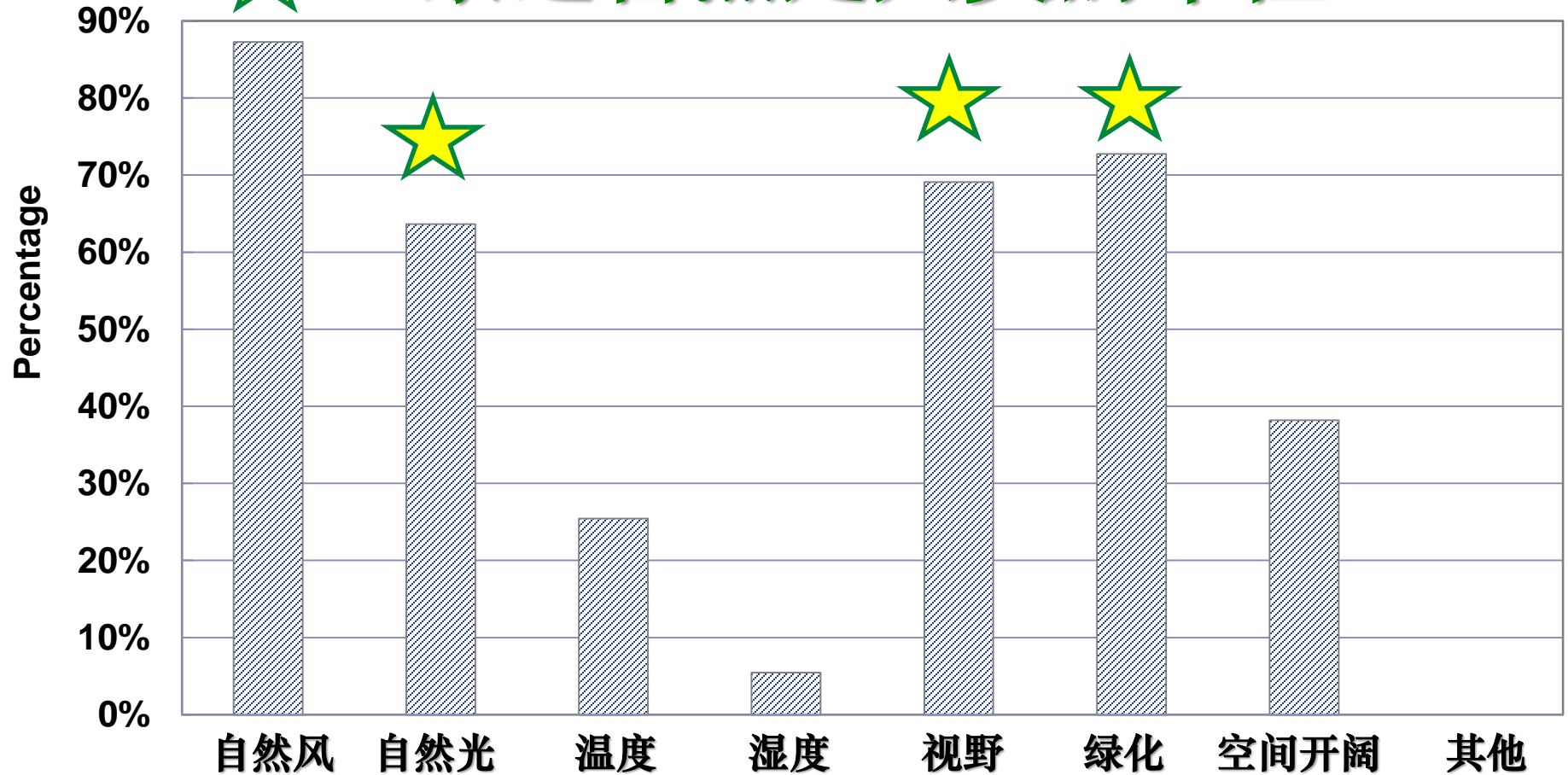
热环境参数都远离 ASHRAE舒适区，但人们的接受度都很高，感到满意



为什么人们喜欢呆在室外平台?

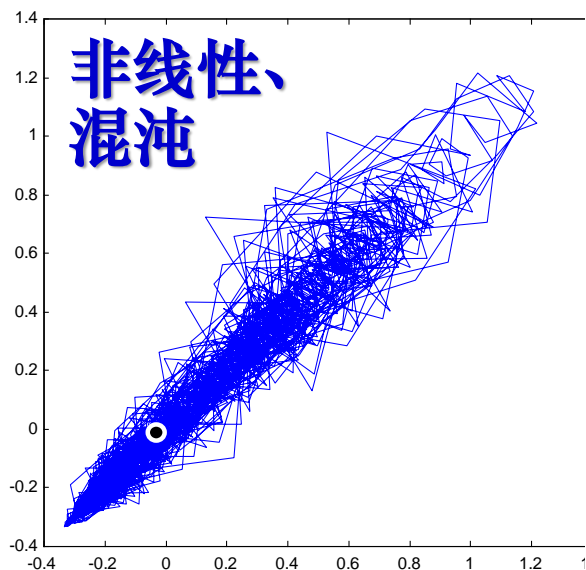


亲近自然是人类的本性

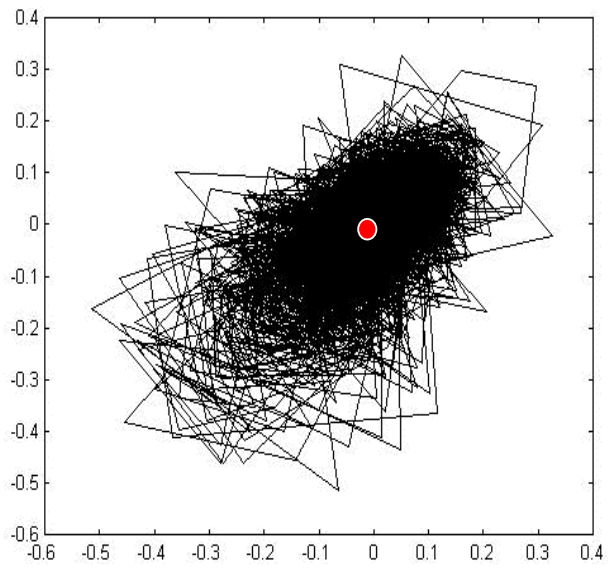


为什么人们更喜欢自然风?

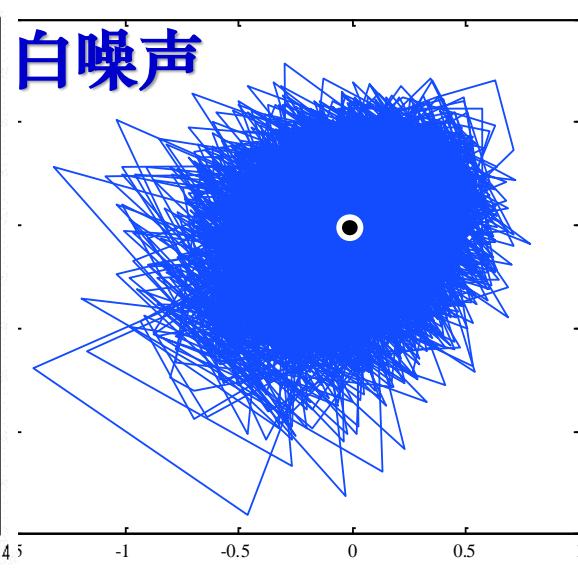
分形分析：风速序列2-D 相空间重构图



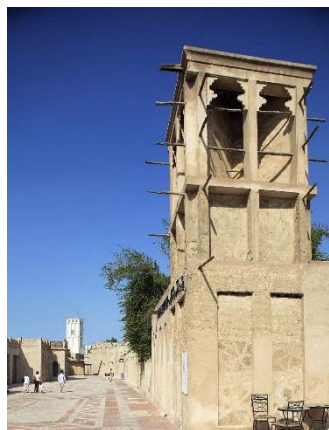
自然风



热压对流



机械风



80% 满意率会不会太低?

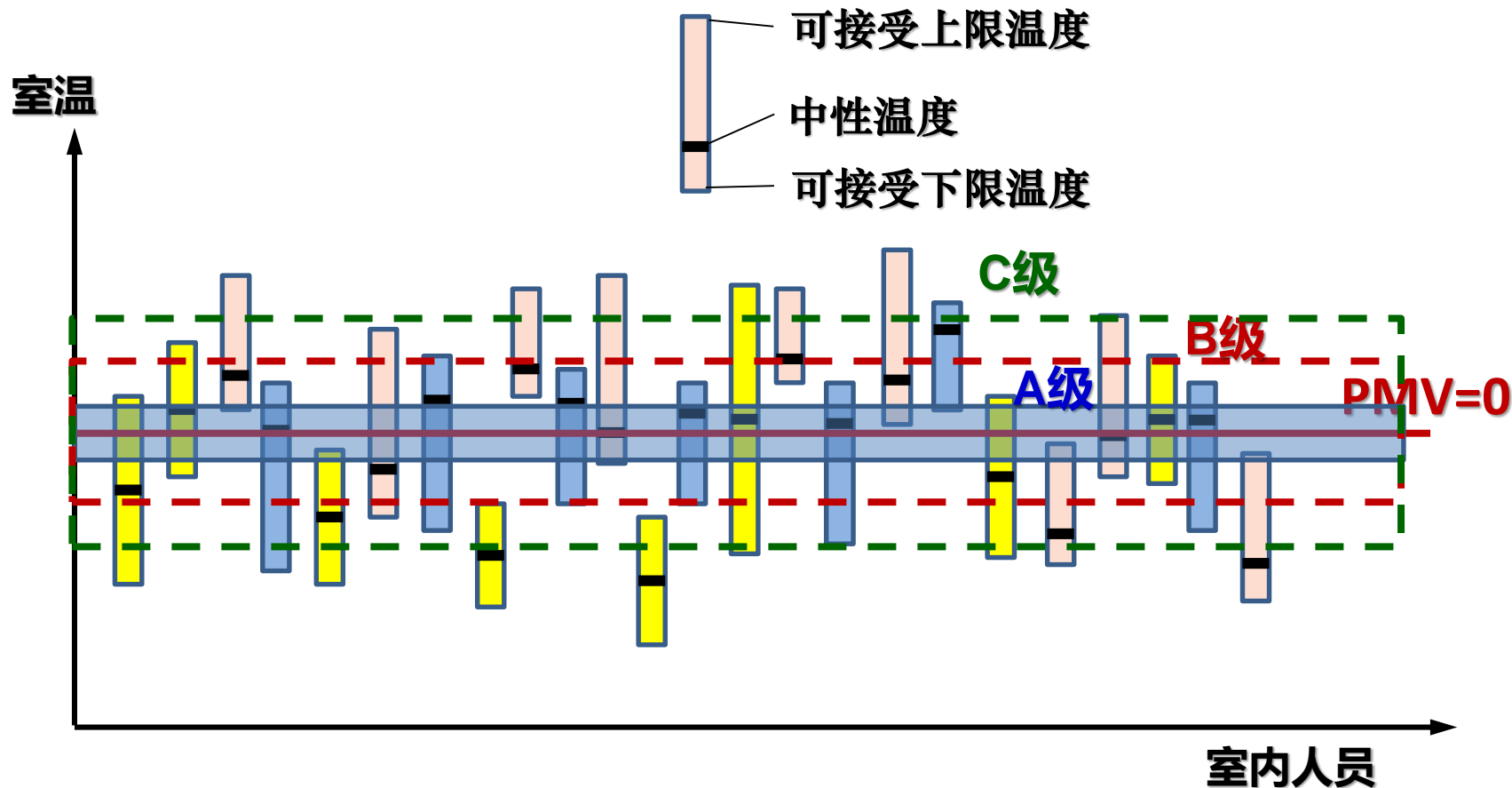
美国ASHRAE赞助的一项对不同ISO设计等级办公室的实际满意率调查

Class A、B、C：调查所得满意率完全没有显著性区别！但成本相差很远。

办公室 ISO-7730 等级	预测满意率 (100% - PPD)	Townsville 澳大利亚 热湿季节	Townsville 澳大利亚 温干季节	Kalgoorlie 澳大利亚 干热季节	Kalgoorlie 澳大利亚 温干季节
A 级 24.5±1℃	>94%	80%	77%	84 %	84%
B 级 24.5±1.5℃	>90%	78%	79%	86 %	83%
C 级 24.5±2.5℃	>85%	78%	77%	86 %	84%

Ed Arens, Humphreys, R. de Dear & Zhang : Are 'class A' temperature requirements realistic or desirable? Building and Environment, V 45(1), 4-10, 2010

为什么我们非要把PMV控制在很窄的范围内？



更窄的热环境范围就能让更多的人感到舒适吗？

争端频生，怎么办？



3. 关于健康

关于空调 vs.健康的流行病学调查

- 2000年及2001年夏季，中国疾控中心分别在江苏省及上海市进行“使用空调对健康影响”的流行病学调查

- 方法

2595 个调查
样本分为 4组

- | |
|--------------|
| 1. 家里办公室都空调 |
| 2. 仅办公室空调 |
| 3. 仅家里空调 |
| 4. 家里单位都没有空调 |

不适症状的
发生部位：

神经系统

消化系统

呼吸系统

皮肤

黏膜

- 结果

- 各种不适症状的发生与使用空调有关，特别明显地表现在暑期“伤风/咳嗽/流鼻涕”的发病率上；
- 不适症状的发生率：**1.全空调组 > 4.无空调组**，特别是神经和精神类不适感最为显著；
- 缺乏热适应经历的人群在注意力、反应速度、视觉记忆和抽象思维方面均表现较差。

基本理念：舒适~~≠~~健康！



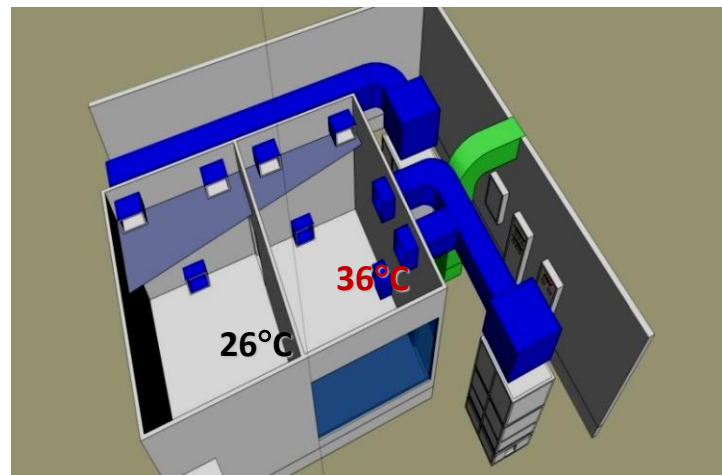
但是我依然需要锻炼！



如何证明“舒适≠健康”？

- 两组受试者，均在北京生活两年以上

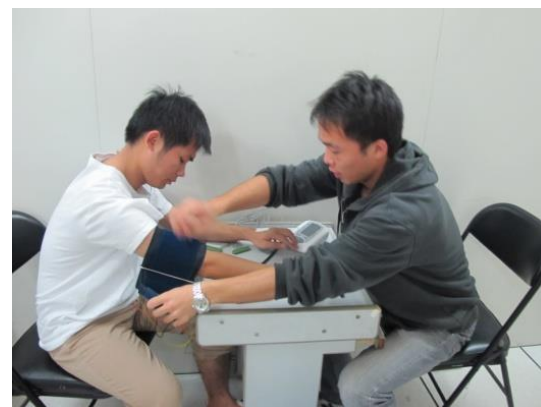
- **非空调组** 一男性10人，年龄20-30，家庭与工作环境无空调，或者每天在空调环境中逗留不超过2小时
- **空调组** 一男性10人，年龄20-30，家庭与工作环境均开空调



人工气候室实验 26°C 1小时 ⇒ 36°C 1小时

- 生理测量

- 皮温
- 心率
- 血压
- 体重 (出汗率)
- 血样



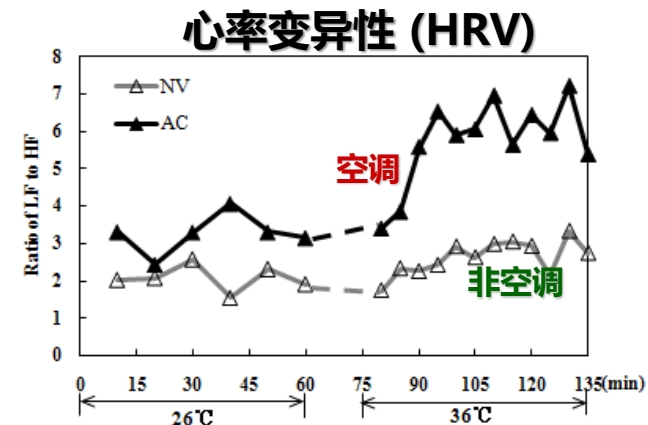
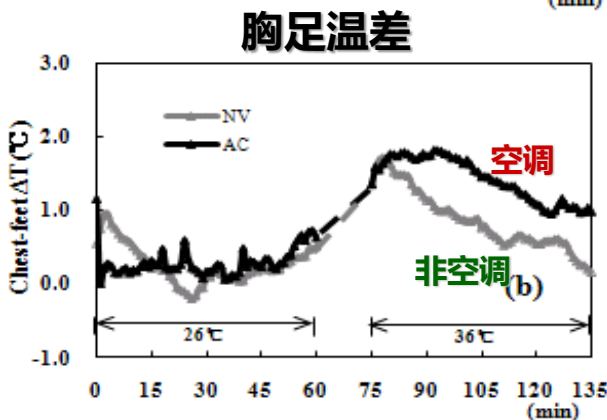
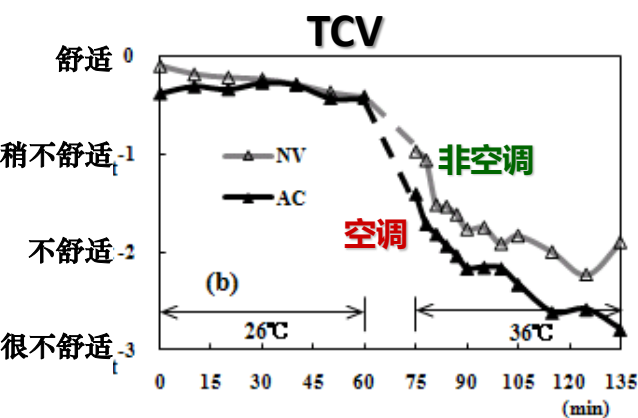
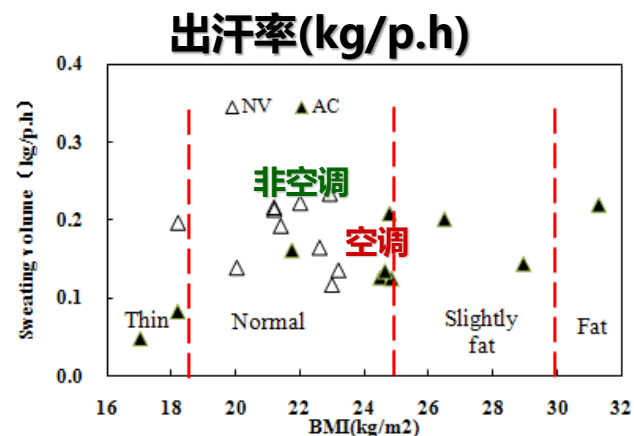
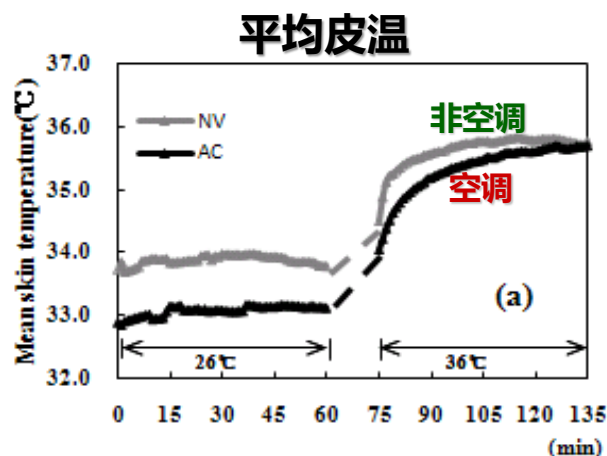
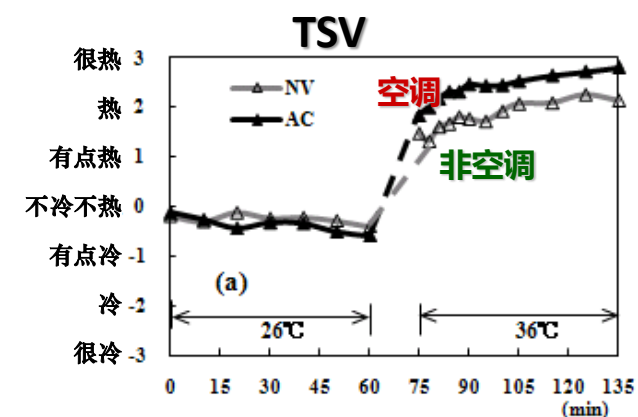
实验结果

36°C环境下，**空调组**体现了

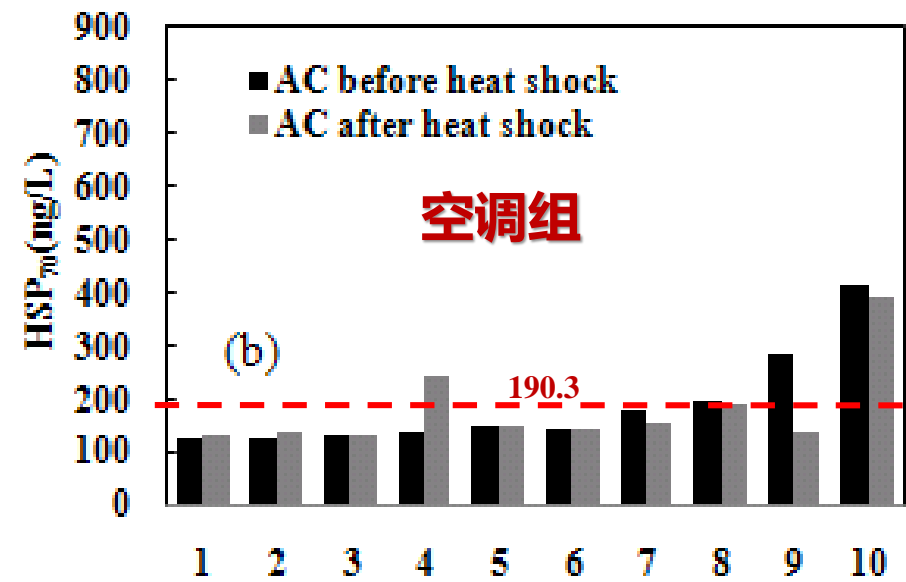
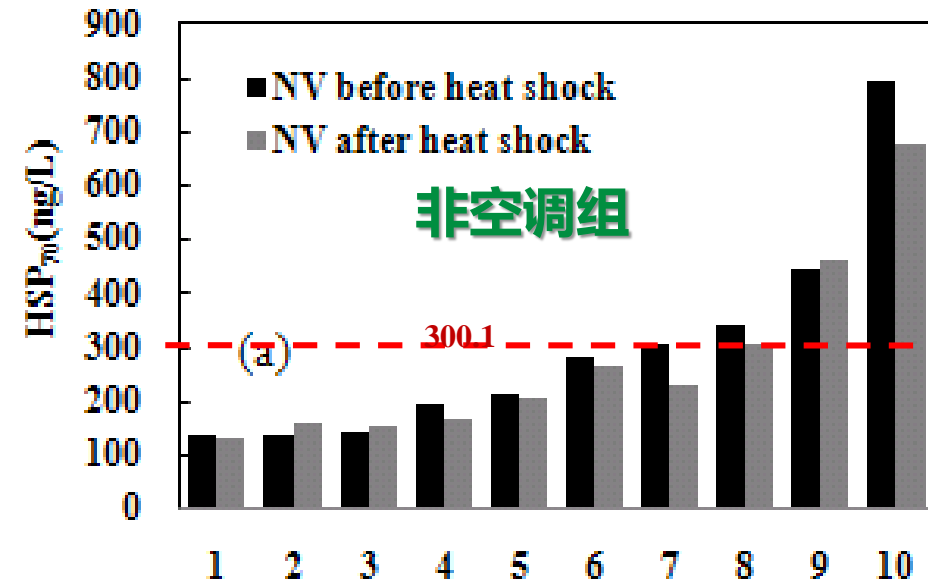
感觉更热和更不舒适

皮温响应较慢，胸足温差较大 (热调节能力较差)

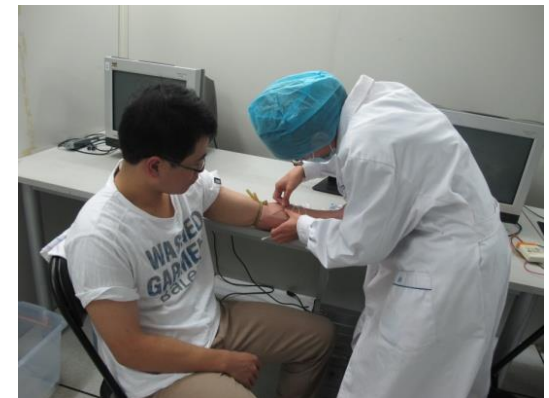
较低的出汗率，较高的心率变异性——反映交感神经紧张程度高



HSP₇₀ (热应激蛋白70) HSP₇₀ 高表示热适应能力强



- 血液中的热应激蛋白 HSP₇₀:
非空调组 > 空调组
- 结论: 长时间逗留在恒温环境会导致人体的热应激能力退化



Juan Yu, Qin Ouyang, Yingxin Zhu, Henggen Shen, Guoguang Cao, Weilin Cui, A Comparison of the Thermal Adaptability of People Accustomed to Air Conditioned Environments and Naturally Ventilated Environments, *Indoor Air*, 2012; 22: 110–118

**经常暴露在偏热环境有益于健康，偏冷
暴露又会有什么影响呢？**

不同气候区的人的冬季室内采暖舒适温度有显著差别



经常开到
15℃以下



Juan Yu, Guoguang Cao, Weili Cui, Qin Ouyang, Yingxin Zhu, People who live in a cold climate: thermal adaptation differences based on availability of heating, *Indoor Air*, 2013; 23: 303–310



北京与上海人群热反应实验结果的区别

分别在上海和北京进行了人工气候室的实验

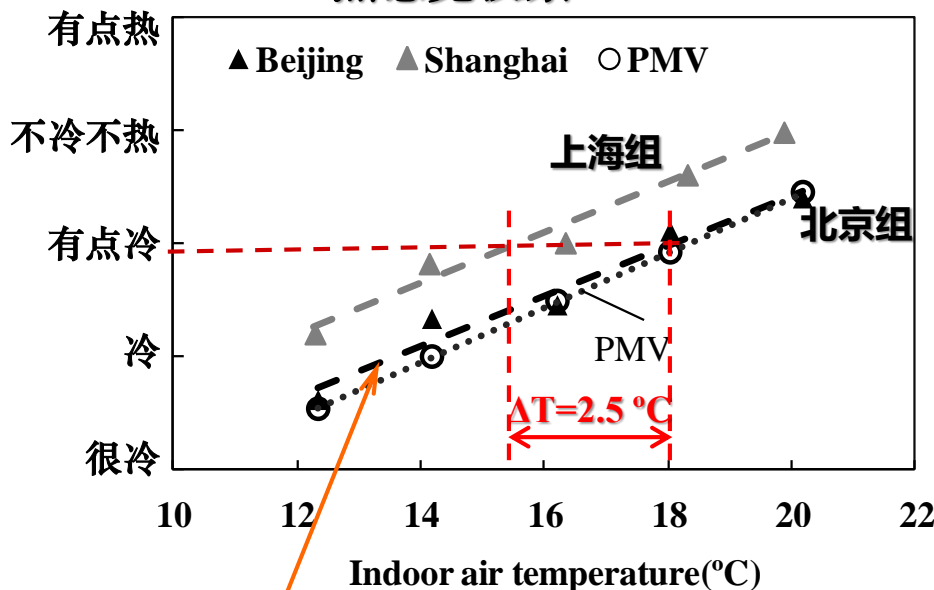
北京组：男性31人，年龄20-26岁

上海组：男性26人，年龄20-26岁

统一服装：棉质秋衣秋裤、厚毛衫、长裤、棉袜和拖鞋，1.1clo

结果：北京组在18°C时热感觉与上海组15.5°C时一样。

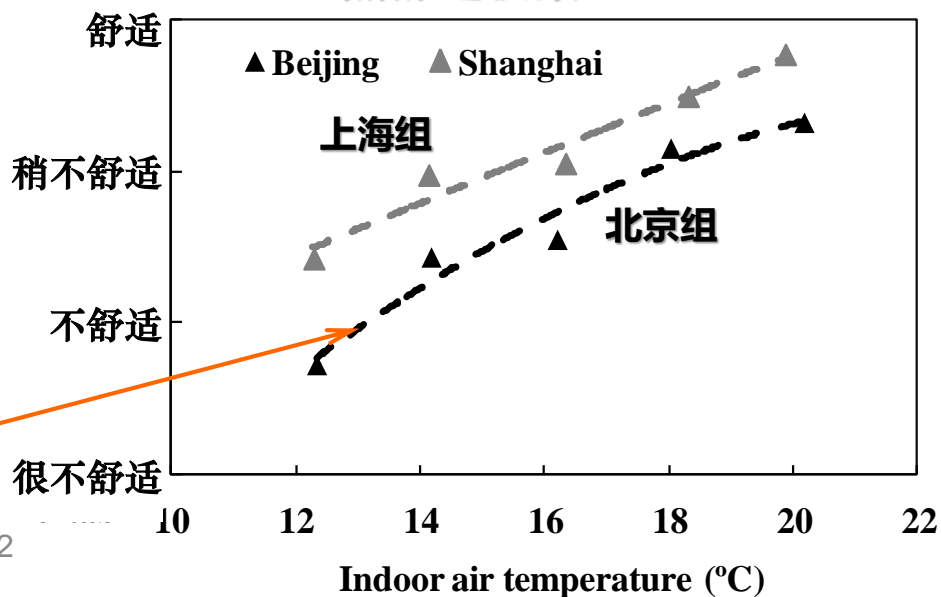
热感觉投票 TSV



相比上海组，
北京组感觉更冷

北京组觉得
更不舒服

热舒适投票 TCV

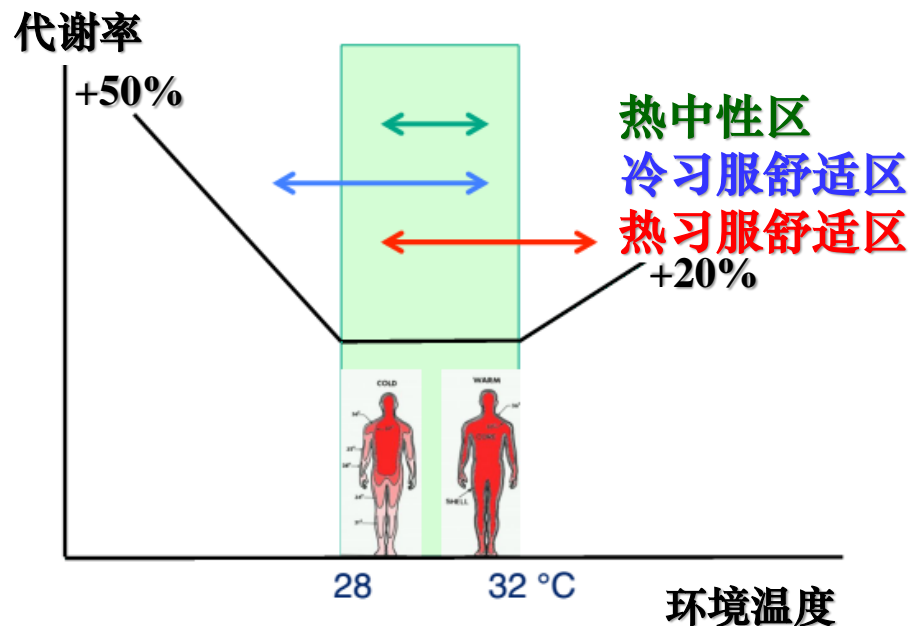


上海冬季室内偏冷的温度对健康有何影响？

Wouter van Marken Lichtenbel 教授

To Comfort or not to Comfort?

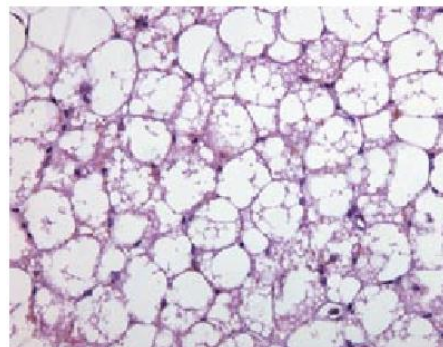
在荷兰埃因霍温Healthy Building Europe 2015
国际会议上的大会主旨报告



舒适：使得人体节省能量
轻微不舒适：可刺激代谢率增加

褐色脂肪

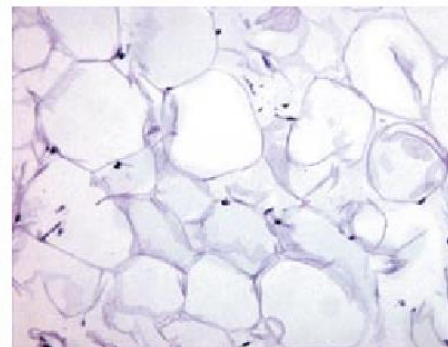
Brown Adipose Tissue



促进白色脂肪分解产热

白色脂肪

White Adipose Tissue

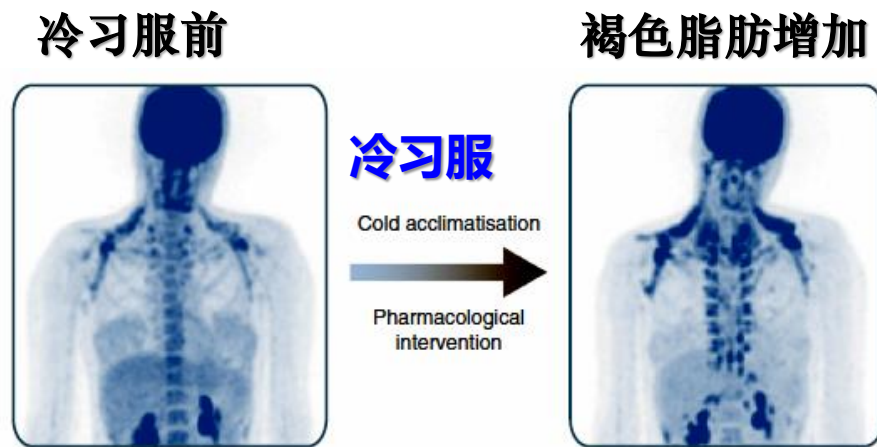
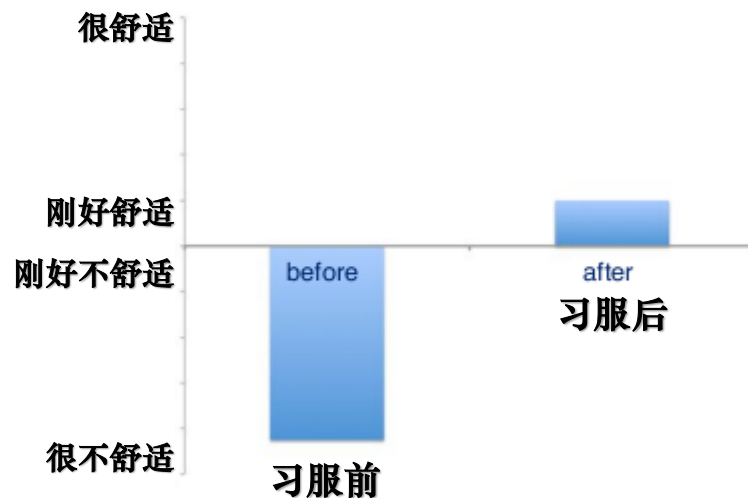


导致肥胖

论文引出源： *The future of brown adipose tissues in the treatment of type 2 diabetes*, *Diabetologia*, 2015, 58 (8) :1704-1707e

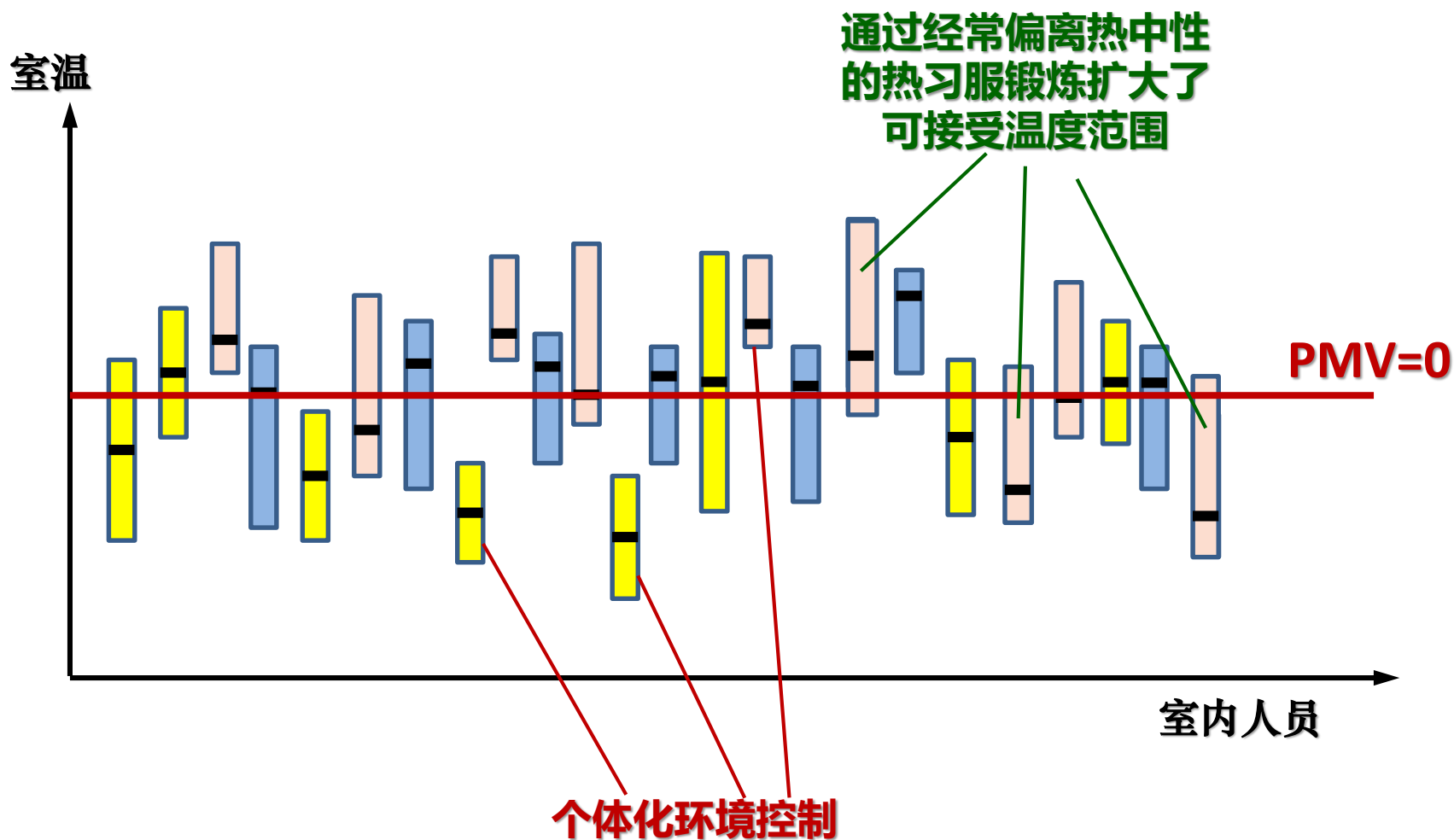
偏冷暴露实验 (无冷颤代谢补偿)

- 环境温度14-15°C，每天暴露6小时，暴露10天
- 所有受试者对冷环境的舒适感都提高了
- 偏瘦体型的年轻人 (9 女 8男)
 - 体内褐色脂肪增加
 - 身体产热量增加
- 8位男性II型糖尿病患者
 - 血液中的胰岛素敏感性显著增加
- **Lichtenbel: 人类需要锻炼我们的热调节系统，并作为我们的健康生活方式的一部分，这样就能增强我们对极端天气条件的适应力。**



4. 解决的途径

如何解决个性化需求?



观点

营造什么样的室内环境才算是好的环境？

- **应该维持一定的冷热变化**

- 必要的热环境刺激有利于锻炼人体的热调节系统，扩展可接受的热环境范围 (2016年的发言)
- 舒适的存在是以变化为前提的

- **采用个体热舒适调节系统(PCS)**

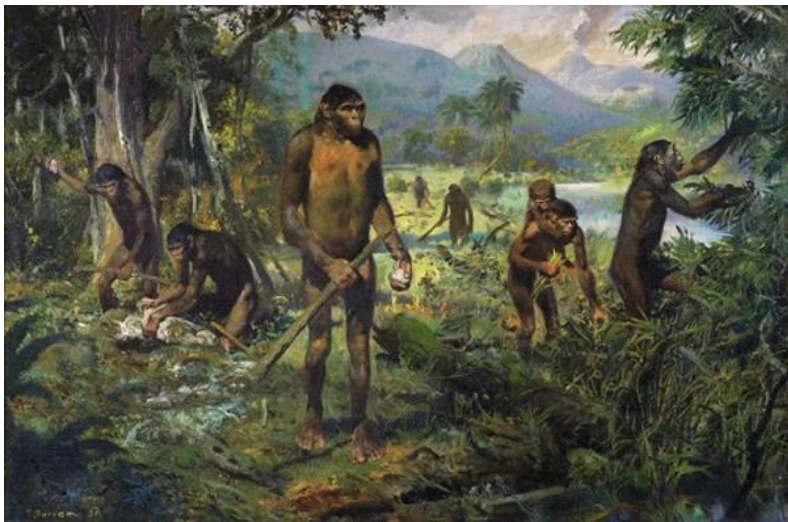
- 只有这样才能真正满足人们的个性化需求，提高室内环境质量

个体化热环境控制其实是人类最早的热环境营造概念

第一层的服装为第二层建筑环境的营造提供了很大的自由度！

高纬度地区

热带雨林



第一层热环境调节手段：服装



第二层热环境调节手段：建筑

我们能否进一步提高第一层手段的能力，从而扩展第二层建筑环境营造的自由度？

传统的个性化控制设备，日本的Kotatsu

可接受环境温度很低：8~14℃

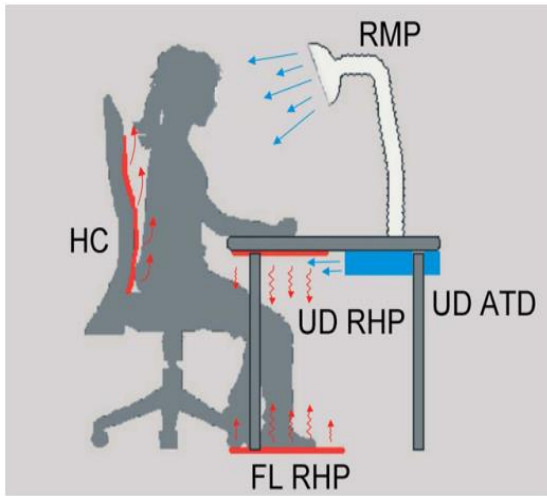
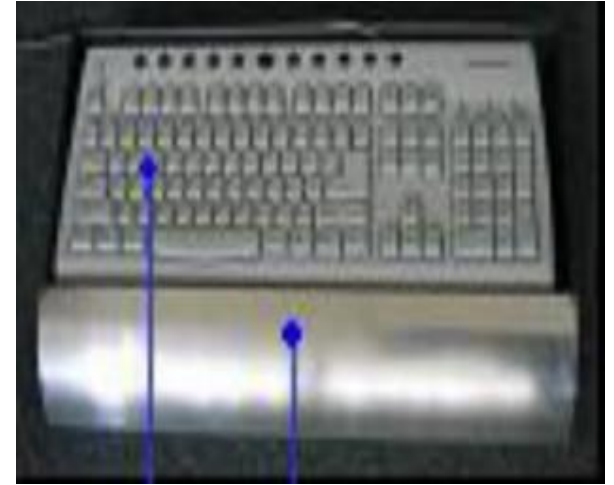
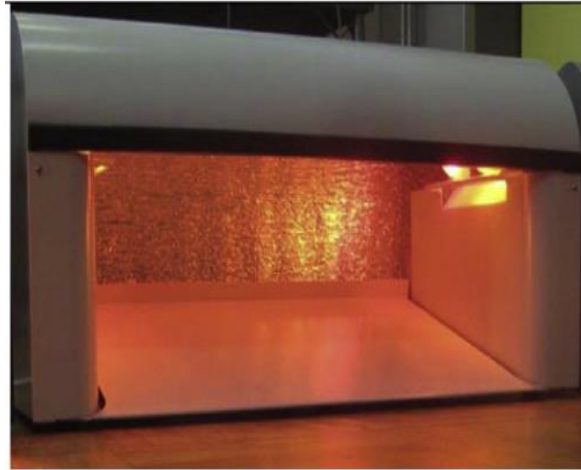
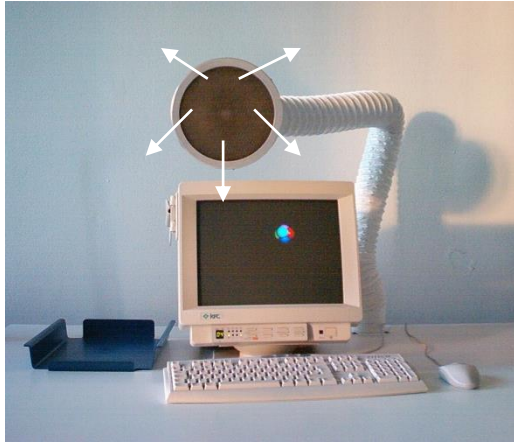


薄型だから足元スツキリ、コタツ内も広々♪



温暖的「こたつ」

新的个性化热环境控制设备



P. O. Fanger



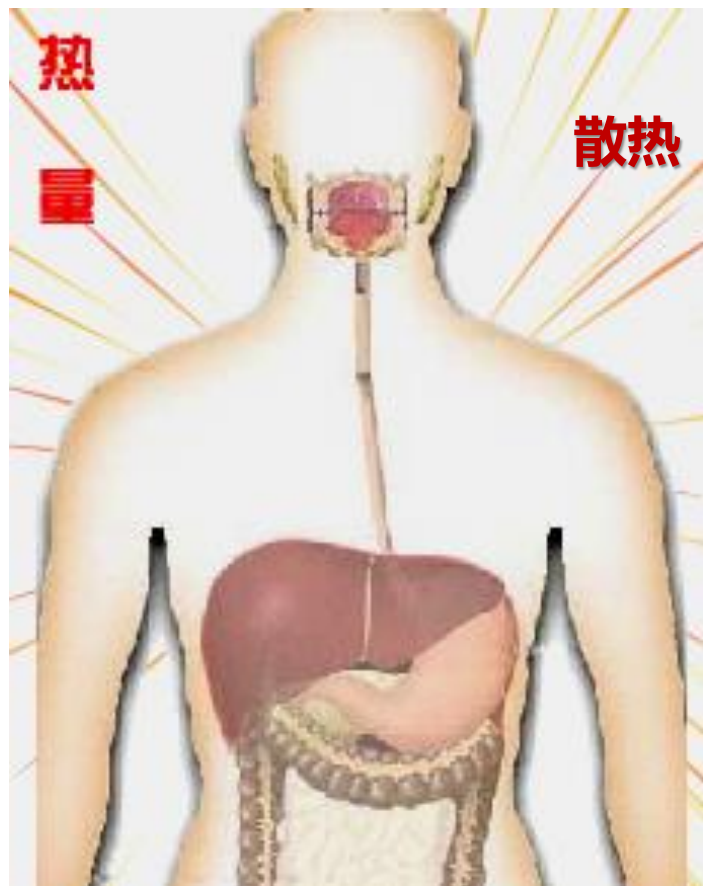
UCB, Ed. Arens & Hui Zhang



热环境营造的关键基础问题

- 我们真的需要 space heating 和 space cooling 吗?
 - 不，我们只需要保持我们的身体处于热舒适
- 加热和冷却我们的身体都是必要的吗?
 - 不，我们只需要冷却我们的身体(body cooling)

身体散热/身体冷却：是保证人正常生存的需要

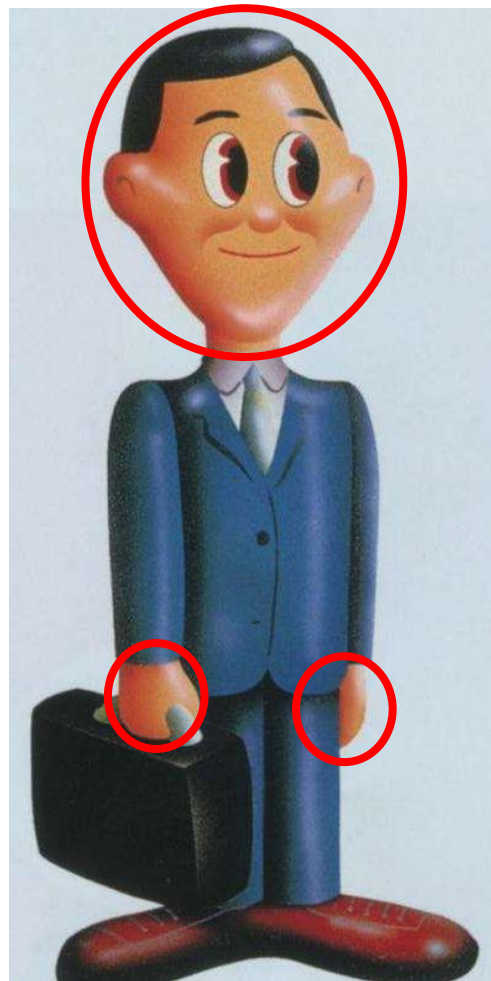


但我们为什么还是需要供暖？

供暖的目的是——

防止人体过度冷却！

防止过度冷却的方法



- 采用足够高的服装热阻
 - 理论上可以达到完全绝热，但是活动不方便
- 终极解决办法
 - 发展新型服装材料，使得高热阻的服装又能足够轻便
 - 为脸、头、呼吸道和手维持**可接受的环境温度**——建筑围护结构保温与供暖的任务



如果轻便的服装也可以达到.....



- 如果身体整体处于热中性的话，环境温度 **12.9°C** 或 **15.2°C** 对于手、头、脸和呼吸道是合适的吗？
- 对于手和脸来说，可接受的环境温度的下限是多少？
- 围护结构保温达到什么程度才能让室内供暖负荷达到最小？

- 目标：
PMV=-0.2
- 当 $I_{cl}=2.0$ clo 时
 - RH=40%
 - V=0.1m/s
 - M=1.1 met
 - $t_{op}=15.2^{\circ}\text{C}$
- 当 $I_{cl}=2.5$ clo 时
 - $t_{op}=12.9^{\circ}\text{C}$
- 1.1 cm 空气间层加上 low-e 面料 $\Rightarrow 2.0\text{clo}$



关于供热

- 当服装热阻和环境参数不能防止人体过冷时，供热就是必须的了

—— 目标是加热环境



给微环境加热



汽车的椅子加热

—— 目的是为了加热太凉的椅子，不是为了加热人体



短期给身体局部加热以达到整体热中性

什么情况下人体才需要加热?

- 皮肤温度远低于热中性温度——短期处理以快速恢复热中性
- 救援冻僵的人体——并非暖通空调领域的任务



人体降温

- 当服装和环境参数不能保证足够的散热能力为人体降温，就需要额外的人体降温措施



提高环境的冷却能力



传统的接触式人体降温设施
——竹床和席子



人体降温的方法

- 对流、辐射、接触
 - 接触式冷却直接作用于人体，但只能是局部式降温
- 人体局部降温可能面临的问题
 - 人们担心产生健康问题
 - 某些身体局部怕受凉
- 需要解决的基础科学问题
 - 人体降温所需要的最小能耗是多少？
 - 那些部位可以降温，而可接受的温度下限是多少？
 - 如何描述皮肤与接触冷表面的热传递过程？
- 难点
 - 很难找到关于热舒适的接触性传热的研究文献

清华前期的一个接触式局部降温的受试者 实验研究 (27°C相变材料)

实验时间：2 小时

环境参数：

$30 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$, $50 \pm 5\%$

受试者：代谢率1.5 met,
服装0.6clo (PCM之下)

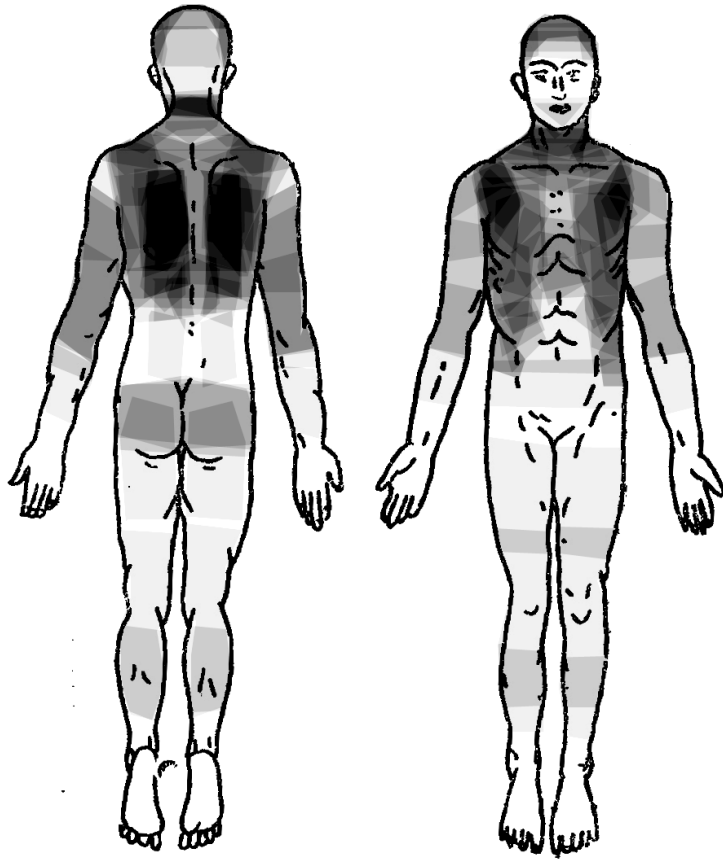


PCM: TH-27

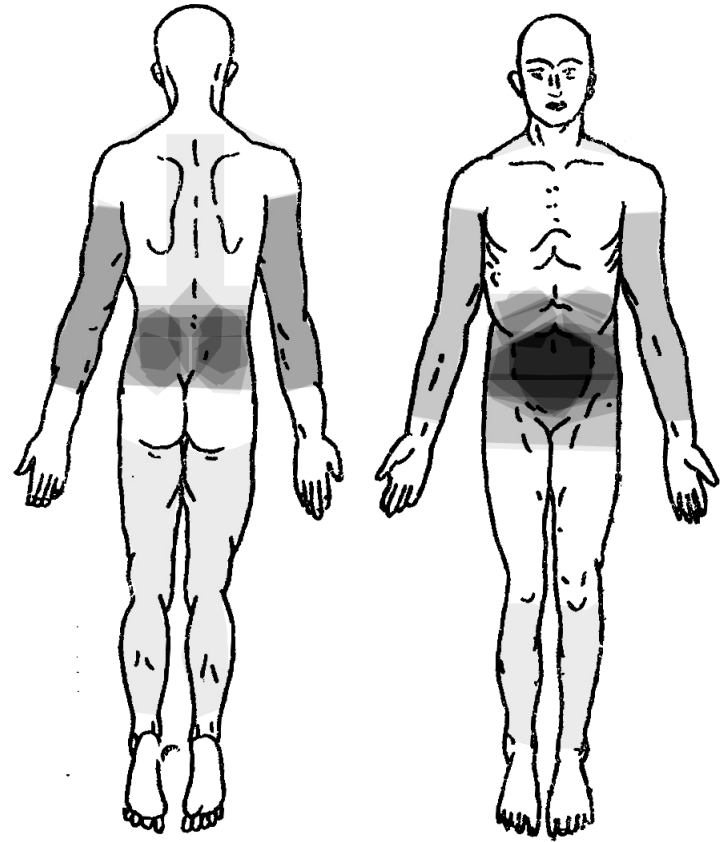


2003 SARS 期间

受试者投票结果



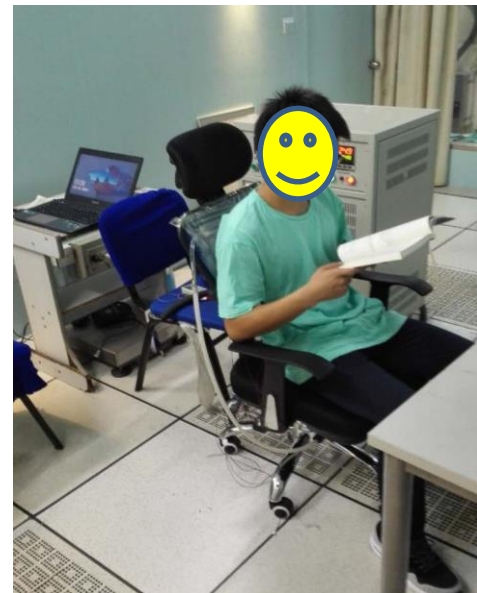
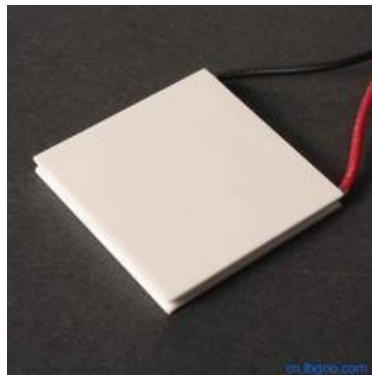
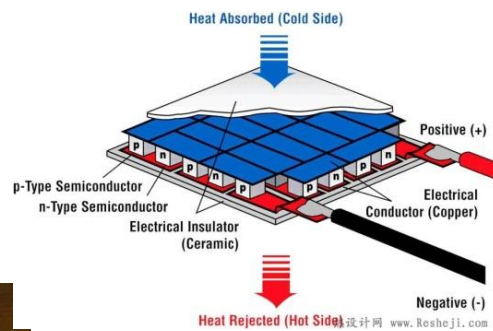
可接受区域



不可接受区域

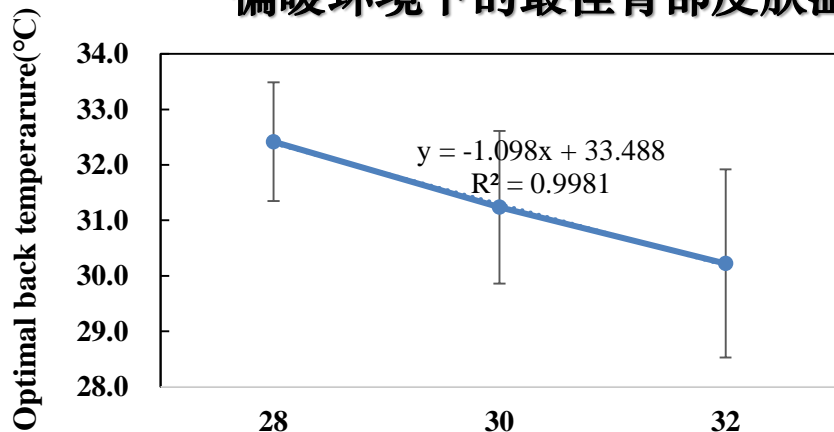
个体冷却座椅研究

- 调节方式：接触式传热
- 可能的冷源方式
 - 半导体制冷
 - 微型压缩机
 - 相变材料
 - 其他新方式.....?



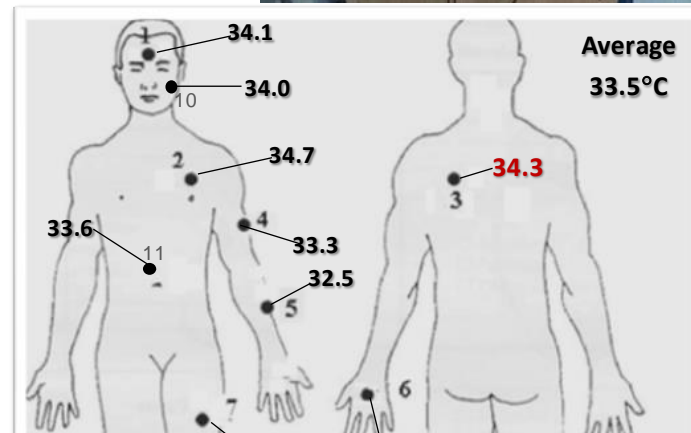
凉椅背的效果与热舒适性

偏暖环境下的最佳背部皮肤温度

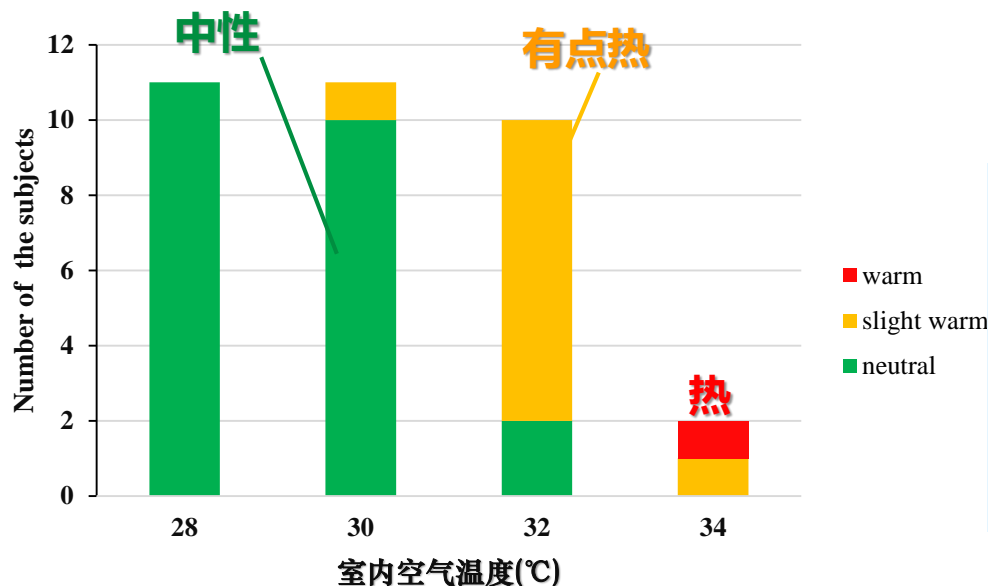


室内空气温度(°C)

背部中性皮肤温度
31.1~32.4°C



受试者对凉椅背的热感觉投票



1. 在偏暖的热环境里，局部皮肤温度可以降到“中性温度”以下，以获得整体热中性感
2. 背部温度比中性温度低3°C是可接受的
3. 接触表面的温度>25°C

热中性皮肤温度 (Giesse & Ranger 1975)

热舒适与热环境控制的发展

传统空调的概念与技术产品

基于PMV的稳态均匀热环境

长波辐射换热

成熟技术

对流换热

新的空调的概念与技术产品

适应性热舒适理论

动态热环境

局部热暴露

理论基础:

物理的

生理的

心理的

(可感知控制力)

短波辐射换热

新的研究方向

接触式换热
只需要25°C以上的
制冷温度

结 论

- **低能耗的热环境并不等于不舒适不健康的低品质环境**
- **了解人的根本性需求才能导向正确的策略，在实现舒适健康的同时，消耗尽可能少的能源**
- **有一定变化的热环境更接近自然，更加健康**
- **个体热调节系统必然会成为未来低能耗暖通空调设备中的重要成员**

谢谢关注!

