

第四章

人体对热湿环境的反应

主要内容

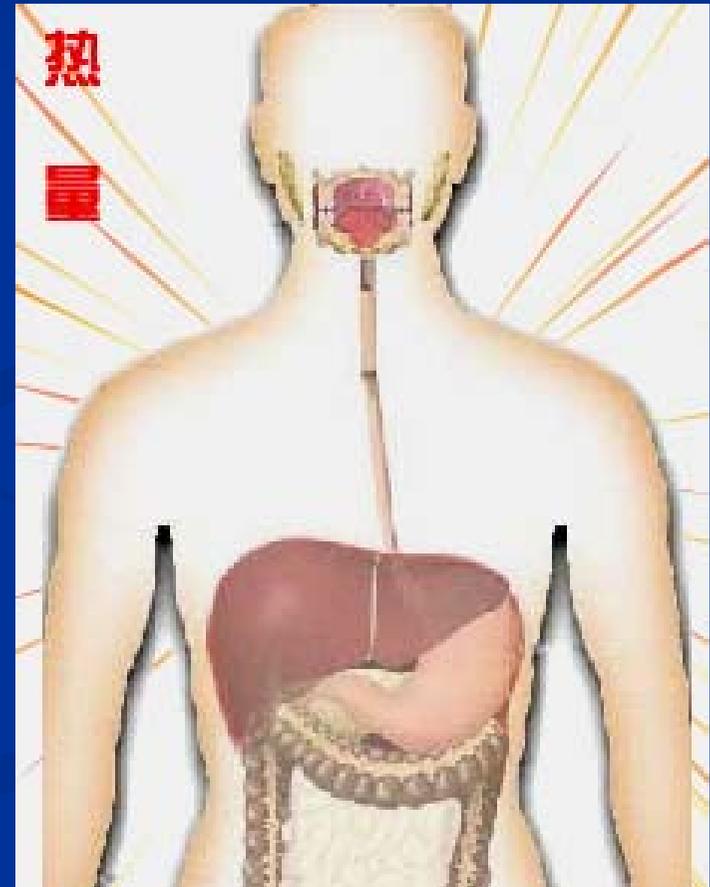
- 人体对热湿环境反应的生理学和心理学基础
 - 人体热平衡
 - 温度感受系统与调节系统
 - 热感觉与热舒适
- 人体对稳态热环境的反应
- 人体对动态热环境的反应
- 其他热湿环境的物理度量
- 热环境与工作效率
- 二节点模型

人体对热湿环境反应的 生理学 and 心理学基础

1. 人体的热平衡

人体的基本生理要求

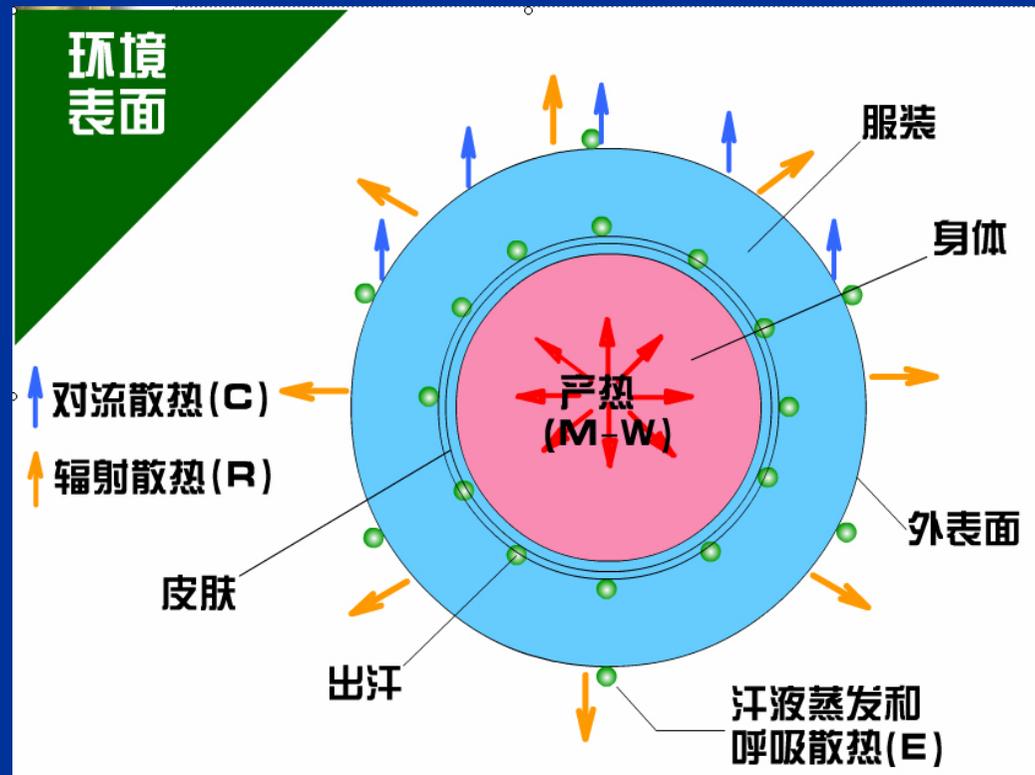
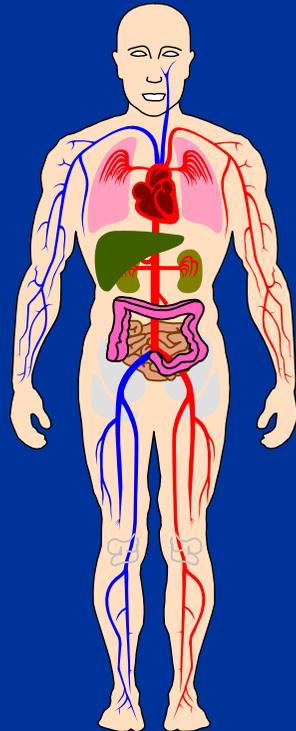
- 食物 \Rightarrow 分解氧化 \Rightarrow 热量
- 人体的基本生理要求：维持体温基本恒定！
- 代谢率(Metabolic Rate): 人体新陈代谢反应过程中能量释放的速率



人体的热平衡

- 热平衡方程 $M - W - C - R - E - S = 0$
- 皮肤表面积 $A_D = 0.202 m_b^{0.425} H^{0.725}$

身高1.78m
体重65kg
 A_D 为1.8m²



人体温度

■ 核心(Core)温度

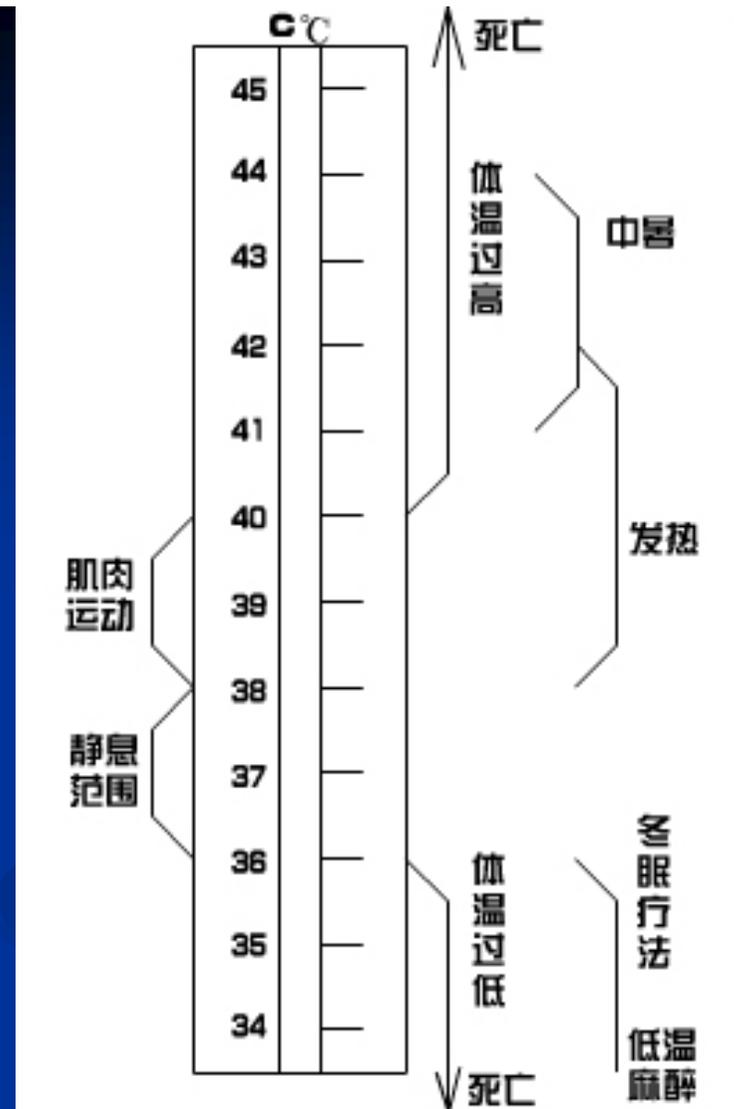
- 核心层：通常包括脑、脊椎、心脏、肝脏、消化器官等内脏部分。
- 直肠温度最接近。

■ 外层(Shell)温度

- 皮肤表面到 10 mm 以内的部分，通常包括皮肤，皮下脂肪和表层的肌肉。

人体体温范围

- 肝脏：最高，38℃
- 皮肤：与外界环境有关
- 各部分温差不会太大
- 日夜有1℃以内的波动
- 代表温度：核心温度



我国正常成年人的体温 (°C)

表 4-1

	平均量	变动范围		平均量	变动范围
腋温	36.8	36.0~37.4	肛温	37.5	36.9~37.9
口温	37.2	36.7~37.7			

人体外层温度

人体皮肤温度与人体热感觉的关系

表 4-2

皮肤温度	状 态	皮肤温度	状 态
45℃以上	皮肤组织迅速损伤, 热痛阈	32~30℃	较大 (3~6met) 运动量时感觉舒适
43~41℃	被烫伤的疼痛感	31~29℃	坐着时有不愉快的冷感
41~39℃	疼感阈	25℃ (局部)	皮肤丧失感觉
39~37℃	热的感觉	20℃ (手)	非常不快的冷感觉
37~35℃	开始有热的感觉	15℃ (手)	极端不快的冷感觉
34~33℃	休息时处于热中性状态, 热舒适	5℃ (手)	伴随疼感的冷感觉
33~32℃	中等 (2~4met) 运动量时感觉舒适		

人体与外界的热交换

■ 人体与外界的热交换

■ 显热交换

- 对流散热

- 辐射散热

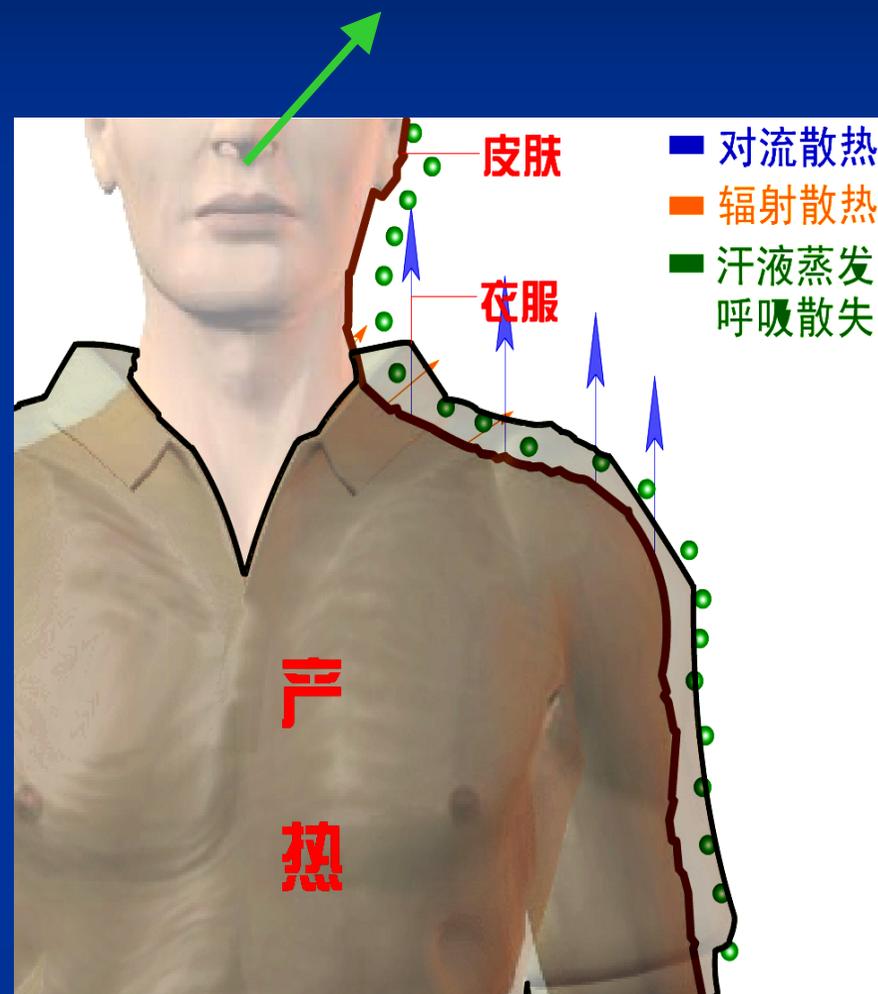
■ 潜热交换

- 皮肤散湿

 - 出汗蒸发

 - 皮肤湿扩散

- 呼吸散湿



影响人体与外界热交换的因素

- 环境空气温度：对流换热
- 环境表面温度：辐射换热
- 水蒸汽分压力（空气湿度）：对流质交换
 - 高温环境：增加热感
 - 低温环境：增加冷感
- 风速：对流传热交换和对流质交换
 - 吹风感：冷感和对皮肤的压力冲击
- 服装热阻：影响所有换热形式

关于热湿环境的术语

- 平均辐射温度 \bar{t}_r 或 \bar{T}_r

近似式:
$$\bar{t}_r = \sum_{j=1}^k (F_{nj} t_{nj})$$

准确的应该是四次方
$$\bar{T}_r^4 = \frac{\sum_{j=1}^k (F_{nj} \epsilon_j T_{nj}^4)}{\epsilon_0}$$

- 黑球温度 T_g

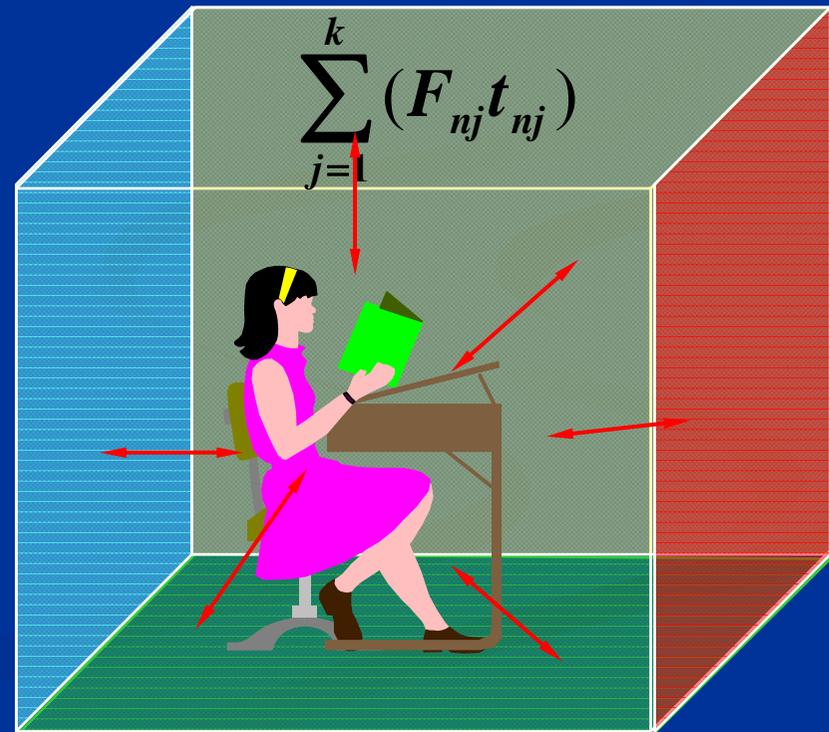
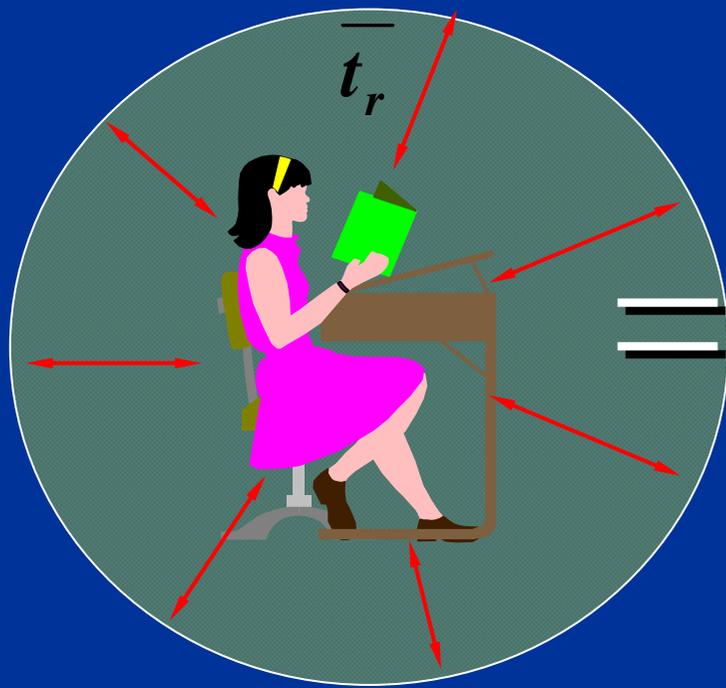
$$\bar{T}_r = T_g + 2.44 \sqrt{v} (T_g - T_a)$$

- 操作温度: 反映了环境空气温度 t_a 和平均辐射温度 \bar{t}_r 的综合作用

$$t_o = \frac{h_r \bar{t}_r + h_c t_a}{h_r + h_c}$$

平均辐射温度：

一个假想的等温围合面的表面温度，它与人体间的辐射热交换量等于人体周围实际的非等温围合面与人体间的辐射热交换量。



热质交换系数的确定

- 对流换热系数：专门针对人体的实验数据
 - 受迫对流
 - $h_c = C v^n$
 - 自然对流：三种主要形式
 - $h_c = \text{常数}$
 - $h_c = C \Delta T^{0.25}$
 - $h_c = C (M-50)^{0.39}$
- 对流质交换系数：传质与传热比拟
 - $LR = h_e / h_c = 16.5 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{kPa}$

服装的作用：保温和阻碍湿扩散

- 服装的性能：
 - 服装的热阻 I_{cl}
 - 服装的透湿性
 - 服装的表面积

服装的热阻 I_{cl}

- 一般指显热热阻
- 单位 m^2K/W 和clo, 其中 $1clo = 0.155 m^2K/W$
- 已知单件服装热阻: $I_{cl} = 0.161 + 0.835 \sum I_{clu,i}$

类型	I_{cl} (clo)
短袖衬衣, 短裤	0.36
长裤, 短袖衬衫	0.57
长裤, 长袖衬衫	0.61
长裤, 长袖衬衫加短外衣	0.96
厚大衣, 长袖衬衫, 保暖内衣, 长内裤	1.34
厚三件套西衣服, 长内衣裤	1.5
厚毛衣	0.37
厚长大衣	0.63
厚裤子	0.32
工作服	0.2
夹克	0.4

环境温度 21℃

相对湿度 50%

风速 0.05 m/s

服装 $I_{cl} = 1clo$



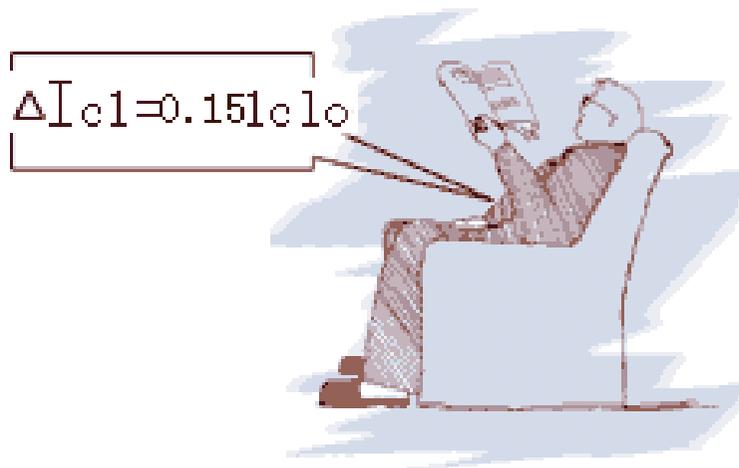
服装的热阻 I_{cl}

- 人运动时由于人体与空气之间存在相对流速，会降低服装的热阻。

$$\Delta I_{cl} = 0.504 I_{cl} + 0.00281 V_{walk} - 0.24$$

- 椅子给人增加0.15 clo以下热阻

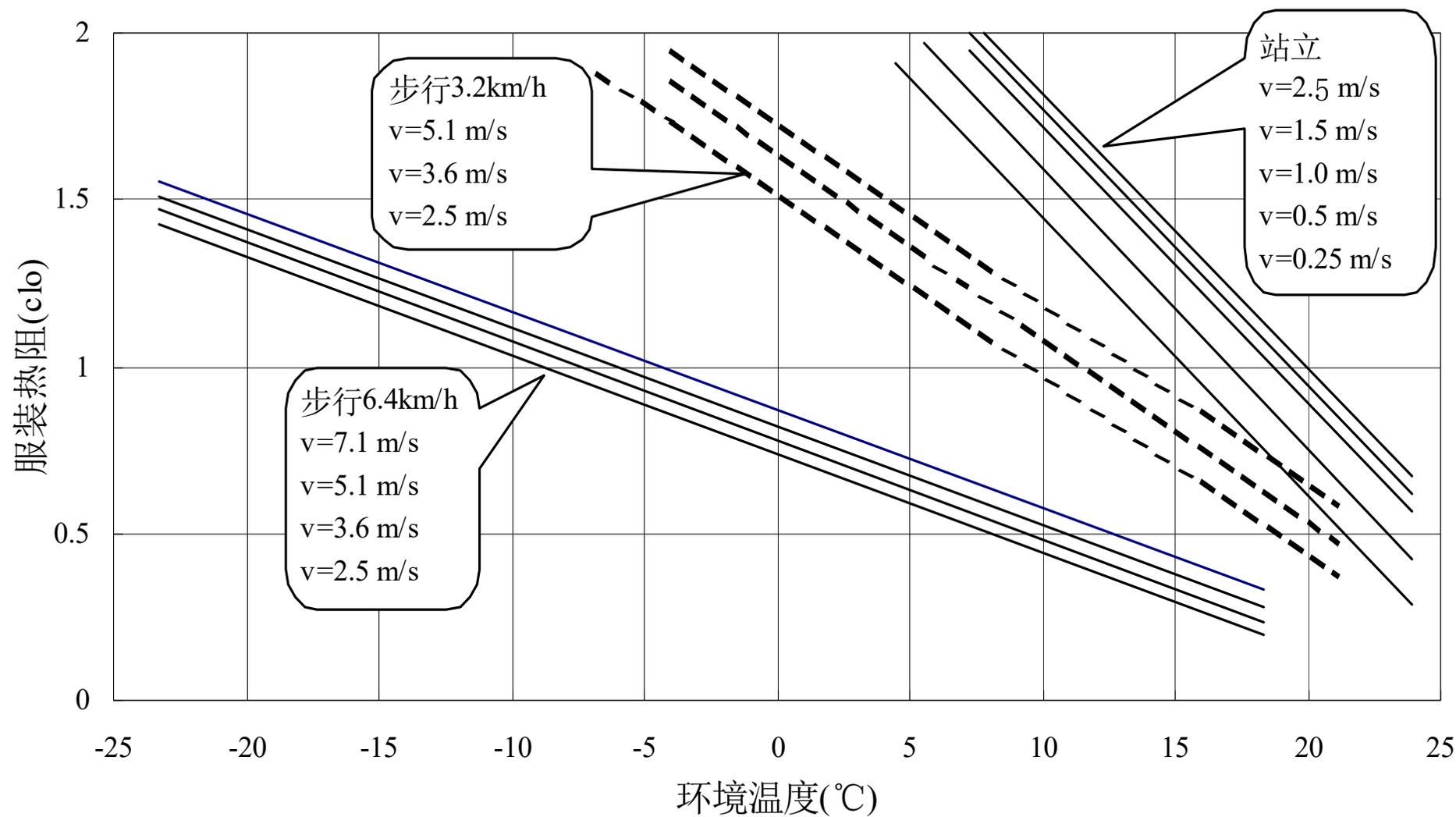
$$\Delta I_{cl} = 0.748 \times A_{ch} - 0.1$$



步速 3.7km/h
1clo \Rightarrow 0.48 clo

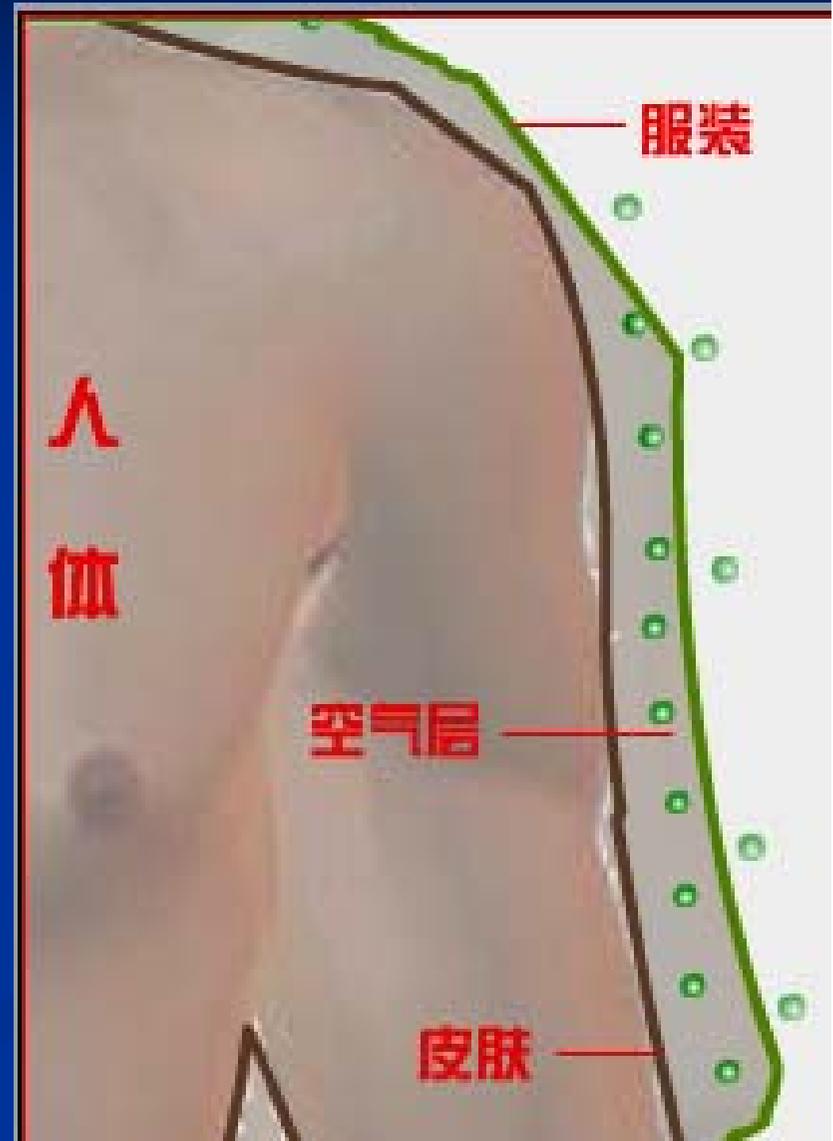


舒适服装热阻与环境温度、相对风速、活动强度的关系



服装的透湿性

- 服装的存在增加了皮肤的蒸发换热热阻：
 - 服装对皮肤表面的水蒸气扩散有一个附加的阻力。
 - 服装吸收部分汗液，只有剩余部分汗液蒸发冷却皮肤。使得需要更大蒸发量才能在皮肤表面上形成同样的散热量



服装的潜热热阻

- 服装的蒸发换热热阻(干燥服装):

$$I_{e,cl} = I_{cl} / LR = I_{cl} / 16.5 \text{ (kPa m}^2\text{/W)}$$

- 服装被汗湿润后热阻会下降，显热换热加强，又增加了潜热换热，故总传热系数增加:

1 clo干燥服装被汗湿润后的热阻

活动强度	静坐	坐姿售货	站立售货	站立但偶尔走动	行走 3.2 km/h	行走 4.8 km/h	行走 6.4 km/h
服装热阻 (clo)	0.6	0.4	0.5	0.4	0.4	0.35	0.3

服装的表面积

- 服装的面积系数 f_{cl}
 - 定义：人体着装后的实际表面积 A_{cl} 和人体裸身表面积 A_D 之比。有实验数据。
 - 表达式： $f_{cl} = A_{cl} / A_D$
- 与服装热阻的近似关系
 - $f_{cl} = 1.0 + 0.3 I_{cl}$



人体的能量代谢率

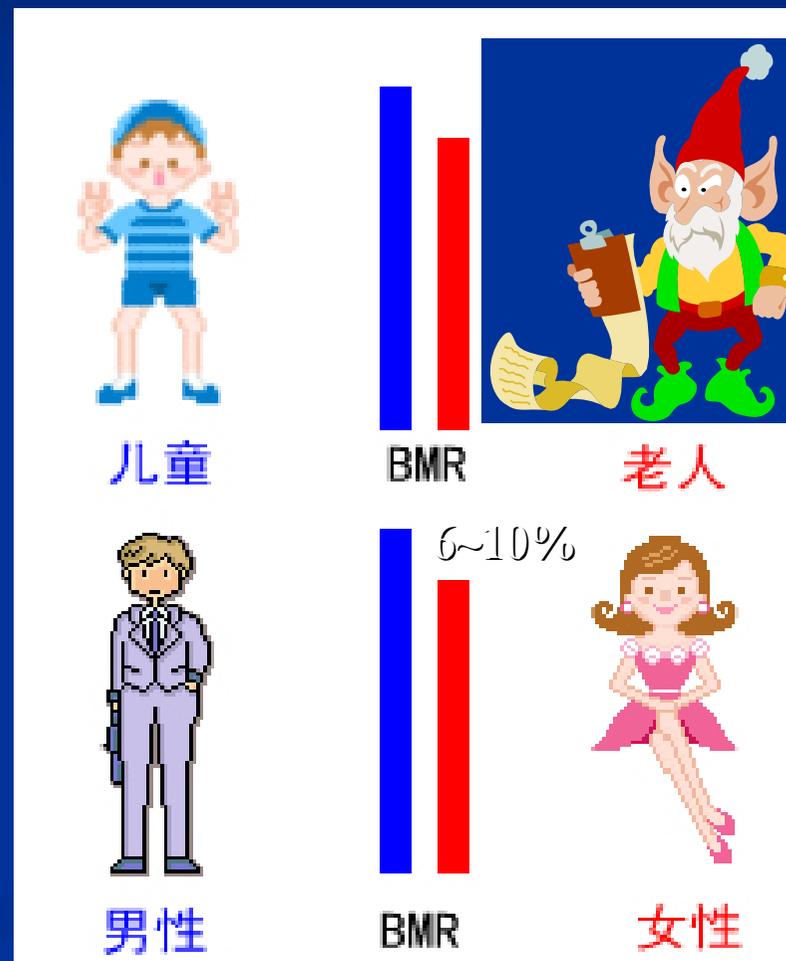
- 影响因素多：
 - 肌肉活动强度：绝对的影响
 - 环境温度：偏高、偏低都增加代谢率
 - 性别：男性高于女性
 - 年龄：少年高于老人
 - 神经紧张程度：紧张则代谢率高
 - 进食后时间的长短等：进食后代谢率增加，蛋白质代谢率高，糖和脂肪类代谢率低。
- 代谢率单位 met: $1 \text{ met} = 58.2 \text{ W/m}^2$ ，即成年男子静坐时的代谢率。

基础代谢率：参照基础

- 基础代谢率(BMR，Basal Metabolic Rate)

未进早餐前，保持清醒静卧
半小时，室温条件维持在
18~25℃之间测定的代谢率：
46 W/m²

- BMR变化范围：10~15%。
超过20%为病态。



肌肉活动与代谢率

- 肌肉活动强度对代谢率起**决定性**的影响
- 一般室内运动代谢率多在5 met 以下



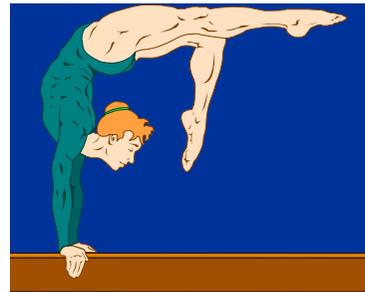
睡觉
0.7met



阅读
1met



负重
2.1met



体操
3.5met



下楼
4met



跑步
6.29met

人体是高效的能量转化系统吗？

否！

- 机械效率

$$\eta = W / M$$

- 大部分室内劳动
机械效率近似0



人体的潜热散热量：皮肤蒸发

- 体表全部被汗湿润：
$$E_{\max} = \frac{(P_{sk} - P_a)}{I_{e,cl} + 1/(f_{cl}h_e)}$$

- $$E_{sk} = E_{rsw} + E_{dif} = wE_{\max}$$

- 接近热舒适条件下的出汗潜热散热量

$$E_{rsw} = 0.42 (M - W - 58.2)$$

- 皮肤湿润度 $w = E_{sk}/E_{\max}$

- 皮肤湿扩散散热量

- 没有排汗时 $E_{dif} = 0.06 E_{\max}$

- 有正常排汗时 $E_{dif} = 0.06 (E_{\max} - E_{rsw})$

人体的潜热散热量：呼吸蒸发

- 显热散热量

$$C_{res} = 0.0014 M (34 - t_a) \text{ W/m}^2$$

- 潜热散热量

$$E_{res} = 0.0173 M (5.867 - Pa) \text{ W/m}^2$$

人体与外界的辐射换热方程

- 长波辐射

$$R = \varepsilon f_{cl} f_{eff} \sigma (T_{cl}^4 - T_r^4)$$

人体对长波辐射的发射率和吸收率在0.95左右

- 对太阳辐射的吸收

对太阳辐射的吸收率 $R = a f_{cl} f_{eff} I$

人体姿态影响有效表面积的修正系数



0.8

0.4

0.7

服装的面积系数

0.78

0.72

0.7



人体散热、散湿量的影响因素

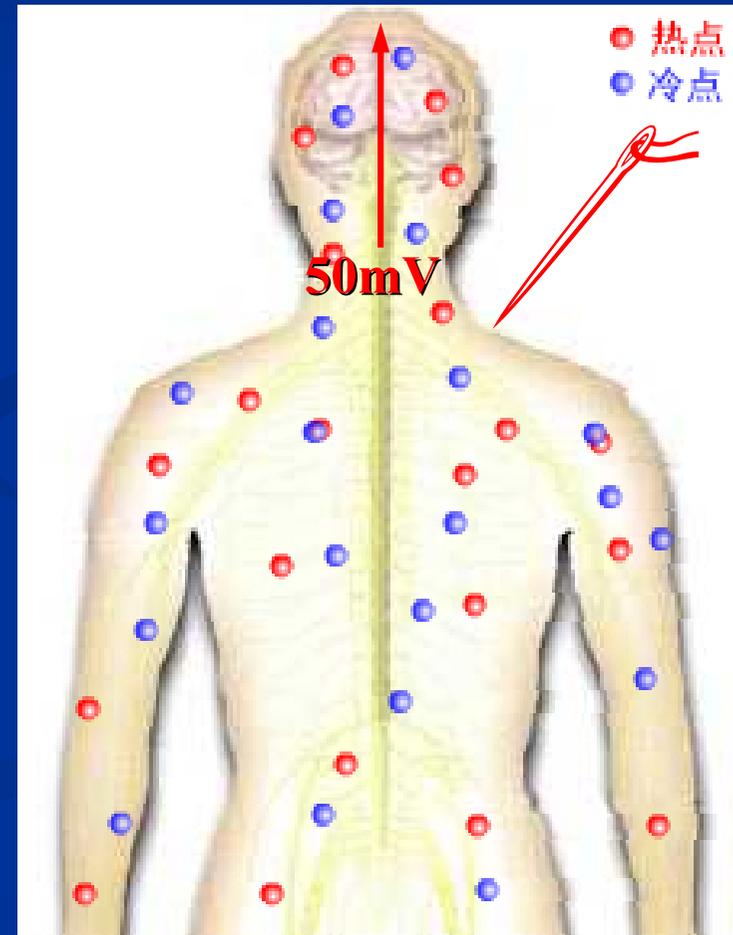
- **全热**：主要决定于肌肉活动强度，受其它因素影响在应用上可以忽略。
- **显热**：决定于温度，随温度上升而减少。
- **潜热(散湿)**：决定于温度，随温度上升而增加。

活动强度	散热散湿	环境温度 (°C)										
		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
静坐	显热(W)	84	81	78	74	71	67	63	58	53	48	43
	潜热(W)	26	27	30	34	37	41	45	50	55	60	65
	散湿(g/h)	38	40	45	50	56	61	68	75	82	90	97
极轻劳动	显热(W)	90	85	79	75	70	65	61	57	51	45	41
	潜热(W)	47	51	56	59	64	69	73	77	83	89	93
	散湿(g/h)	69	76	83	89	96	102	109	115	123	132	139
轻度劳动	显热(W)	93	87	81	76	70	64	58	51	47	40	35
	潜热(W)	90	94	100	106	112	117	123	130	135	142	147
	散湿(g/h)	134	140	150	158	167	175	184	194	203	212	220
中等劳动	显热(W)	117	112	104	97	88	83	74	67	61	52	45
	潜热(W)	118	123	131	138	147	152	161	168	174	183	190
	散湿(g/h)	175	184	196	207	219	227	240	250	260	273	283
重度劳动	显热(W)	169	163	157	151	145	140	134	128	122	116	110
	潜热(W)	238	244	250	256	262	267	273	279	285	291	297
	散湿(g/h)	356	365	373	382	391	400	408	417	425	434	443

2. 温度感受系统与调节系统

人体的温度感受系统

- 20世纪初发现人的皮肤上存在对冷敏感的区域“冷点”和对热敏感的区域“热点”
- 人体各部位的冷点数目明显多于热点
- 为什么人对冷更敏感？



人体各部位冷点和热点分布密度 (个/cm²)

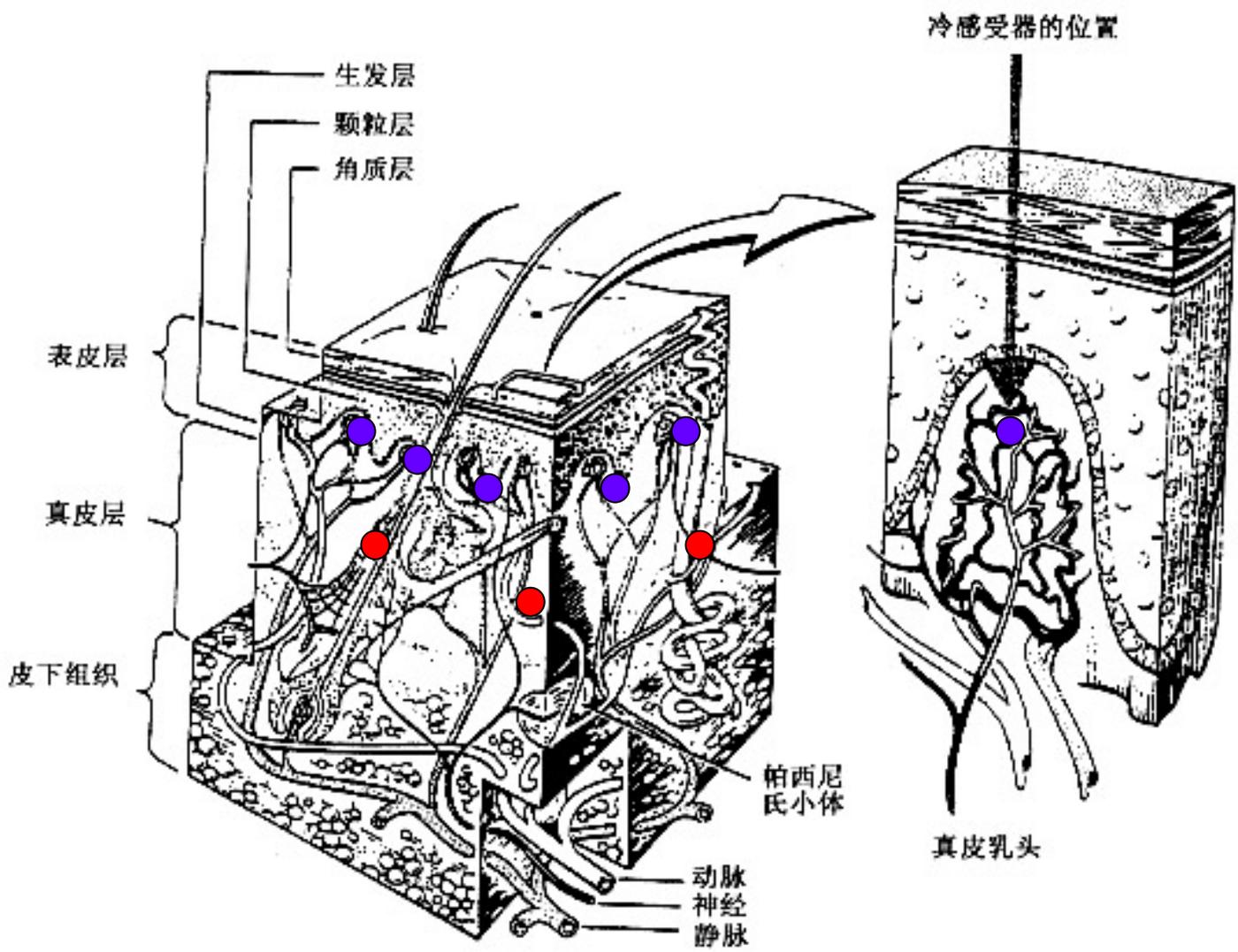
部位	冷点	热点	部位	冷点	热点
前额	5.4-8.0		手背	7.4	0.5
鼻子	8.0	1.0	手掌	1.0-5.0	0.4
嘴唇	16.0-19.0		手指背	7.0-9.0	1.7
脸部其他部位	8.4-9.0	1.7	手指肚	2.0-4.0	1.6
胸部	9.0-10.2	0.3	大腿	4.4-5.2	0.4
腹部	8.0-12.5		小腿	4.3-5.7	
后背	7.8		脚背	5.6	
上臂	5.0-6.5		脚底	3.4	
前臂	6.0-7.5	0.3-0.4			

参考文献: H. Hensel, *Thermoreception and Temperature Regulation*, London: Academic Press, 1981

冷、热感受器的位置

- 冷、热感受器存在于：
 - 外周温度感受器
 - 皮肤
 - 粘膜
 - 内脏
 - 中枢性温度敏感神经元
 - 脊髓
 - 延髓
 - 脑干网状结构

冷、热感受器的位置



人体的体温调节系统

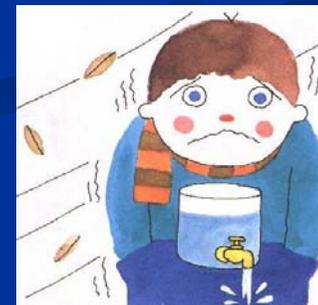
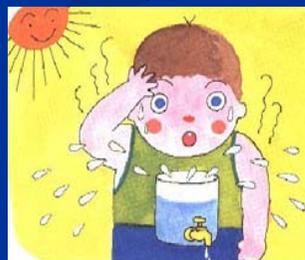
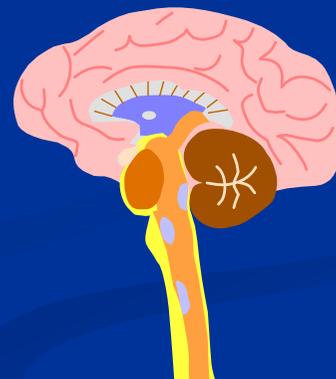
- 下丘脑具有调节代谢、体温和内分泌功能，前部主要促进散热来降温，后部促进产热抵御寒冷。

- 散热调节方式

- 血管扩张，增加血流，提高表皮温度
- 出汗

- 御寒调节方式

- 血管收缩，减少血流，降低表皮温度
- 通过冷颤增加代谢率



人体的体温调节系统

- 下丘脑前后部是相互制约起作用的，需要同时利用核心温度和皮肤温度信号来决定调节方式。

核心温度	皮肤温度	调节行为
>37.1°C	升高	增加出汗
>37.1°C	降低	抑制冷颤
高	降低	抑制出汗
<37°C	升高	抑制出汗
<37°C	降低	增加冷颤

人的体温设定值随肌肉活动强度而改变

- 在体温调节系统正常工作时，增加环境温度并不能提高人体的核心温度（直肠温度）。
- 只有改变代谢率才能改变人体核心温度。



静止体温 36.8°C



步行体温 37.4°C



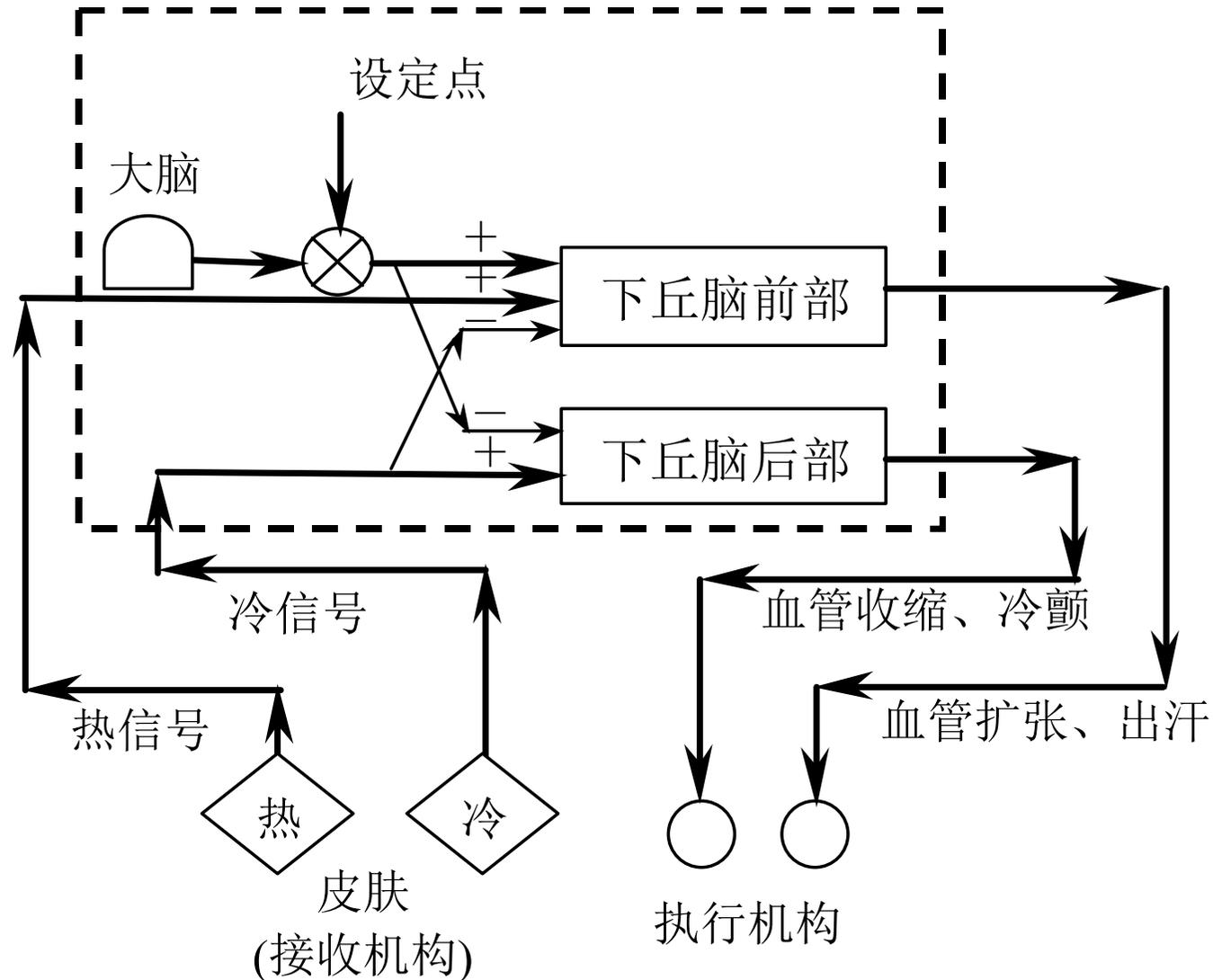
慢跑体温 37.9°C



剧烈运动 39.5°C

2. 温度感受系统与调节系统

体温调节系统的工作原理



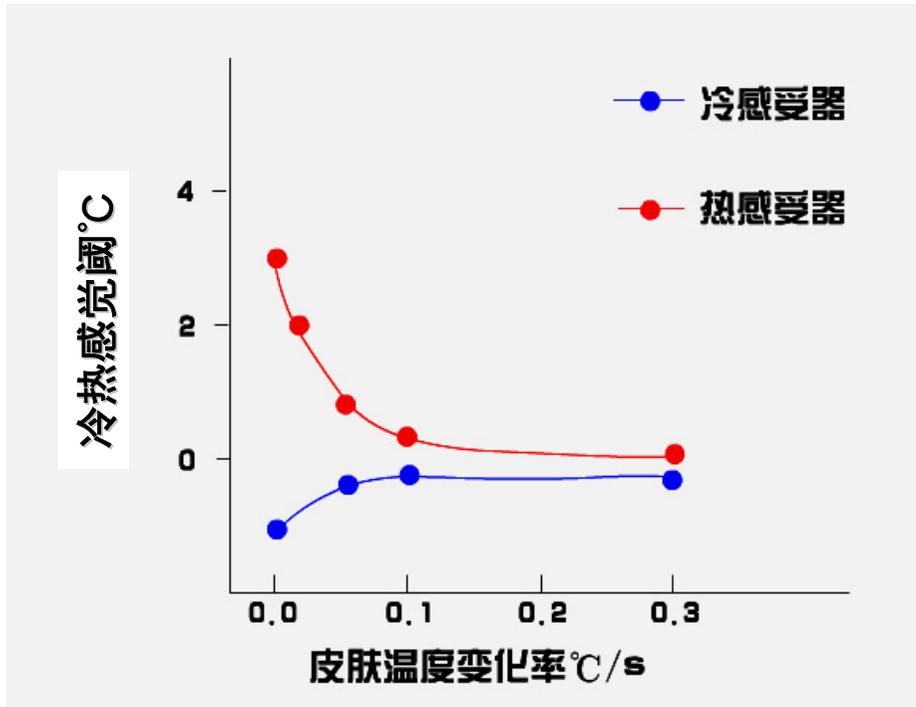
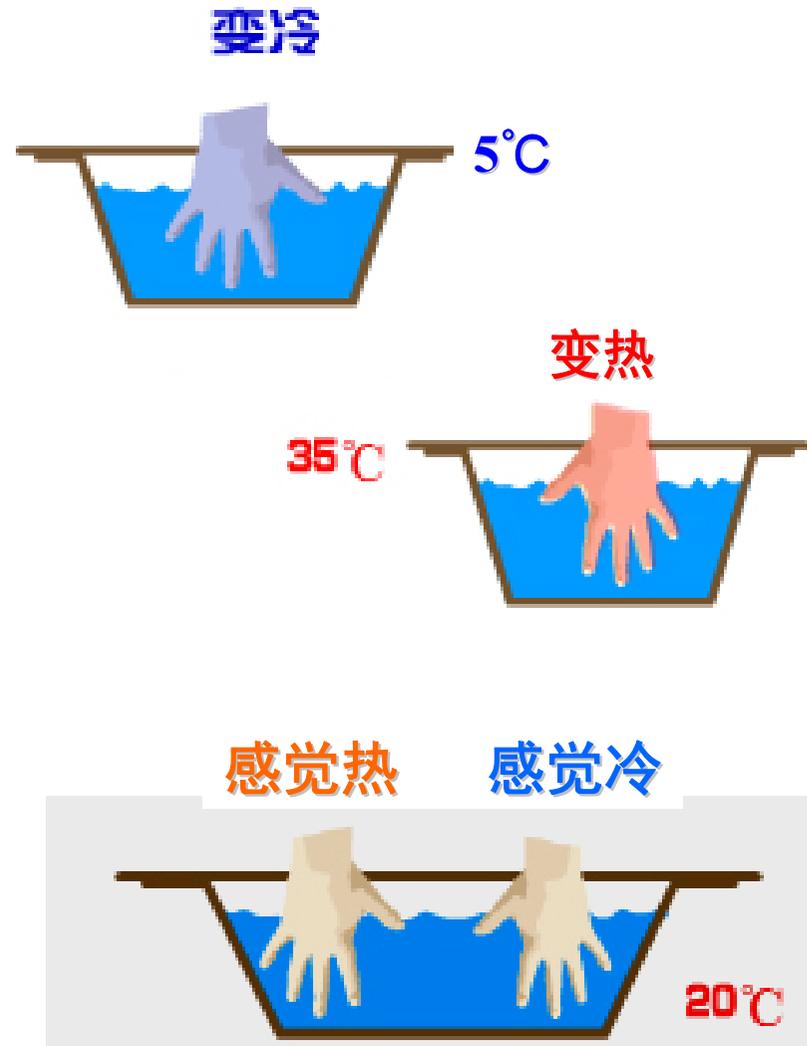
3.热感觉与热舒适

热感觉

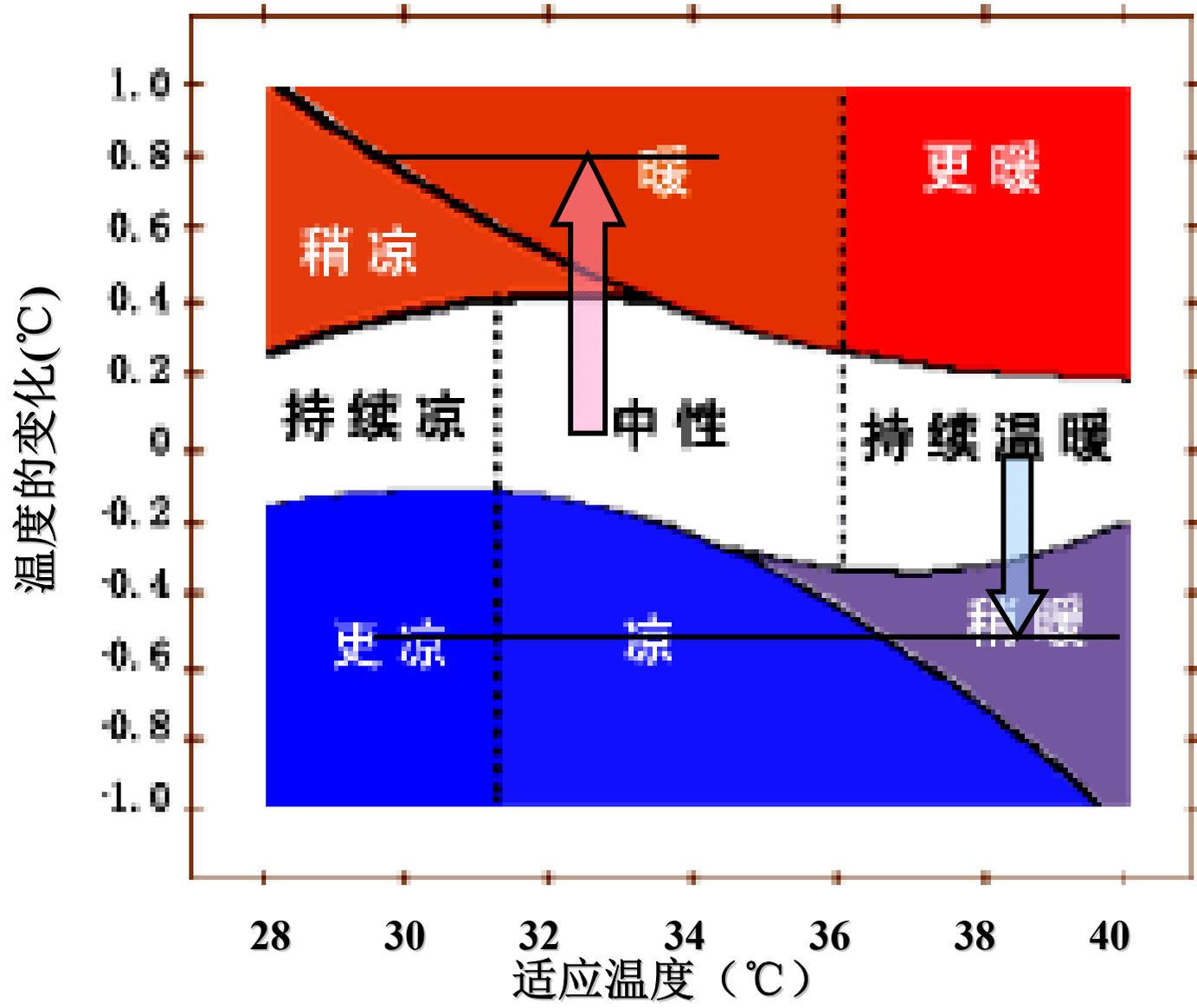
- 研究方法：心理学
- 定义：人对周围环境“冷”“热”的主观描述。
- 特点：尽管人描述环境的冷热，实际上只能感觉到自己皮肤下神经末梢的温度。所以“冷”“热”与感受者的身体状态有关，不是完全客观的。
- “中性”的定义：不冷不热，人用于体温调节消耗的能量最小。

热感觉的影响因素

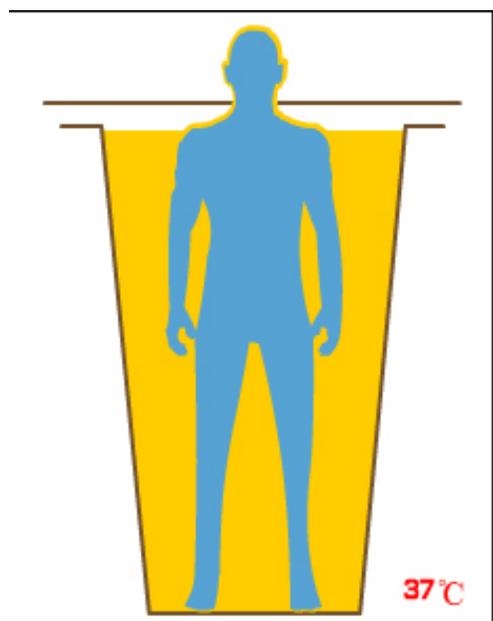
- 冷热刺激的存在
- 刺激的延续时间
- 人体原有的状态



热感觉的适应性

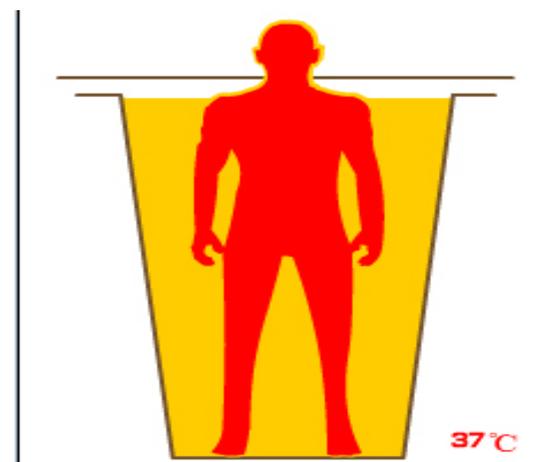
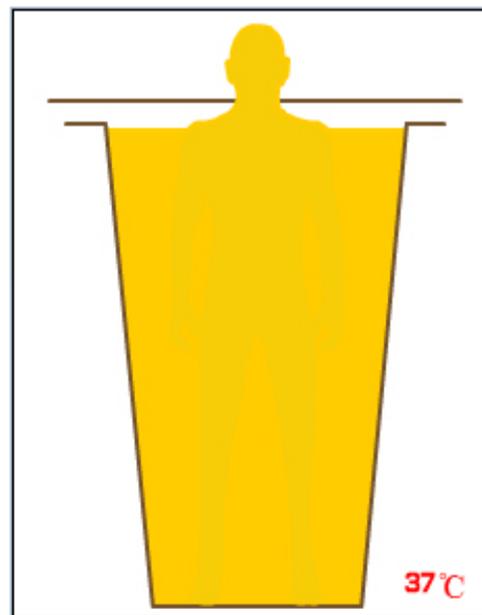


核心温度对热感觉的影响



中性
皮肤温度作用

温暖



热!
核心温度作用

热感觉的测量： 问卷调查

Bedford 和 ASHRAE 的七点标度

贝氏标度		ASHRAE 热感觉标度	
7	过分暖和	7	热
6	太暖和	6	暖
5	令人舒适的暖和	5	稍暖
4	舒适（不冷不热）	4	正常
3	令人舒适的凉快	3	稍凉
2	太凉快	2	凉
1	过分凉快	1	冷

什么是热舒适?

观点1:

舒适 = 中性

什么是热舒适?

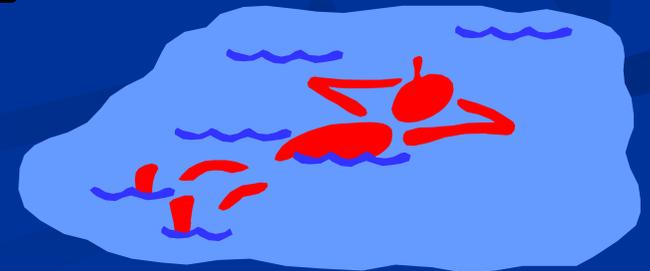
观点2:

舒适 ~~≠~~ 中性

舒适产生于不适的消除过程中。

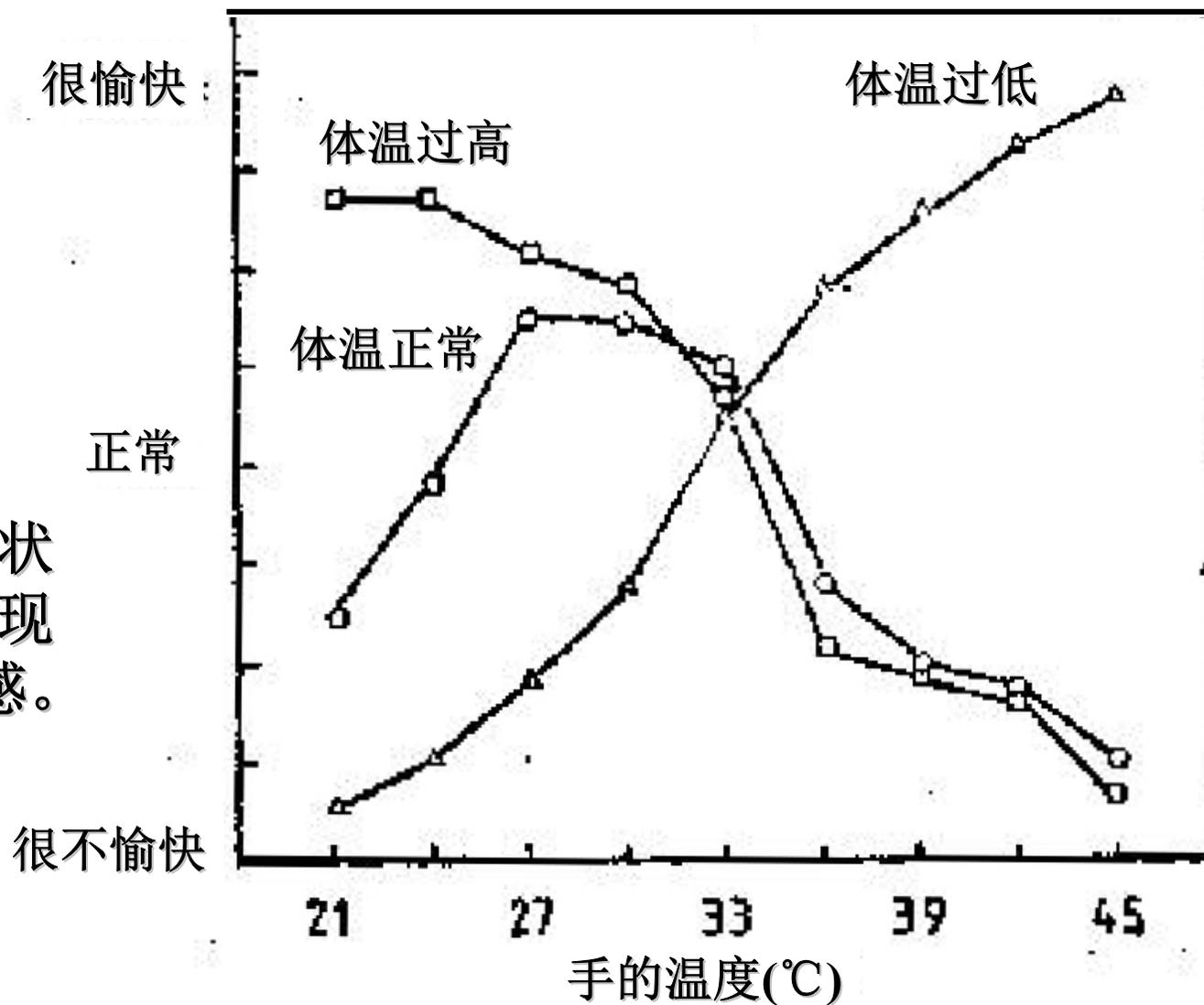
“舒适”比“中性”更主观。

Cool &
Comfort !



热舒适与热中性的背离

结论：非中性状态下，反而出现更强的热舒适感。



影响热舒适的因素

- 空气湿度
- 垂直温差
- 气流与吹风感
- 辐射不均匀性
- 年龄、性别、季节、人种



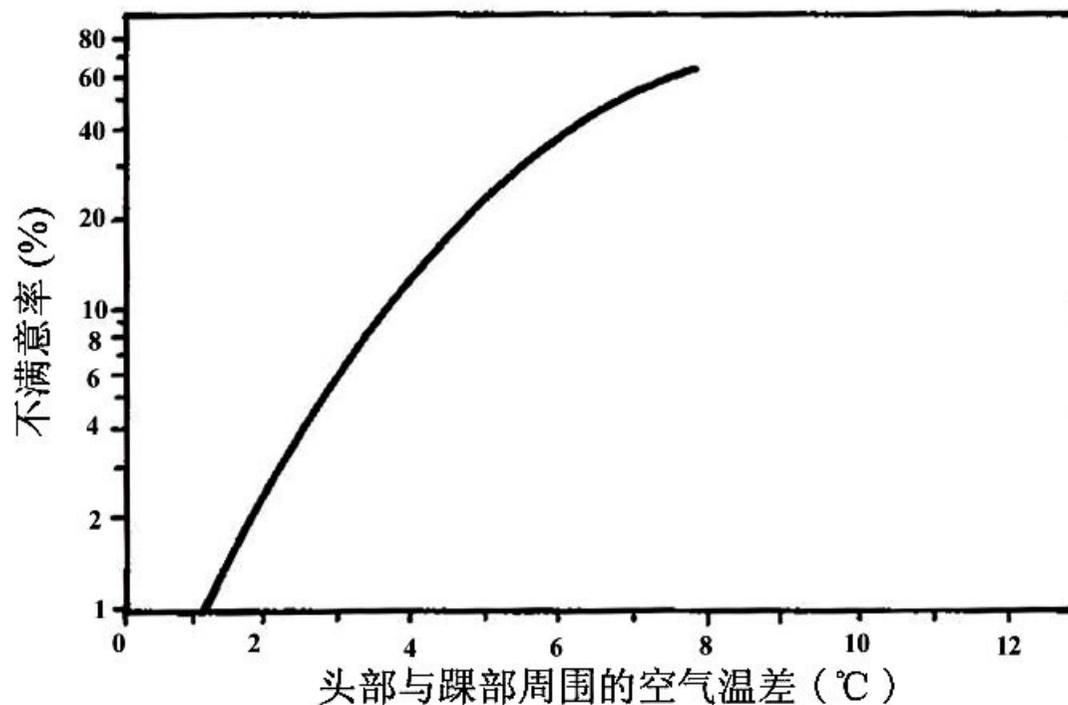
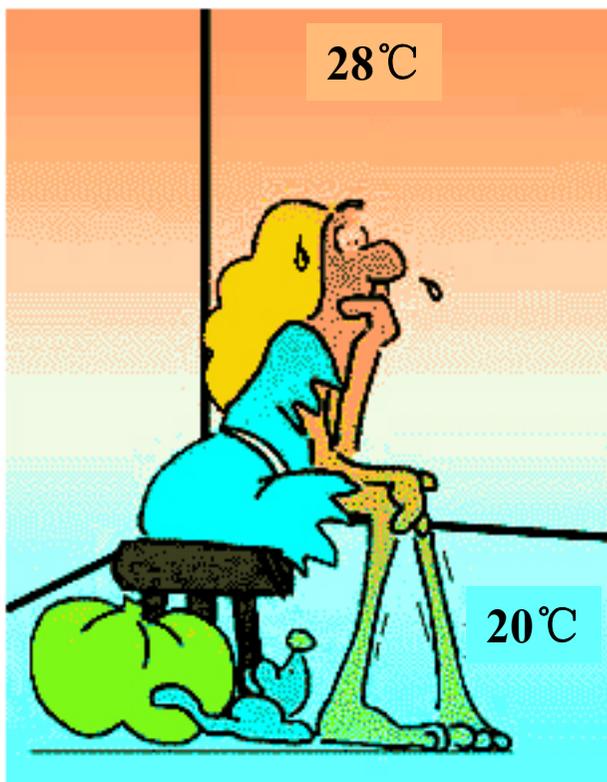
空气湿度

- 中性—热环境中，为什么潮湿的空气使人不舒服？
- 在皮肤没有完全湿润的情况下，增加空气湿度会减少人体散热量吗？
- 潮湿为什么不舒服？
- 皮肤湿润度增高⇒皮肤黏着性增加⇒不适
- 可能引起不舒适的皮肤湿润度的上限

$$w < 0.0012 M + 0.15$$

垂直温差

- 尽管受试者处于热中性状态，头足温差仍然使人感到不舒服。



垂直温差

- 游泳池地面应该保持的温度是多少？

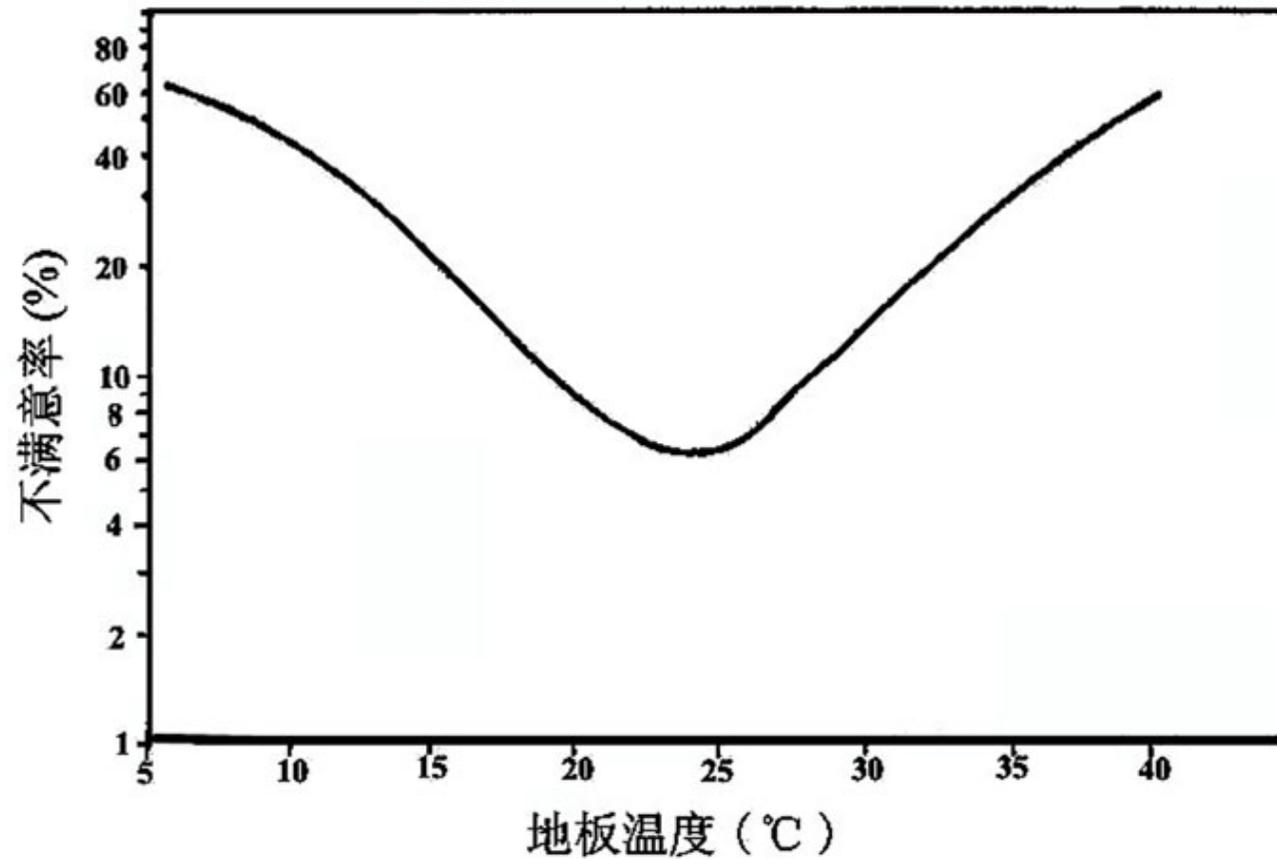
不同地板材料的舒适温度

地板面层材料	满意度>85%的地面温度(°C)
木	23~28
混凝土	26~28.5
毛织地毯	21~28
5 mm 软木	23~28
橡木地板	24.5~28
2 mm 聚氯乙烯	26.5~28.5
大理石	28~29.5



垂直温差

ASHRAE Handbook: 地板温度和不满意度的关系



气流与 吹风感 draught

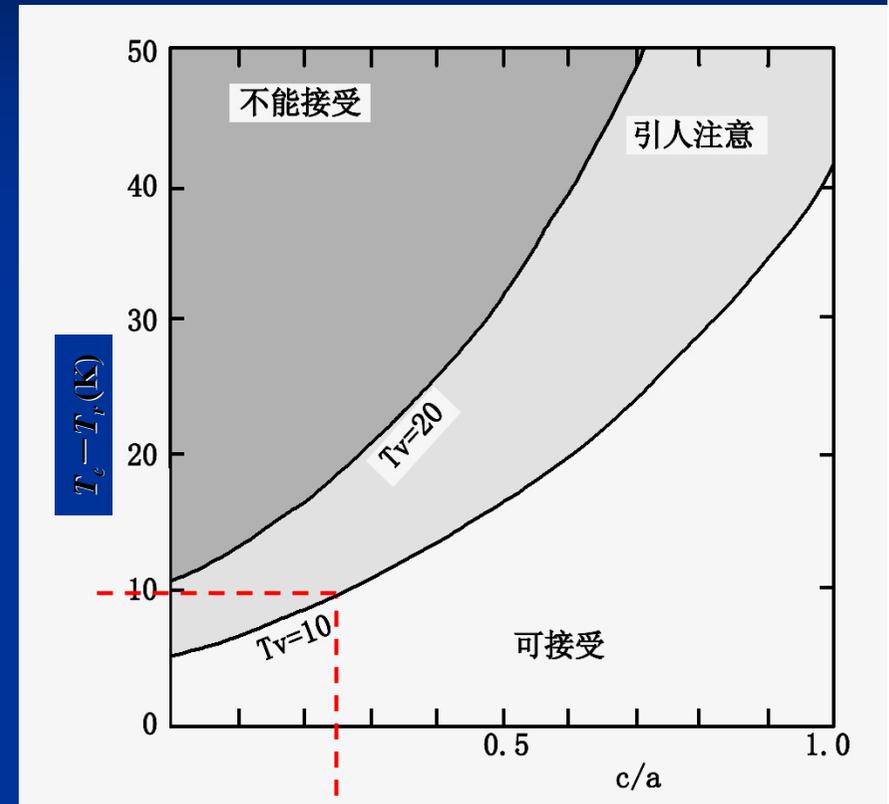
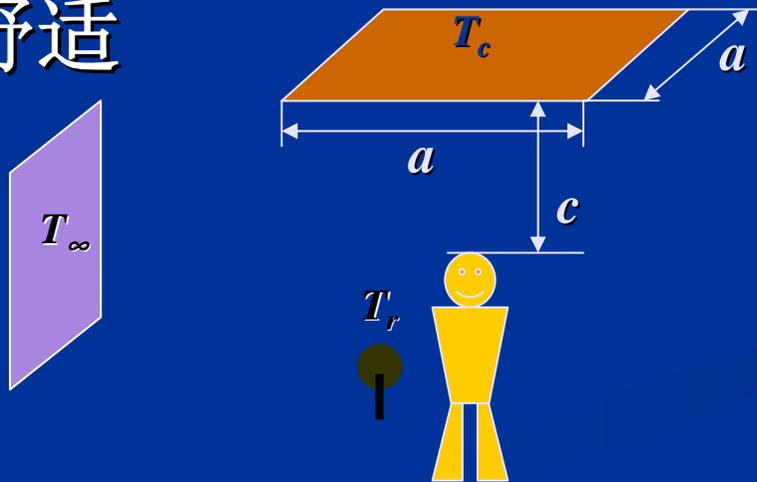
- 定义：人体所不希望的局部降温
- 但在“中性—热”环境下吹风往往是愉快的
- 其它不舒适的原因
 - 局部压力干扰
 - 冷颤出现

气流与吹风感 draught

- 人头顶上的自然对流速度是 0.2 m/s ，所以是人体对风速可以觉察到的阈值，往往用来确定室内风速的设计标准。
- 当空气流速 $\leq 0.5 \text{ m/s}$ ，麦金太尔(1979)等研究者的实验表明，只要把空气温度调整得合适（提高空气温度），就可以使空气的流动几乎觉察不到。

辐射不均匀性

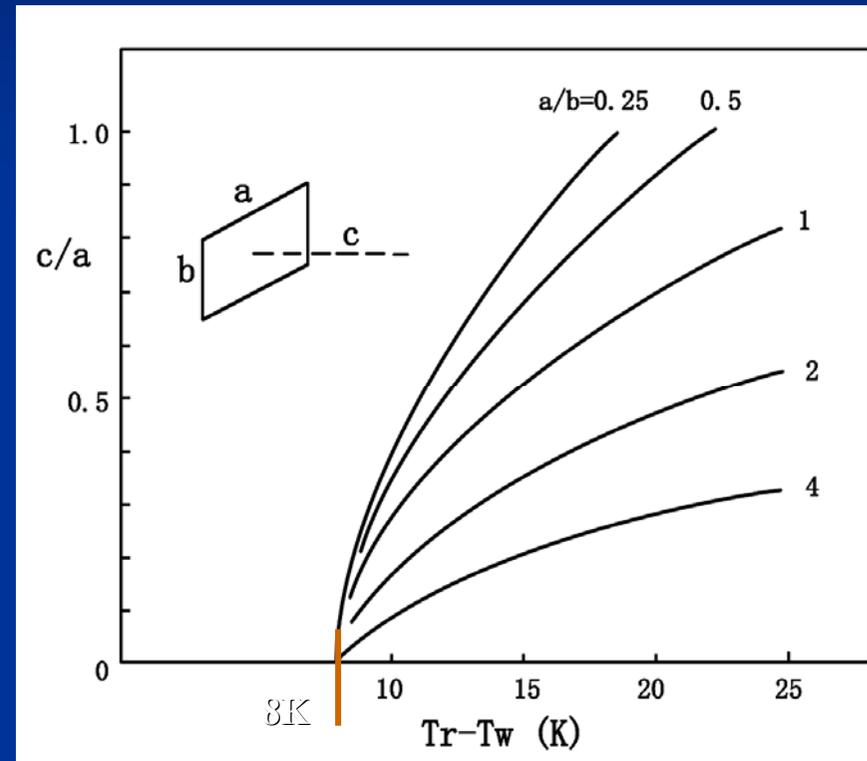
- 向量辐射温度：室内两部分的平均壁面温度差： $T_v = F_{pc} (T_c - T_\infty)$
- 向量辐射温度超过 10°C ，人就感到不舒适



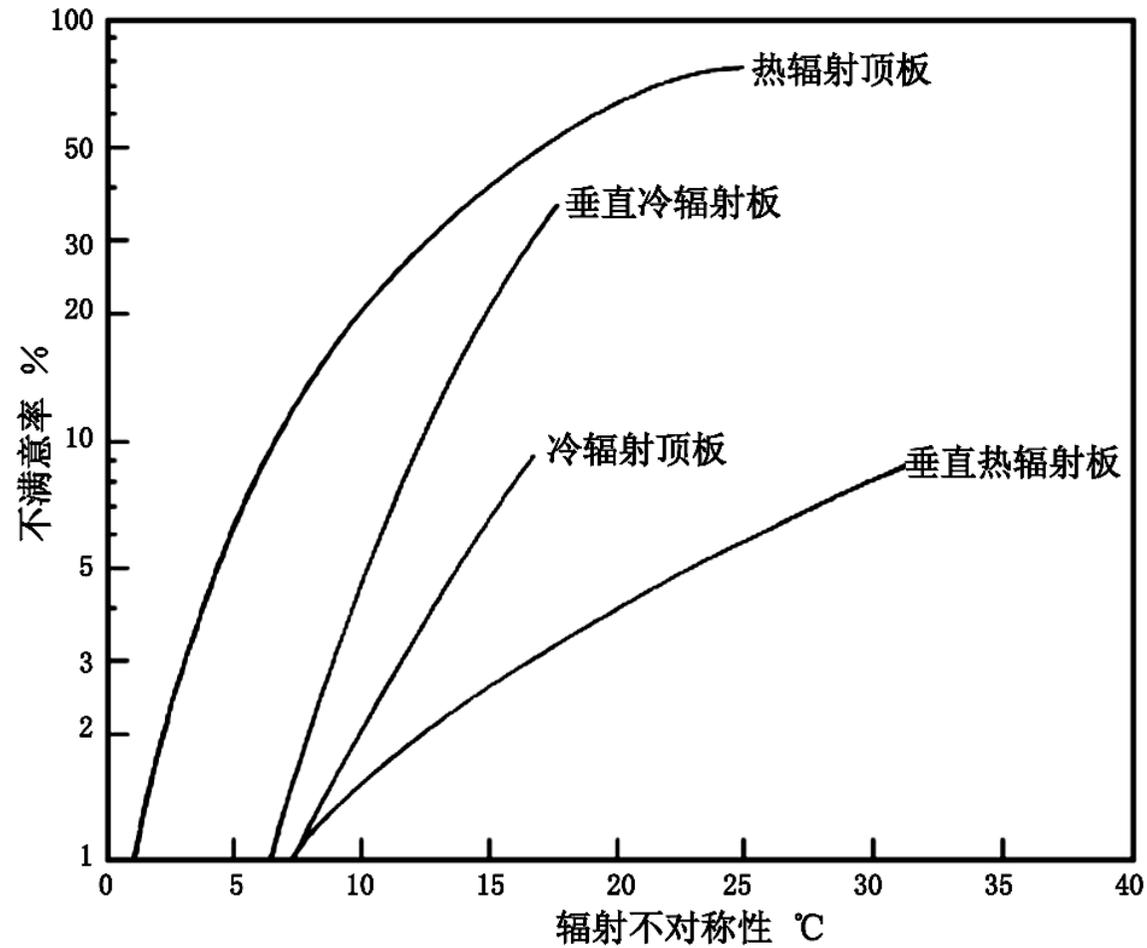
辐射吊顶的位置、尺寸、表面温度与舒适性的关系

辐射不均匀性

- 辐射吹风感：房间内局部低温辐射导致人体所不希望的局部降温
- 面对冷表面的平均辐射温度比其它部分部分的平均辐射温度低 8K 以上，将使人感到不舒适



辐射不对称性与满意率的关系



其它因素：Fanger 的实验结论

- 人种：非洲人比北欧人喜欢热环境吗？
 - 热舒适感觉一样，只是热带人对热环境有较强适应力，寒带人对冷环境有较强适应力。
- 年龄：老年人比年轻人更喜欢热环境吗？
 - 不是，只是老年人活动量小。
- 性别：女性比男性更喜欢热环境吗？
 - 不是，只是女性喜欢穿较轻薄的衣服。
- 季节和一天中的时间会影响热舒适感吗？
 - 尽管人体温有波动，但热舒适感没有明显变化

3.热感觉与热舒适

热感觉投票和热舒适投票

- Thermal Comfort Vote & Thermal Sensation Vote

热舒适投票 TCV 与热感觉投票 TSV

热舒适投票 TCV		热感觉投票 TSV	
4	不可忍受	+3	热
3	很不舒适	+2	暖
2	不舒适	+1	稍暖
1	稍不舒适	0	正常
0	舒适	-1	稍凉
		-2	凉
		-3	冷

人体对稳态热环境的反应

人体对稳态热环境的反应理论建立者： P. O. Fanger

■ 热舒适方程

令人体热平衡方程中蓄热率 $S=0$ ，得出：

$$(M - W) = \underbrace{f_{cl} b_c (t_{cl} - t_a)}_{\text{对流散热}} + \underbrace{3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4]}_{\text{辐射散热}} + \underbrace{3.05 [5.723 - 0.007(M - W) - P_a]}_{\text{皮肤扩散蒸发散热}} + \underbrace{0.42(M - W - 58.2)}_{\text{汗液蒸发散热}} + \underbrace{0.173 M (5.867 - P_a) + 0.0014 M (34 - t_{cl})}_{\text{呼吸潜热和显热散热}}$$

辐射散热

对流散热

皮肤扩散蒸发散热

呼吸潜热和显热散热

汗液蒸发散热

预测平均评价PMV (Predicted Mean Vote)

$$\begin{aligned} \text{PMV} &= (0.303 e^{-0.036 M} + 0.0275) \text{TL} \\ &= (0.303 e^{-0.036 M} + 0.0275) \times \\ &\quad \{M - W - 3.05 [5.733 - 0.007 (M - W) - \\ &\quad P_a] - 0.42(M - W - 58.15) - 1.73 \times 10^{-} \\ &\quad {}^2 M(5.867 - P_a) \\ &\quad - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) - 0.0014 M (34 - t_a) \\ &\quad - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (+ 273)^4] \} 60 \end{aligned}$$

PMV指标的7级分度

热感觉	热	暖	微暖	适中	微凉	凉	冷
PMV值	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

- 分度方法和TSV基本一致
- PMV指标只代表了同一环境下绝大多数人的感觉，不能代表所有个人的感觉。

预测不满意百分比PPD

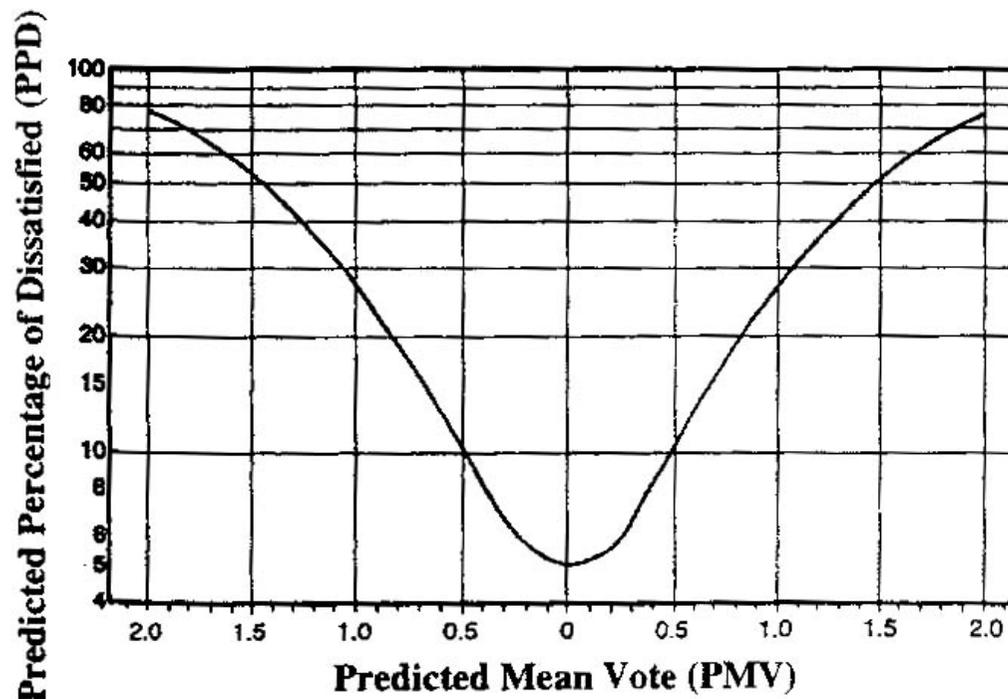
(Predicted Percent Dissatisfied)

- PPD是通过概率分析确定某环境条件下人群不满意的百分数

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353 \text{ PMV}^4 + 0.2179 \text{ PMV}^2)]$$

即便达到 $\text{PMV} = 0$ ，仍然有5%的人不满意。

反映了人的个体差异。



热舒适方程与PMV指标特点总结

- 只适用于接近热舒适的状态，因为采用的 t_{sk} 和 E_{rsw} 与环境温度完全无关，是接近热中性条件下的皮肤温度和出汗量。——在偏离热中性的条件下PMV的预测值与人体的真实感受偏差比较大。

接近热舒适条件下的出汗潜热散热量：

$$E_{rsw} = 0.42 (M - W - 58.2)$$

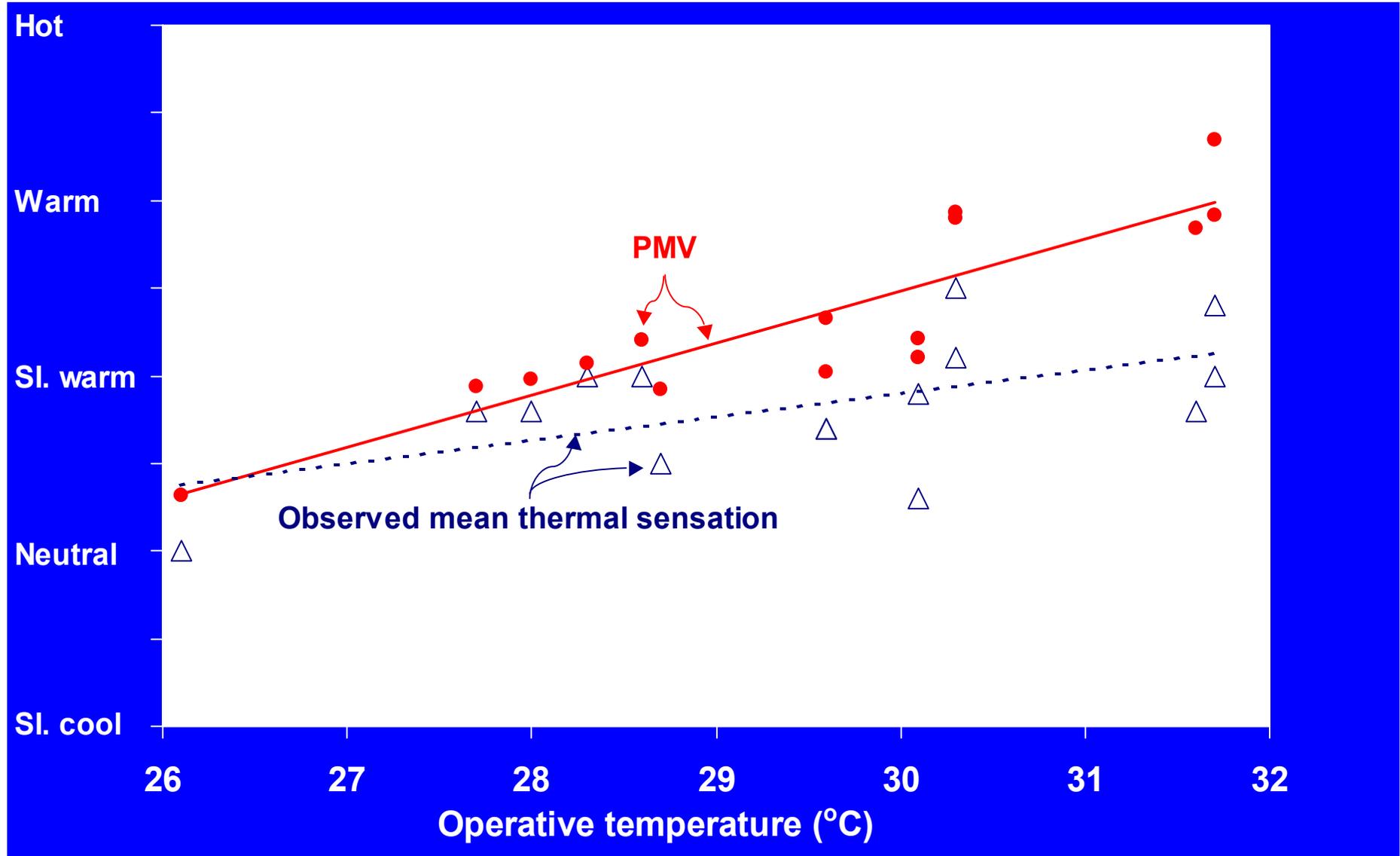
皮肤温度：

$$t_{sk} = 35.7 - 0.0275 (M - W)$$

热舒适方程与PMV指标特点总结

- 舒适程度由对热中性的偏移程度确定，与偏移的时间长短没有关系，与人体原有的热状态无关，与人体热状态的变化无关。
——只适用于稳态热环境。
- PMV的计算是完全客观的，但指标的含义却是由主观感觉统计确定的。——是把主观感觉与客观物理条件联系的好办法。

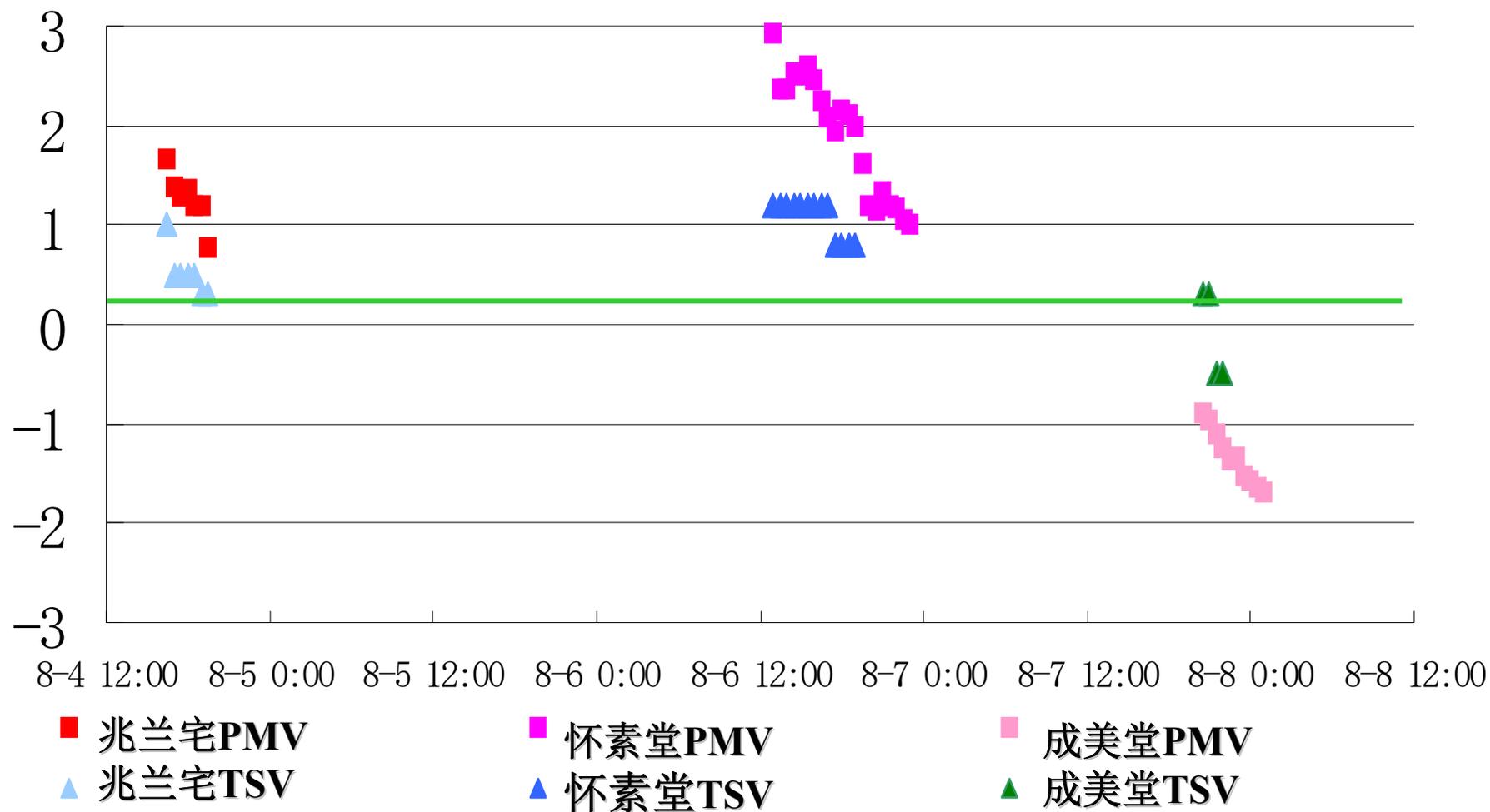
在曼谷、新加坡、Athens、布里斯班做的 3200 组
非空调环境的测试结果：PMV与实际TSV的偏差。



2000年夏安徽泾县民居

——非空调环境热舒适调查

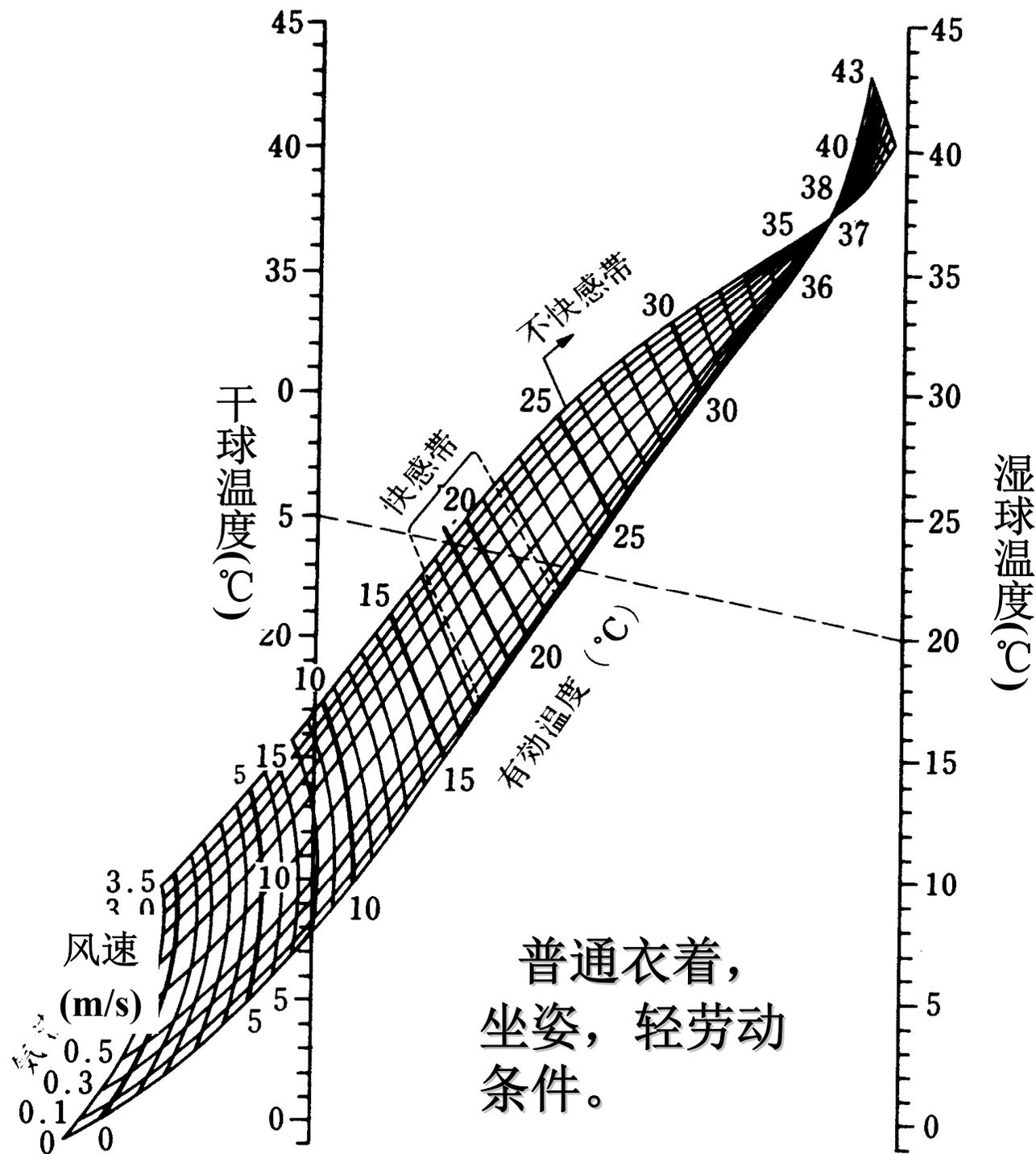
PMV与主观感受比较



其它稳态热反应评价指标： (1) 有效温度ET

- 1919开始研究，1967前的ASHRAE手册采用
- 有效温度ET定义：“这是一个将干球温度、湿度、空气流速对人体温暖感或冷感的影响综合成一个单一数值的任意指标。它在数值上等于产生相同感觉的静止饱和空气的温度。”
- 对于正常穿着： $ET=0.492T_a+0.19P_a+6.47$
- 对于半裸者：(二式条件均为 $v_a < 0.15\text{m/s}$)
 $ET=(0.944T_a+0.056T_{wb})/[1+0.22(T_a-T_{wb})]$
- 缺点：低温条件下湿度的影响不准确

(1) 有效温度ET诺谟图



(2) 新有效温度 ET^* (Gagge)

- ASHRAE标准55-74, ASHREA手册1977版
- 参考空气环境: 身着0.6 clo服装静坐, 空气流速0.15m/s, 相对湿度50%, 干球温度 T_0
- 如果同样服装和活动的人在某环境中的冷热感与上述参考空气环境中的冷热感相同, 则此环境的 $ET^*=T_0$
- 该指标只适用于着装轻薄、活动量小、风速低的环境。

(3) 标准有效温度SET*

- 特点：综合考虑了不同的活动水平和衣服热阻
- 定义：某个空气温度等于平均辐射温度的等温环境中的温度，其相对湿度为50%，空气静止不动，在该环境中身着标准热阻服装的人若与他在实际环境和实际服装热阻条件下的平均皮肤温度和皮肤湿润度相同时，则必将具有相同的热损失，这个温度就是上述实际环境的SET*。

$$Q_{sk} = h'_{cSET} (T_{sk} - SET^*) + wh'_{eSET} (P_{sk} - 0.5P_{SET})$$

皮肤总散热量

皮肤温度

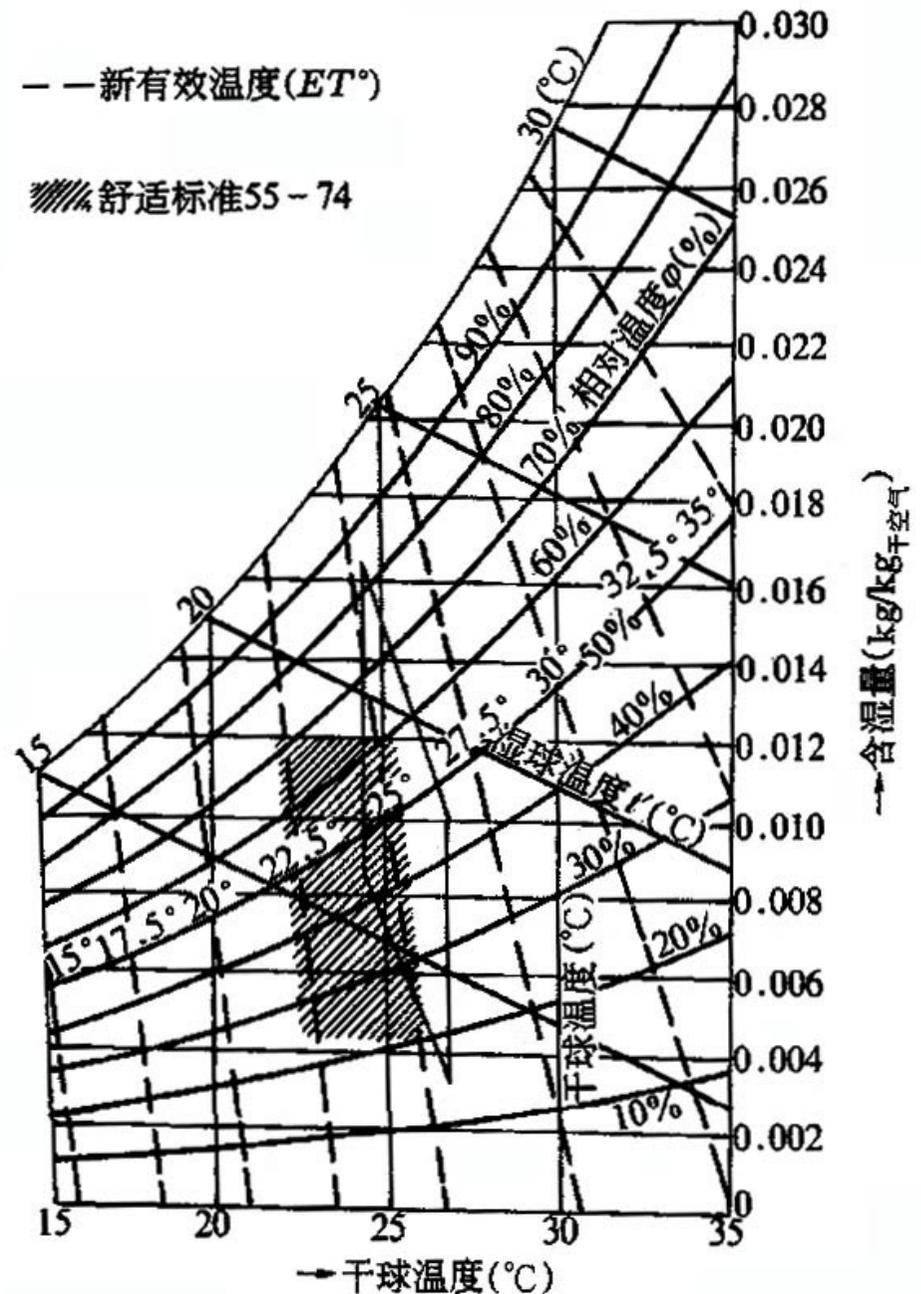
皮肤湿润度

皮肤表面饱和
水蒸汽分压力

SET*下饱和
水蒸汽分压力

ASHRAE舒适区

- 对于穿轻薄服装，坐着工作，空气流速较低的情况， SET^* 就等于 ET^* 。
- 坎萨斯州立大学实验条件：0.6~0.8 clo坐着
- 55-74条件：0.8~1clo坐着但活动稍大



(3) 标准有效温度SET*



$\text{SET}^*=24^{\circ}\text{C}$

其它稳态热环境评价指标

- 合成温度
- 当量温度
- 主观温度

合成温度

- 米森纳尔德1931年提出概念，1948年形成公式
- 特点：包含了辐射的影响（ET未考虑），但未考虑空气流动的影响
- 干球合成温度： $T_{res} = 0.47 T_a + 0.53 T_r$
- 英国的特许建筑设备工程师学会(CIBS)1978年把干球合成温度作为推荐指标。低风速下为： $T_{res} = 0.5 (T_a + T_r)$

当量温度

- Dufton于1932年提出概念：一个均匀封闭体的温度，在该封闭体内，一个高550mm直径190mm的黑色圆柱体的散热量与其在实际环境中的散热量相等。
- 综合空气温度、平均辐射温度和空气流速的影响
- Bedford的实验回归公式

$$T_{eq} = 0.522T_a + 0.478T_r - 0.21\sqrt{v}(37.8 - T_a)$$

主观温度

- 目的：寻求既考虑了更全面的影响因素，又要有简单的表现形式，同时希望把活动量和衣着条件的影响与物理环境因素分开
- Mc Intyre等1975年总结的回归公式：
- $v < 0.1\text{m/s}$ 时： $T_{sub} = 0.56T_a + 0.44T_r$
- $v > 0.1\text{m/s}$ 时：

$$T_{sub} = \frac{0.44T_r + 0.56[5 - (5\sqrt{10v} - T_a)]}{0.44 + 0.56\sqrt{10v}}$$
$$= \frac{T_g + 2.8(1 - \sqrt{10v})}{0.44 + 0.56\sqrt{10v}}$$

主观温度

- 已知衣着和活动量条件下，舒适的主观温度是：

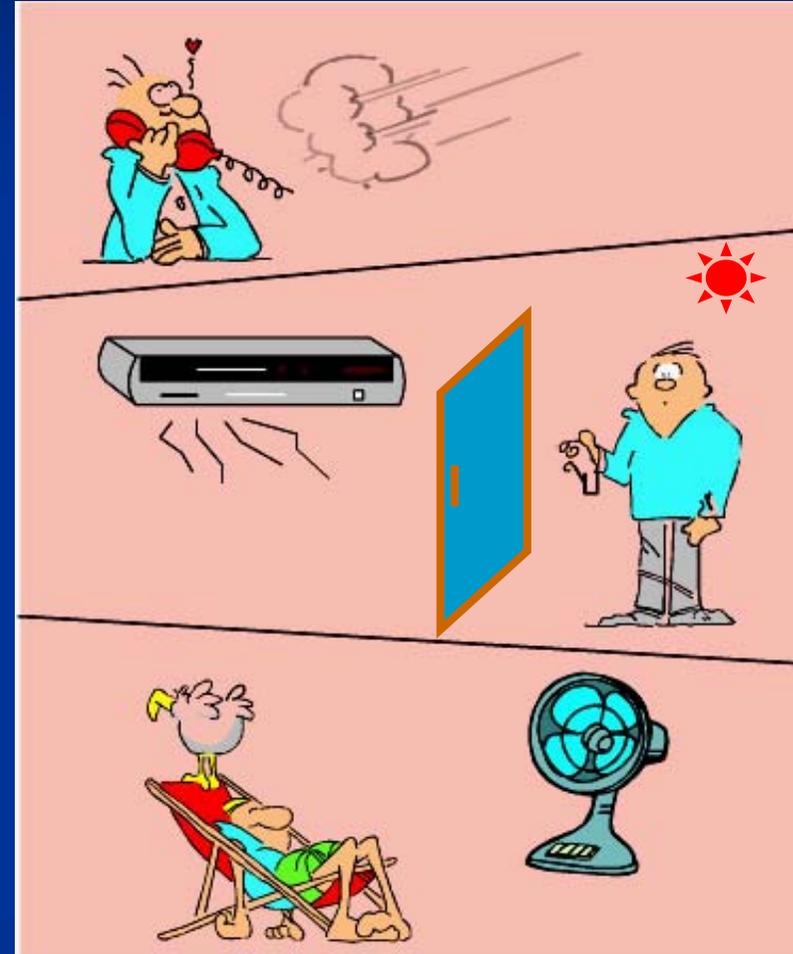
$$T_{sub} = 33.5 - 3I_{cl} - (0.08 + 0.05I_{clo})M$$

- 适用范围： $50 < M < 150 \text{ W/m}^2$ ， $0 < I_{cl} < 1.5$

人体对动态热环境的反应

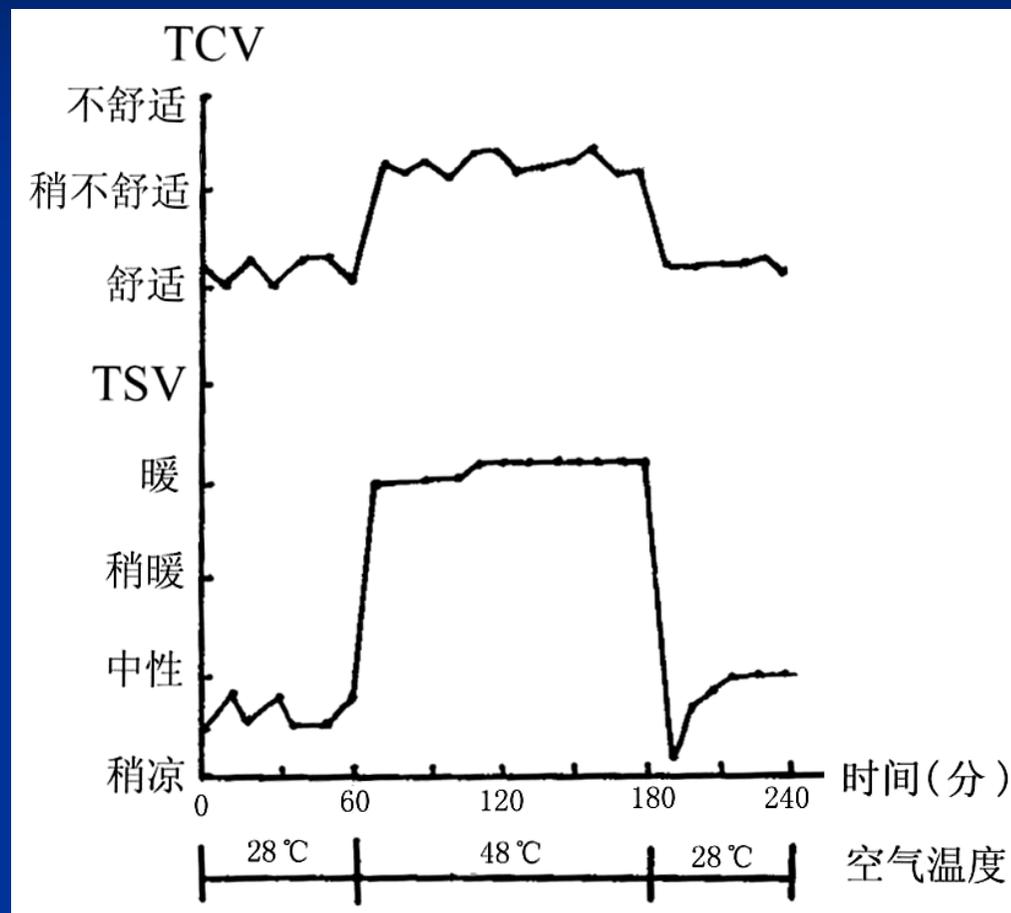
人体对动态热环境的反应

- 什么是动态热环境？
 - 非空调环境
 - 在温度不同的空间之间穿行
 - 使用摇头电风扇
 - 变温变风速的空调方式
- 人对动态与稳态热环境反应不同的机理
 - 热感觉的适应性
 - 核心温度和皮肤温度变化的不一致性



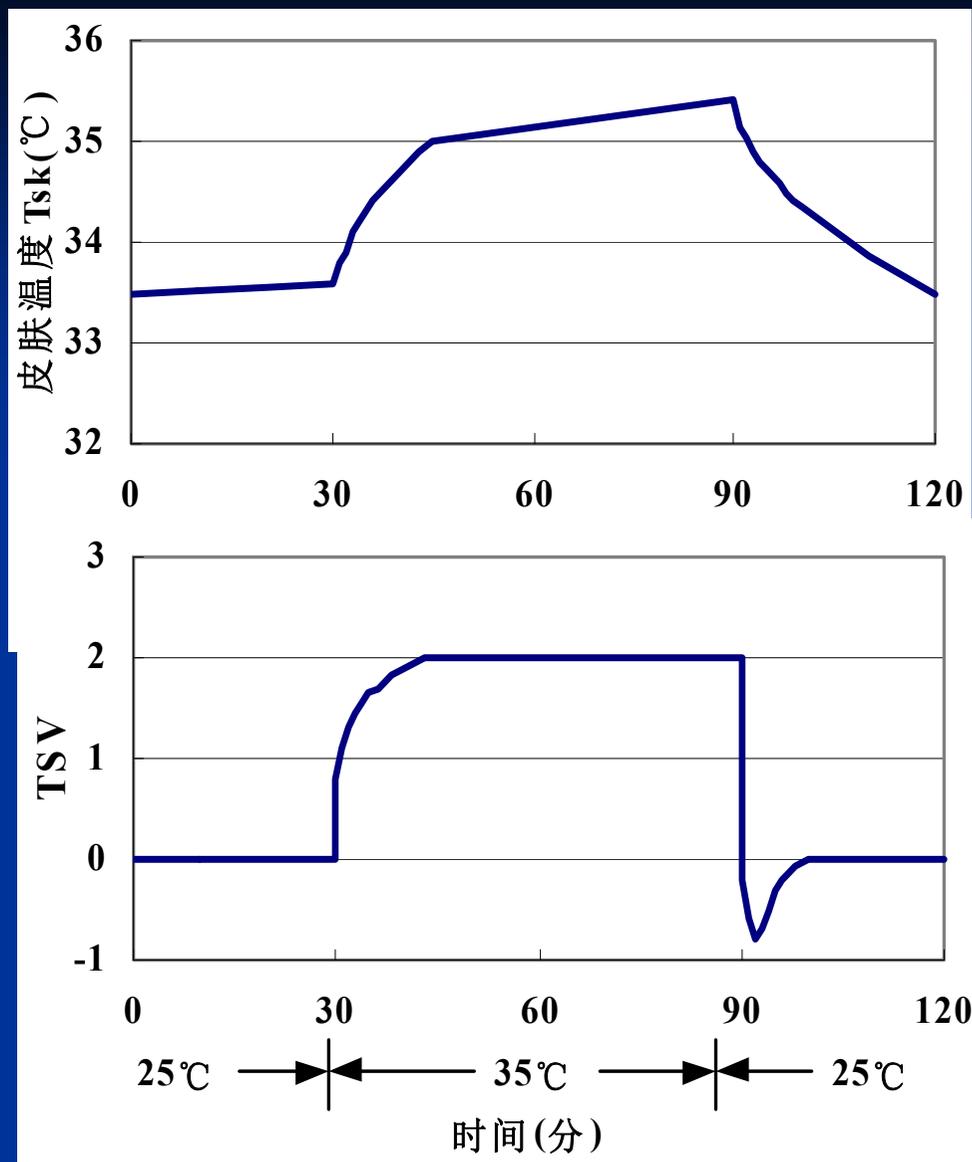
对突变温度环境的反应

- Gagge 的发现：人处于突变的环境空气温度时，尽管皮肤温度和核心体温的变化需要好几分钟，但热感觉却会随空气温度的变化马上发生变化。
- 由中性—冷/热，感觉滞后
- 由冷/热—中性，感觉超前



对突变温度环境的反应

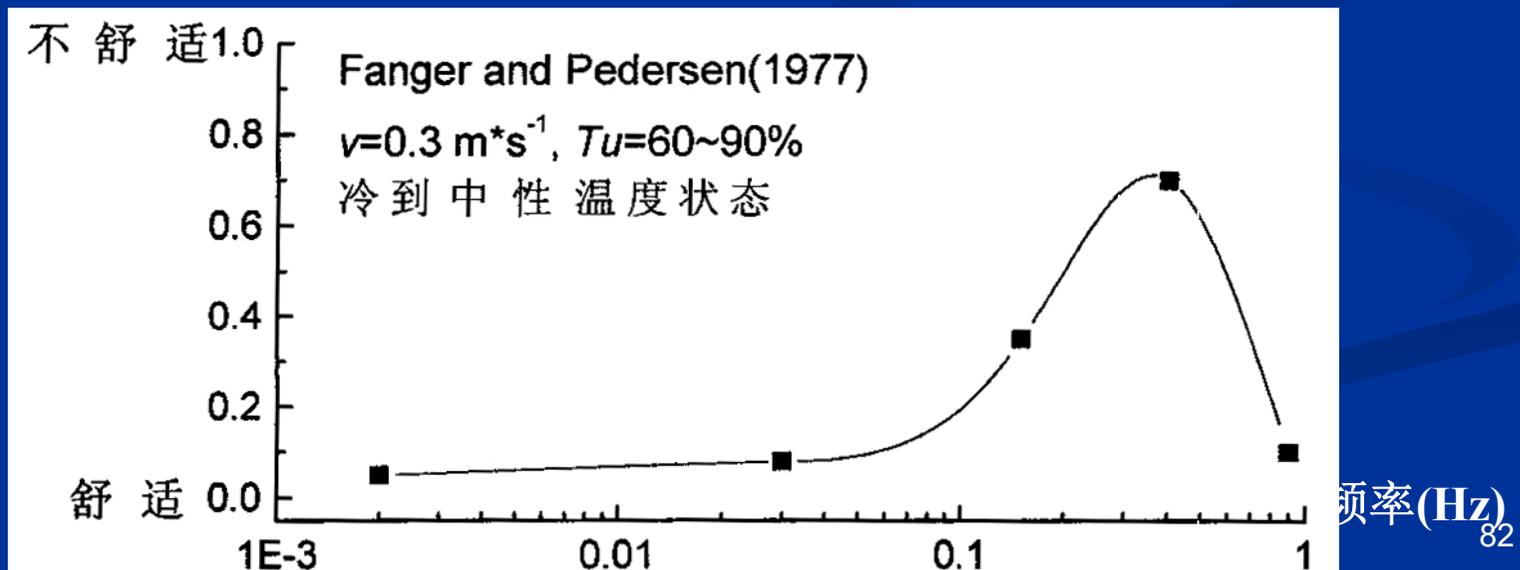
- 清华实验，证实了热感觉与皮肤温度的分离现象：
 - 中性—热，感觉滞后
 - 热—中性，感觉超前



突变温度对TSV和皮肤温度的影响实验(clo=0.6)

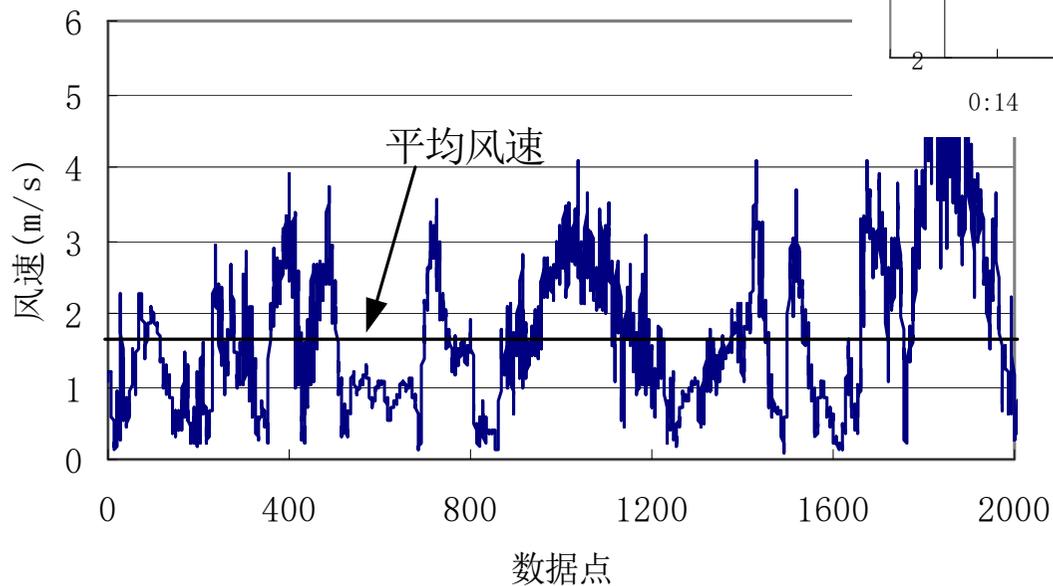
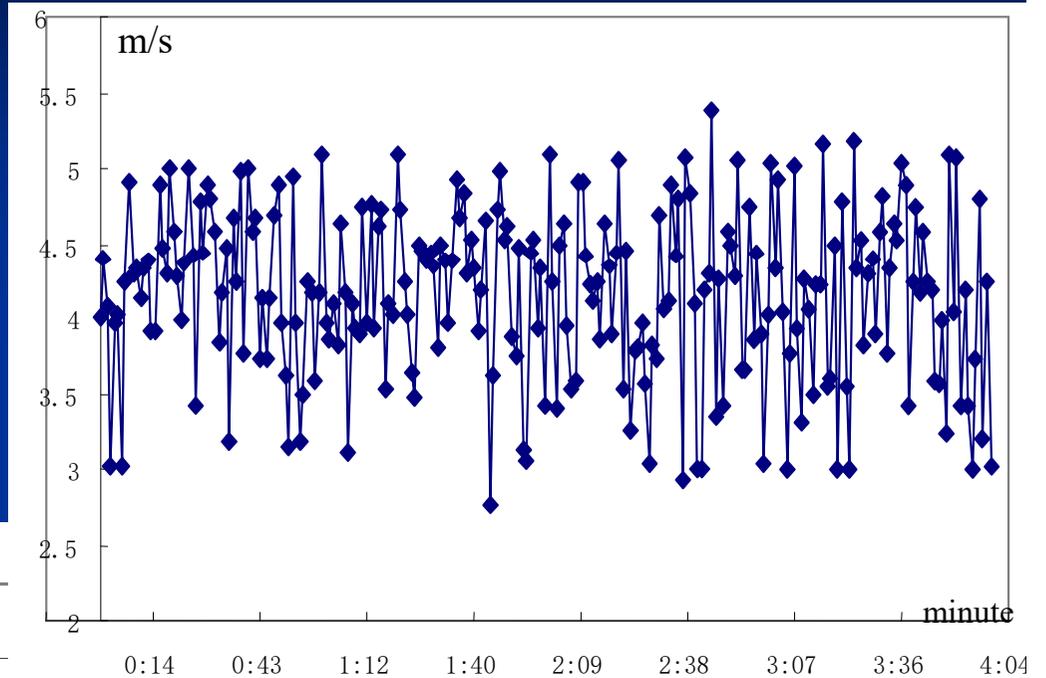
人体对变化风速的反应

- 现有的研究成果
 - 对摇摆风扇的接受程度优于固定风扇
 - 动态风能够改善“中性-热”环境下人体热感觉
 - 气流的脉动频率对人体热感觉有影响
 - 人体最敏感区： Fanger 0.3-0.5 Hz, Arens 0.7-1 Hz



不同类型风的风速变化

固定风扇的机械风



自然风

不同类型风的频谱特征

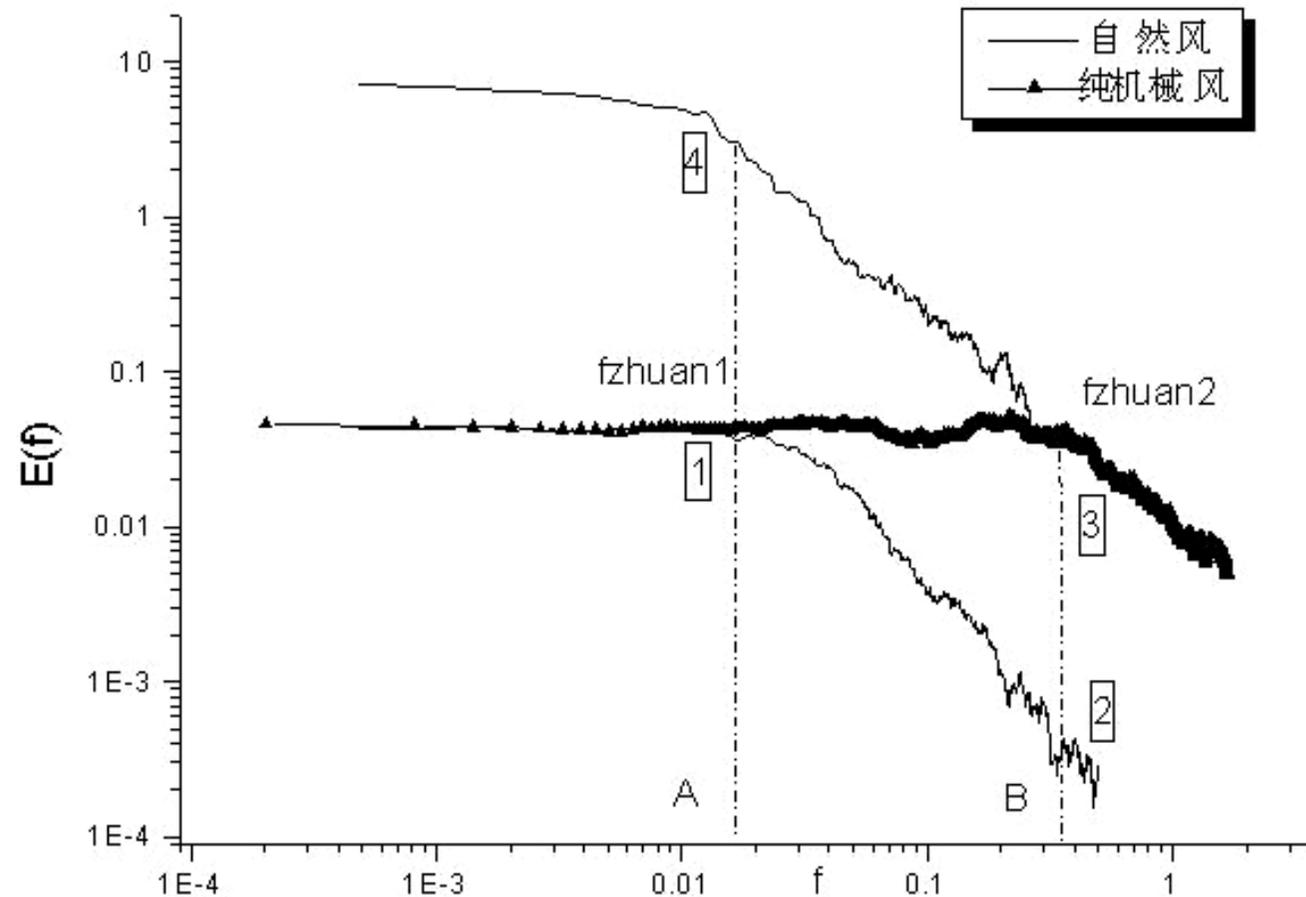
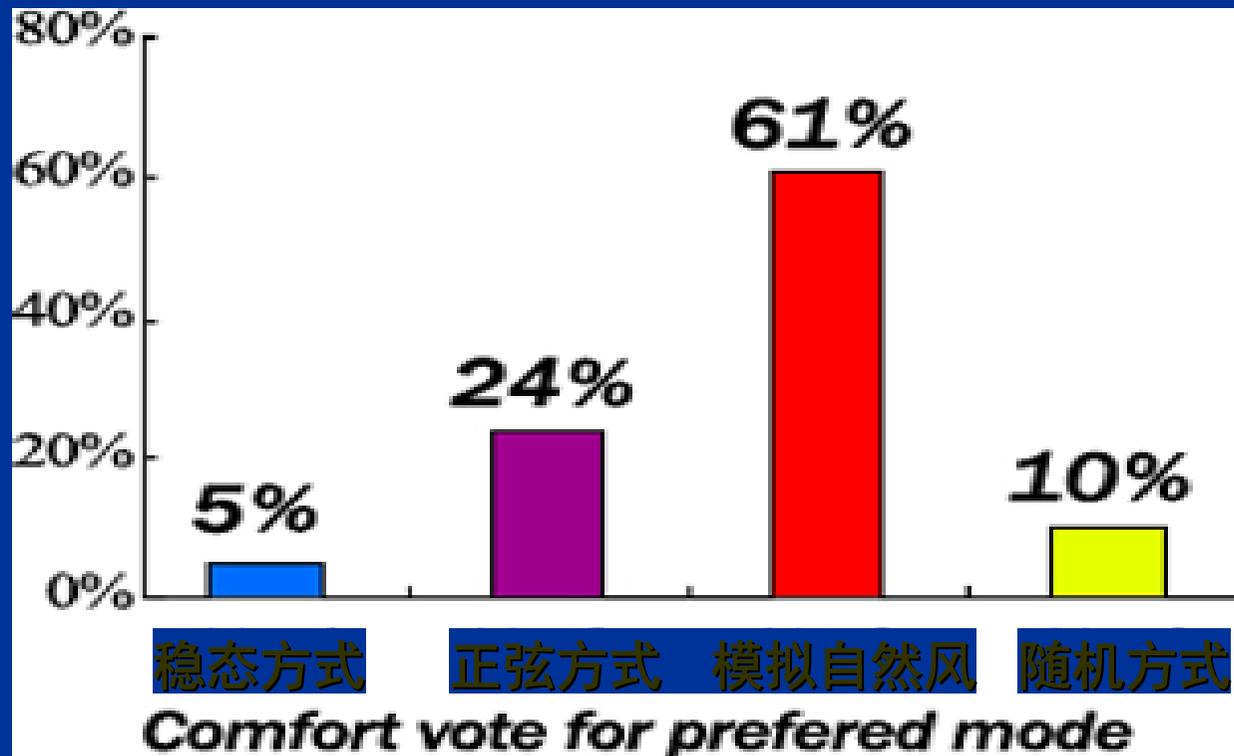


图 4-17 自然风和机械风能谱图

人体对不同类型脉动风速的接受程度实验（清华2000）

接受度



过渡区热指标RWI/HDR

- 美国运输部提出的人体在过渡空间环境的热舒适指标，适用于候车空间环境设计。
- 对一种活动状态过渡到另一状态的处理：
 - 未考虑过渡过程热感觉的“超越”和“滞后”现象
 - 代谢率M要经过6分钟才能达到最终活动状态下的稳定代谢率。其间代谢率与时间呈线性关系。
 - 出汗状态以及人的活动扰动气流的变化会导致服装热阻改变，要经过6分钟才能达到新的稳定值，其间服装热阻与时间呈线性关系。

过渡区热指标RWI/HDR

- 相对热指标 RWI: 针对较热环境

- 当 $P_a \leq 2269$ Pa时

$$RWI = \frac{M(\tau)[I_{cw}(\tau) + I_a] + 6.42(t_a - 35) + RI_a}{234}$$

- 当 $P_a \geq 2269$ Pa时

$$RWI = \frac{M(\tau)[I_{cw}(\tau) + I_a] + 6.42(t_a - 35) + RI_a}{65.2(5858.44 - P_a)/1000}$$

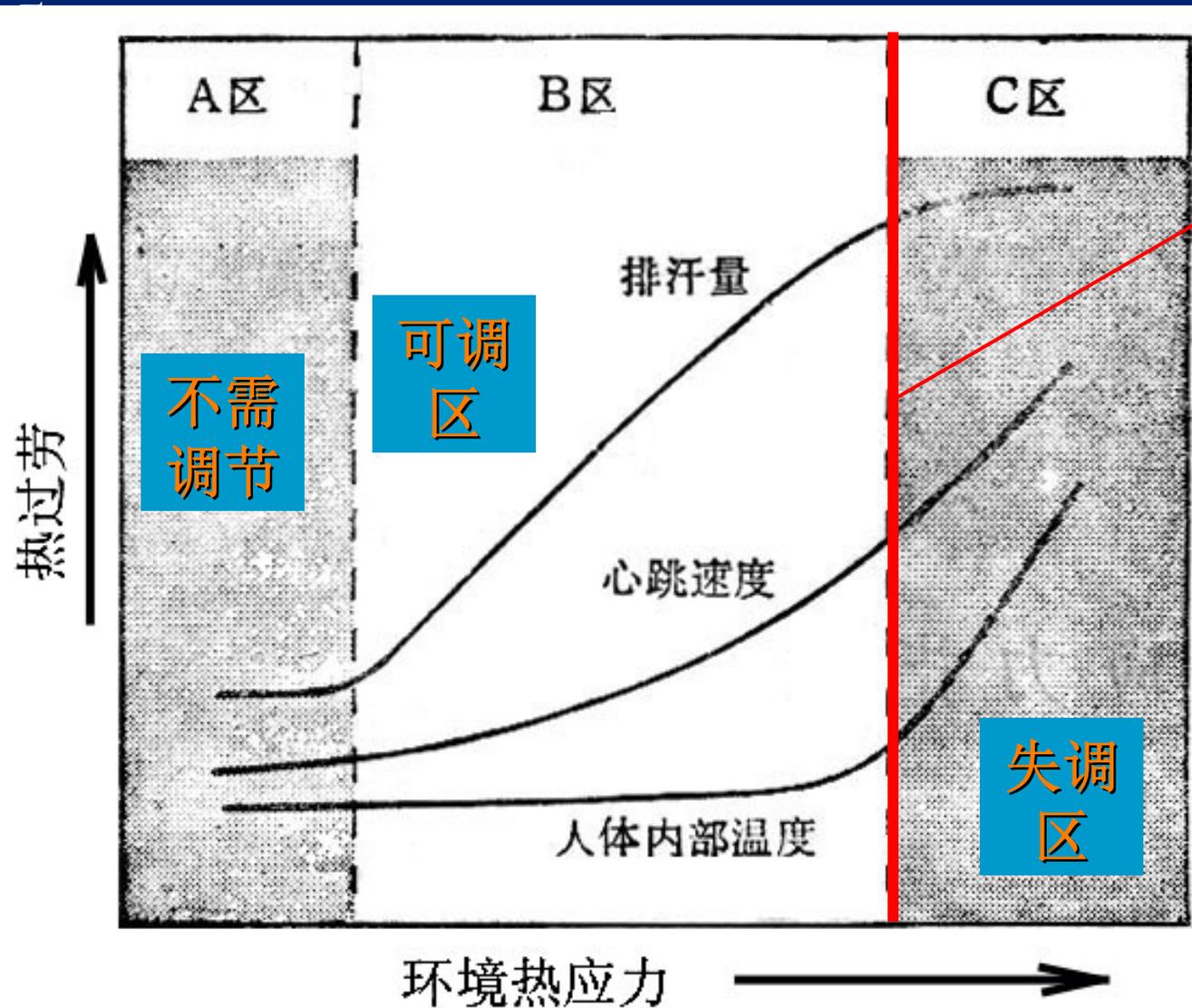
RWI 的分度与 ASHRAE 热感觉标度之间的关系

热感觉	ASHRAE 热感觉标度	相对热指标 RWI
暖	2	0.25
稍暖	1	0.15
中性	0	0.08
稍凉	-1	0.00

人体从外界
获得的辐射热
(不包括与空气
等温的墙表面)

其他热湿环境的物理度量

环境应力与人体的调节能力



疲劳
极限

热舒适指标够用吗？

- 在具有热失调危险的、远偏离热舒适区的状态下，前面的热舒适指标是不够的，例如：
 - 高温车间
 - 寒冷工作空间
- 典型指标
 - 高温环境：热应力指数，WBGT
 - 低温环境：风冷却指数

热应力指数HSI (Heat Stress Index)

Belding & Hatch, 1955

- 假定皮肤温度恒定在 35°C 的基础上，在蒸发热调节区内，认为所需要的排汗量为 E_{req} 等于代谢量减去对流和辐射散热量，呼吸散热不计， E_{max} 的上限值为 390 W/m^2 ：
- $$\text{HSI} = E_{req} / E_{max} \times 100$$

HSI	暴露 8 小时的生理和健康情况的描述
-20	轻度冷过劳
0	没有热过劳
10~30	轻度至中度热过劳。对体力工作几乎没有影响，但可能减低技术性工作的效率。
40~60	严重的热过劳，除非身体健壮，否则就免不了危及健康。需要适应环境的能力。
70~90	非常严重的热过劳。必须经体格检查以挑选工作人员。应保证摄入充分的水和盐分。
100	适应环境的健康年轻人所能容忍的最大过劳。
大于 100	暴露时间受体内温度升高的限制。

湿黑球温度WBGT

Wet-Bulb-Globe Temperature

- 适用于室外炎热环境，考虑了室外炎热条件下太阳辐射的影响，广泛用于评价户外作业热环境

- 与空气温度、空气湿度、平均辐射温度及空气运动有关

自然湿球温度

黑球温度

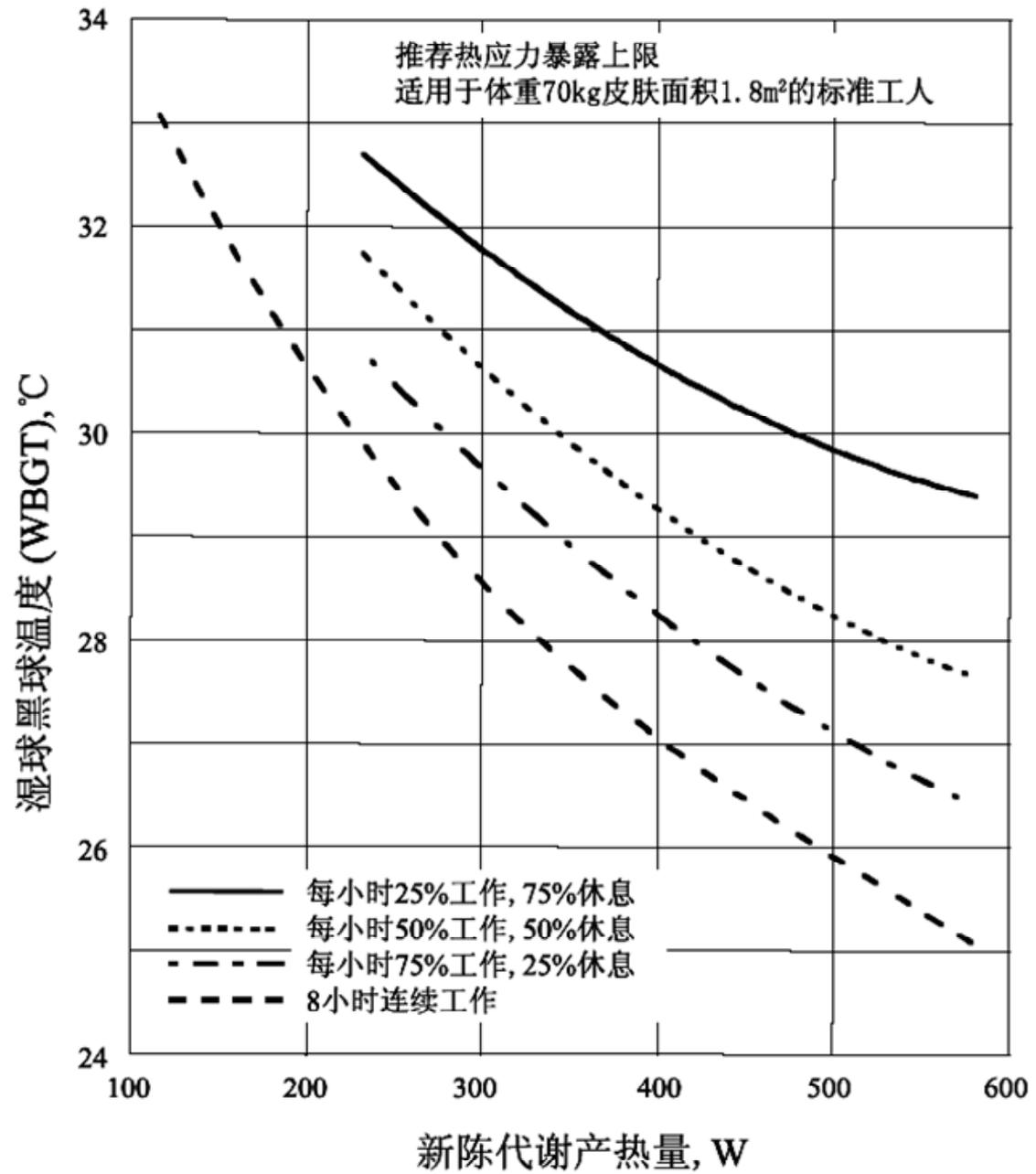
- 表达式

$$WBGT = 0.7T_{nwb} + 0.2T_g + 0.1T_a$$

- 标准定义

$$WBGT^* = 0.8288T_a + 0.0613\bar{t}_r + 0.007377Q_s + 13.8297\varphi - 8.7284V^{-0.0551}$$

- 回归公式

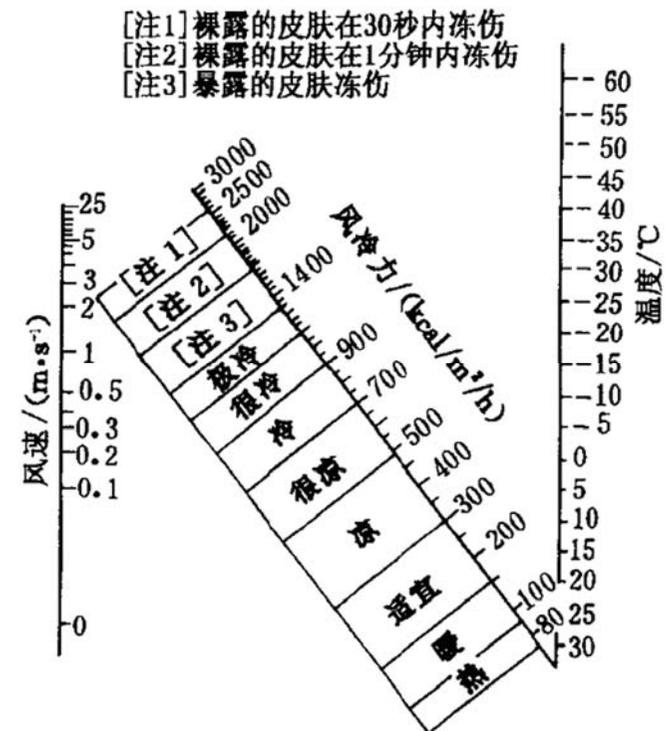


风冷却指数WCI (Wind Chill Index)

- 定义：皮肤温度在33°C时皮肤表面的冷却速率

$$WCI = (10.45 + 10\sqrt{V_a - V_a})(33 - t_a)$$

WCI (kcal/m ² h)	生理效应
200	愉快
400	凉
600	很凉
800	冷
1000	很冷
1200	极度寒冷
1400	裸露的皮肤冻伤
2000	裸露的皮肤在 1 分钟内冻伤
2500	裸露的皮肤在半分钟内冻伤

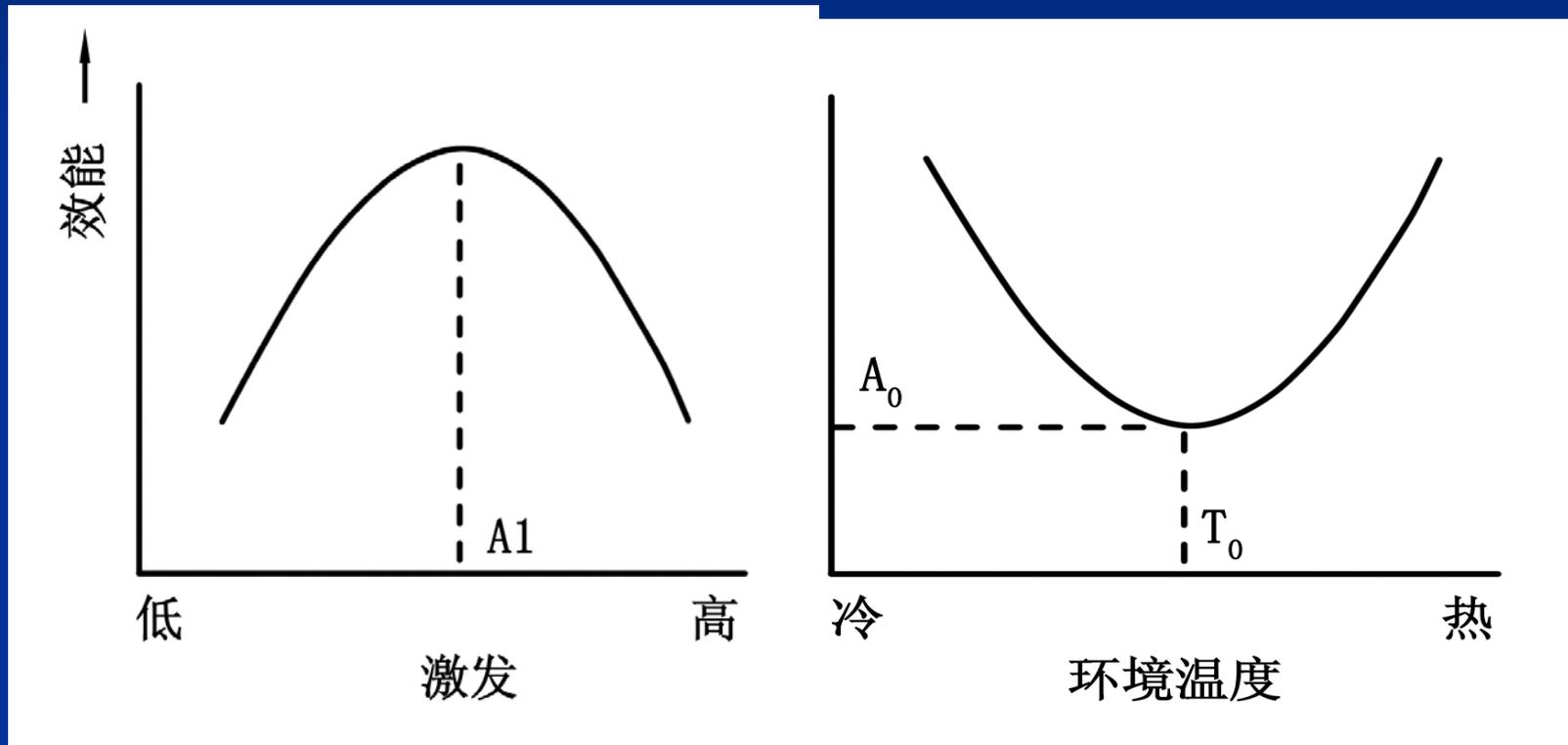


热环境与劳动效率

背景与机理

- 大量现场调查证实
 - 高温会降低劳动的效率
 - 寒冷影响肢体的灵活性
 - 温度偏离最佳值会增加事故发生率
- 机理： 激发的概念， 工作本身+物理环境
 - 中等激发时效率最高
 - 低激发导致人不清醒
 - 高激发导致不能全神贯注

“环境温度—激发—效能”的关系

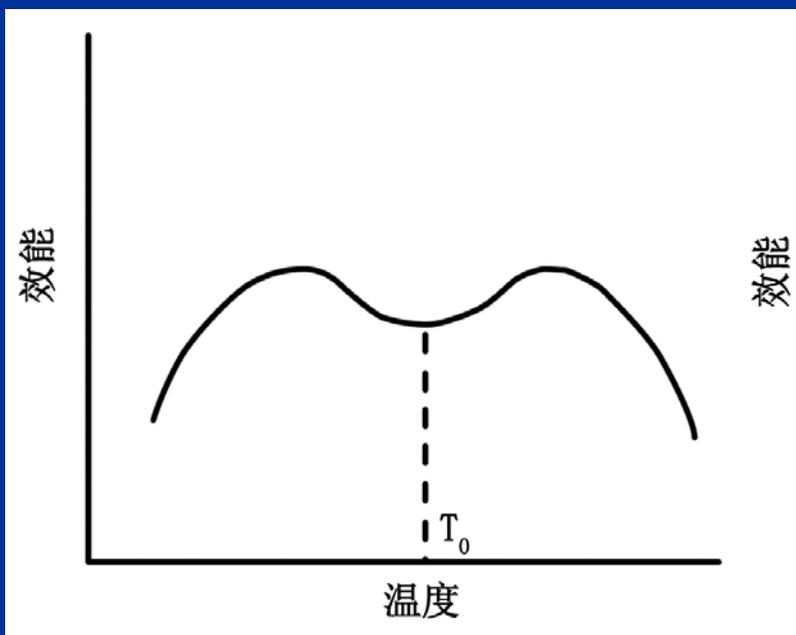


激发决定了工作效能

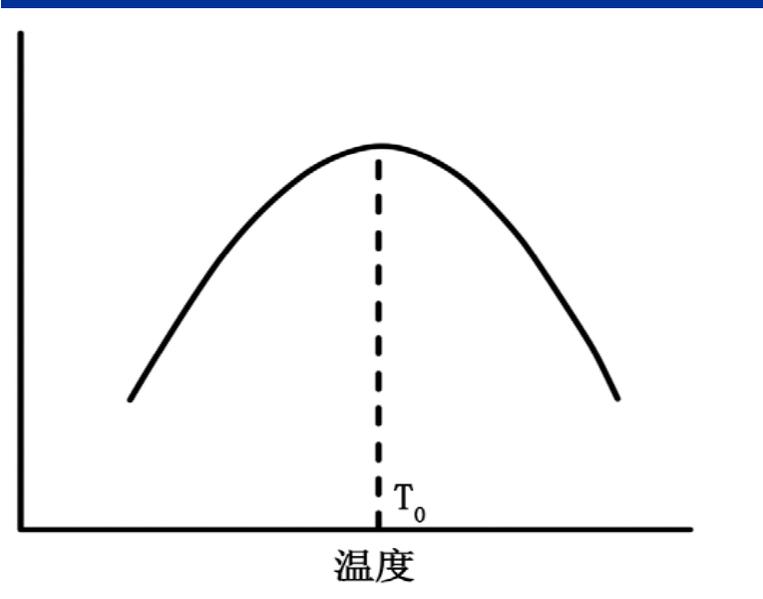
昏昏欲睡的环境？

理论效能与温度关系曲线

- T_0 为最小激发温度，接近、略高于热中性温度

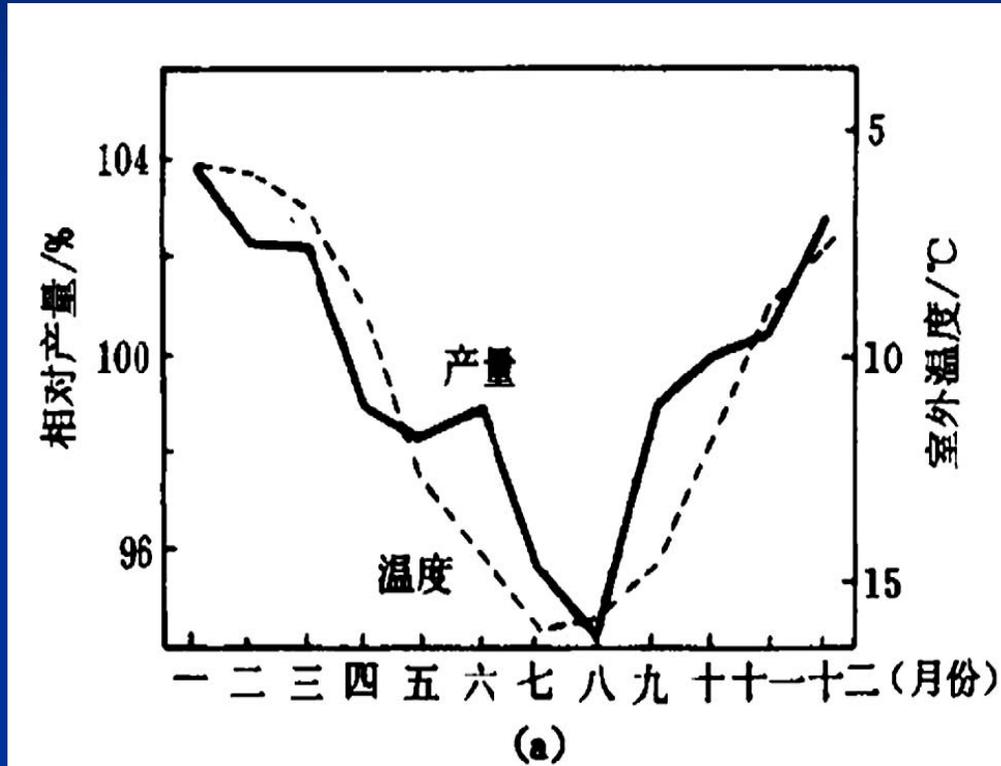


简单工作

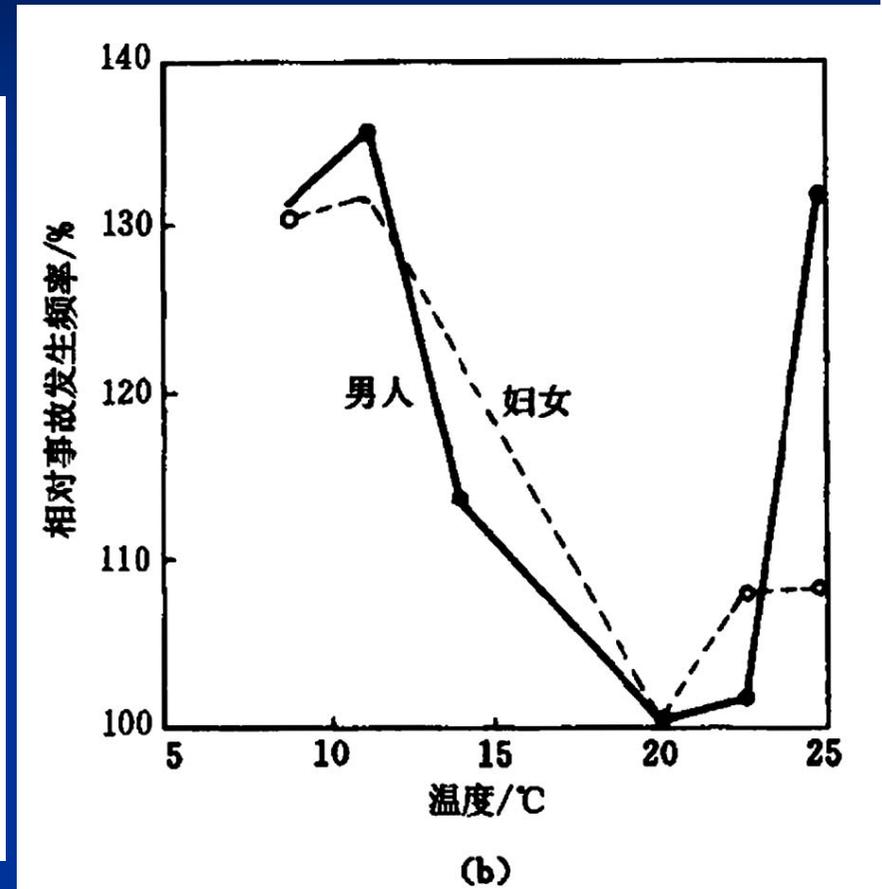


复杂工作

体力劳动与热环境

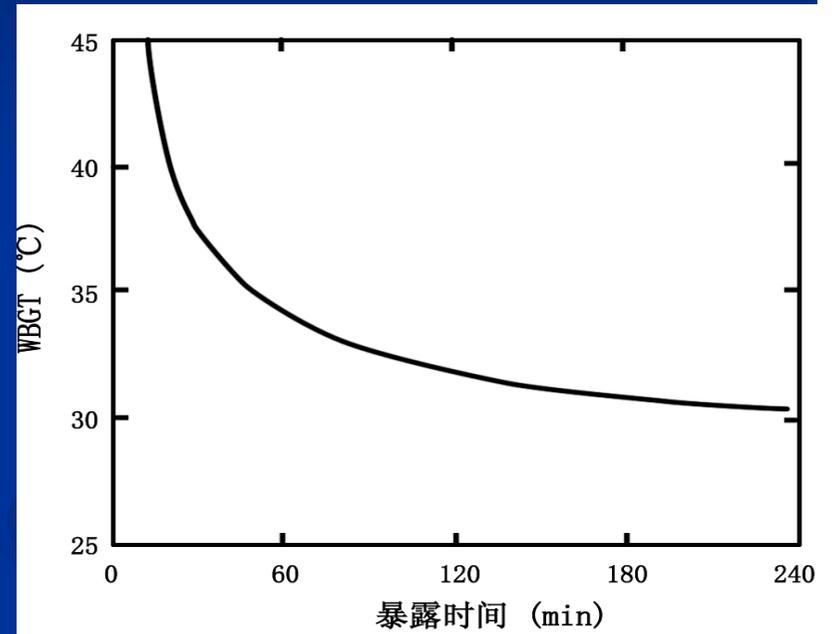
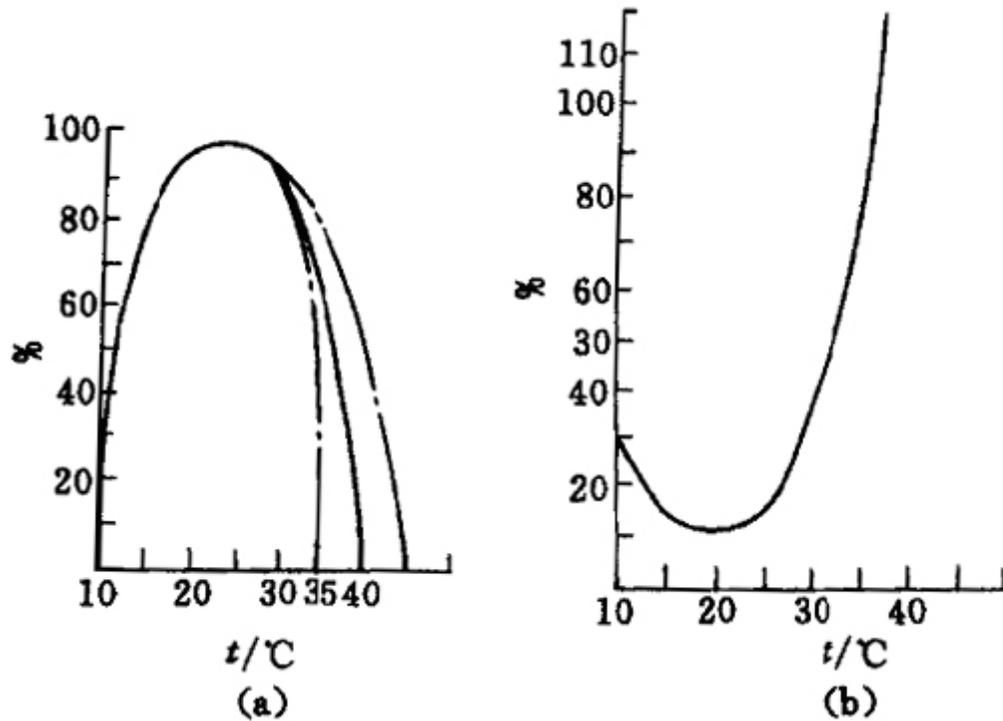


马口铁工厂



军火工厂

脑力劳动与热环境



气温对效率与相对差错的影响

不降低脑力劳动效率的温
度与暴露时间的关系

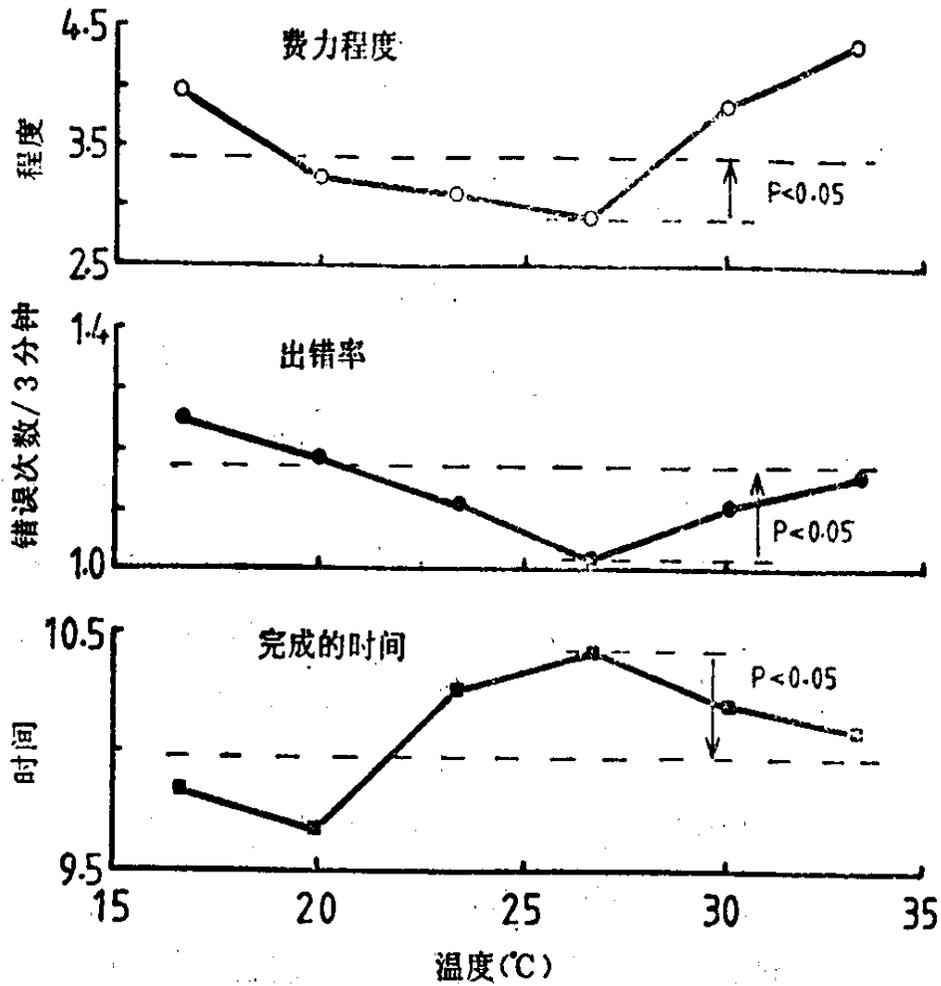


图 11.10 学习编制程序课本时作为室温函数的三种测量值的结果。受试者在 27.6°C 时的工作速度最慢, 出错率最低, 自己感觉到的费力程度也最低。该组人的舒适温度为 25°C——佩普勒和沃纳(1968)

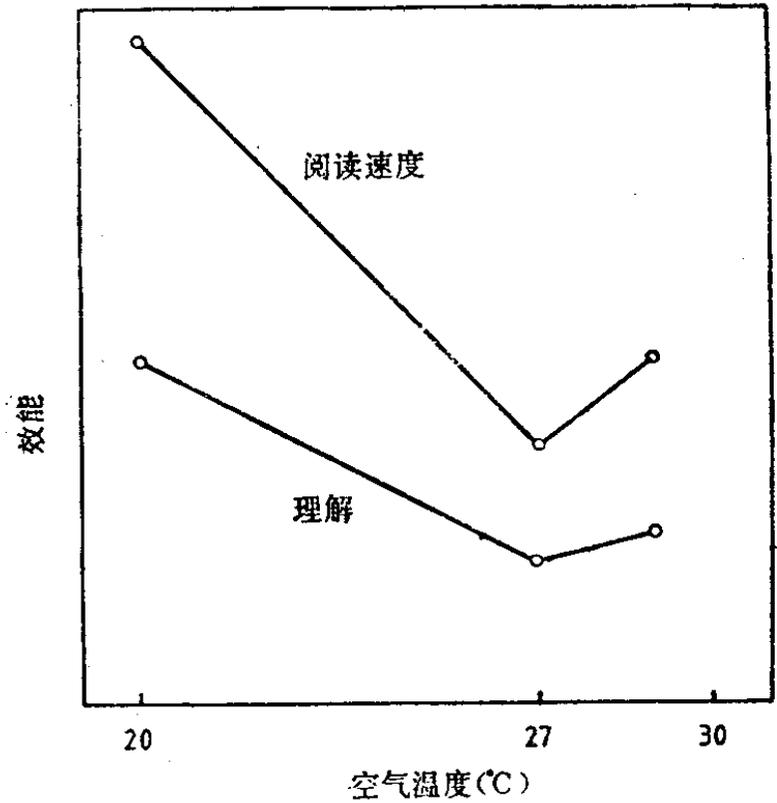


图 11.11 小学生的阅读和理解能力测验成绩随温度的变化——怀恩(1970)

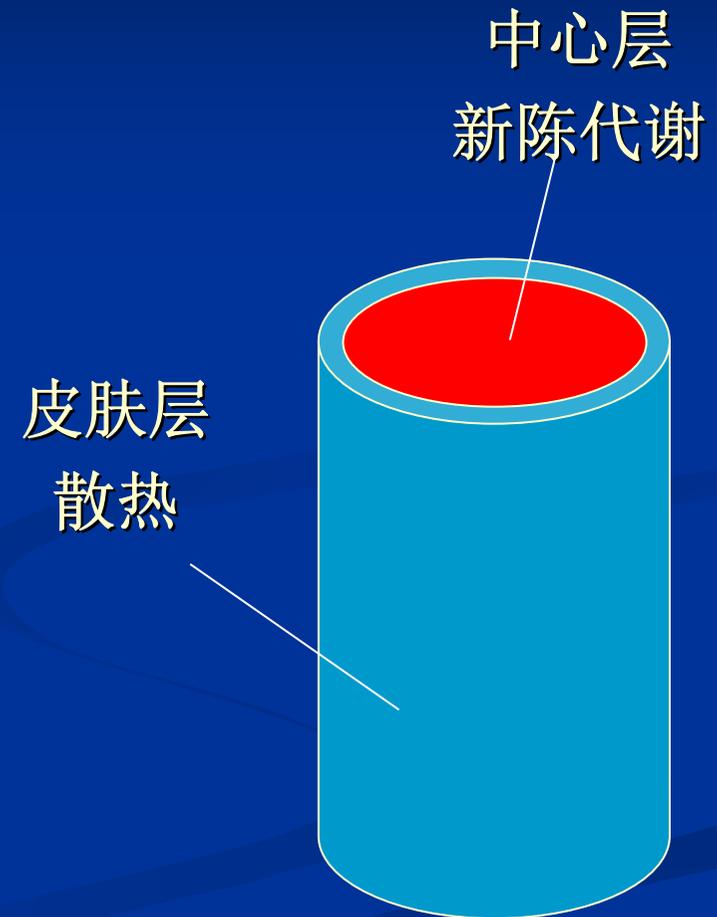
冷应力和工作效能

- 实验发现手的皮肤温度低于 15°C 时，关节变得僵硬灵巧性明显下降
- 实验发现手的皮肤温度低于 6°C 时出现麻木感觉
- 冷风有涣散精神作用，分散工作注意力
- 体温过低导致人过于激奋，降低需要持续集中注意力的工作的效能

人体热调节的数学模型

二节点模型, Gagge, 1970

- 分别将两部分按集总参数计算温度动态变化
- 人体平均温度为两部分温度的加权
- 平均体温低于 36.34°C 就不会出汗
- 皮肤温度低于 34°C , 核心温度同时低于 37°C 会出现冷颤, 增加代谢率



二节点模型, Gagge, 1970

- 中心层热平衡

$$M + \Delta M - W = C_{res} + E_{res} + (K + m_{bl}c_{bl})(t_{cr} - t_{sk}) + m_{cr}c_{cr} \frac{dt_{cr}}{d\tau}$$

冷颤增加
代谢率

传热系数, 血
流量和比热

- 皮肤层热平衡

$$(K + m_{bl}c_{bl})(t_{cr} - t_{sk}) = Q_{sk} + m_{sk}c_{sk} \frac{dt_{sk}}{d\tau}$$

传热系数, 血
流量和比热

皮肤表面总散热, 包
括对流、辐射和蒸发

二节点模型的应用

- 求出体温即可求得排汗率

$$E_{rsw} = c_{rsw} (t_b - t_{b,set}) e^{-(t_{sk} - 34)/10.7}$$

- 有前面的 E_{max} 关系可求出 w :

$$- w = (E_{rsw} + E_{dif}) / E_{max} = [E_{rsw} + 0.06(E_{max} - E_{rsw})] / E_{max}$$

- 由于应用了二节点模型，实际上**SET***可以考虑动态过程中的人体热状况。但由于舒适的主观评价实验是在稳态环境下做的，所以仍然不能用于评价动态热环境。