

# 第七章 能量代谢和体温调节

*Energy Metabolism and Body Temperature*

郭军 MD 教授

食品质量与安全系

A

B

## § 7-1 能量代谢 *Energy Metabolism*

新陈代谢 *Metabolism*

物质代谢 *Material metabolism*

同化作用 *assimilation* / 合成代谢

异化作用 *dissimilation* / 分解代谢

能量代谢 *Energy metabolism*

物质代谢伴随能量释放、转移和利用

# 1. 能量的来源

一切生命活动都需要能量

推动生命活动的能量来自哪里呢？

太阳能

化学能

食物中蕴藏的能量 — 化学能

碳水化合物、脂肪、蛋白质

及其他供能物质

高能磷酸键 *ATP*



## 三大供能营养素

□ Carbohydrate 淀粉、蔗糖、乳糖、葡萄糖

人体糖贮存量 150g (糖原、葡萄糖)

中国人 70% 的能量 → 淀粉

1 分子葡萄糖 → 36/38 个 ATP

红细胞 → “廉洁公务员的典范”

靠无氧酵解获取能量

大脑 → 主要由葡萄糖的有氧氧化 供能

对缺氧、缺葡萄糖异常敏感，可导致意识障碍，昏迷！

骨骼肌 → 先分解葡萄糖和糖原，再分解脂肪酸

## □ Fat/Lipids

定脂/组织脂肪 → 类脂：磷脂、胆固醇

动脂/贮存脂肪 → 98%为甘油三酯

占体重 ~10% ~50% ~

饥饿是提供能量

能量值/能量系数 最高

Fat → FA + glycerol → 糖代谢途径

CoA → ↓ β 氧化

乙酰CoA → tricarboxylic acid cycle

## □ Protein

protein → Amino acid → Amino group →  $\text{NH}_4^+$



$\alpha$ -keto acid



Glucose



TAC

## □ ATP 和 高能键物质

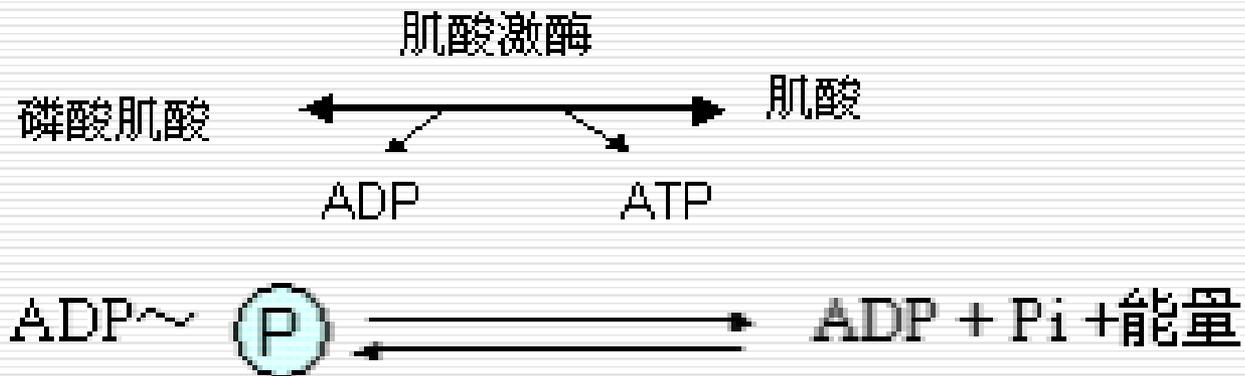
ATP

其他核苷三磷酸：UTP，CTP，GTP

磷酸肌酸

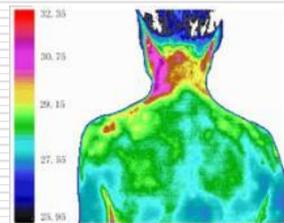
高能硫脂键

ATP循环与高能磷酸键



## 2 食物能量在机体内的流程 掌握

摄入能  $IE$  / 总能  $GE$



- $a$  基础代谢,  $b$  体力活动
- $c$  精神活动
- $d$  发育, 怀孕, 泌乳
- $e$  贮存能量, 组织修复



北京 2004年国庆节

$ME = \text{食物总能} - \text{粪能} - \text{尿能} - \text{表面能} - \text{燃气能}$

### 3. 食物能值/ 供能营养素能量系数

能值 *energy values*, *energy factors*, *calories* /卡价

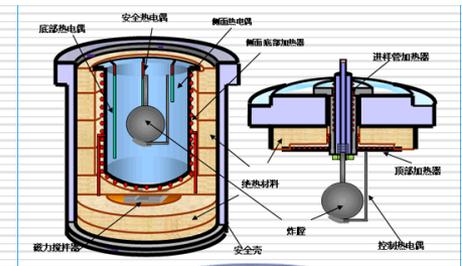
单位:  $\text{kJ/g}$ ,  $\text{kcal/g}$ ;  $1\text{kcal} = 4.184\text{kJ}$

□ 物理能值/卡价、总能 $G_E$ 、燃烧热  $p124$

□ 生理能值/卡价

□ 氧热价  $\text{kJ/L}$

□ 呼吸商 (RQ)



	总能 燃烧热 kJ/g	能量系数 ME kJ/g (kcal/g)	氧热价 kJ/L
膳食纤维 DF	17	8.2/8 (2)	
可利用碳水化合物 AC	17	16.7/17 (4)	21
蛋白质 Protein	23.5	16.7/17 (4)	18.8
脂肪 Fat	39.8	37.7/38 (9)	19.7
乙醇 Alcohol	29	29 (7)	

复习题：

可利用碳水化合物、膳食纤维、蛋白质和脂肪的ME能值（ME能量换算系数）分别是多少？

## 食物能量换算实例 单位: % or g/100g

□ 某品牌多维奶粉 单位: g/100g(%)

水分 3%; 灰分 4.5%; 蛋白质 20%;

脂肪 23.5%

问每100g可提供多少能量? KJ (kcal)

列出计算公式。

□ 魔芋精粉

水分 12.2 %; 蛋白质 4.6%; 脂肪 0.1%;

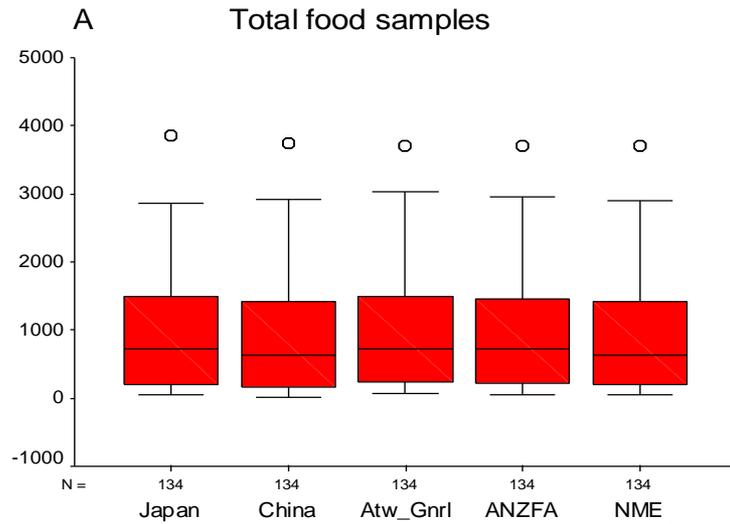
膳食纤维 74.5%; 灰分 4.3%

问100g能量密度是多少? KJ (kcal)

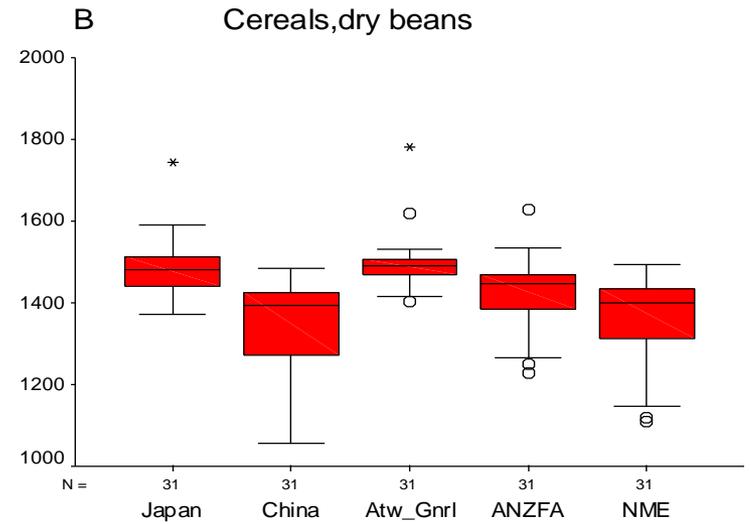
提示: TC 和 AC 分别是多少?

# 食物能量换算系统 拓展

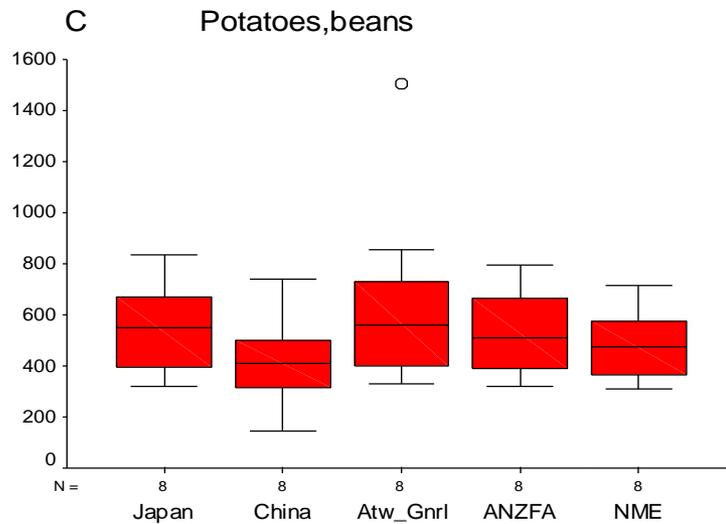
- (1) 阿特氏通用系数  $Atwater's$   
 $Atwater$   $W O$  1896 年
- (2) 食物特异系数系统  $ME_{specific}$   
 $Merrill \& Watt$  1953 (1973)
- (3) 欧式通用系数系统  $ME_{Europe}$   
 $Southgate \& Durnin$  1970
- (4) 改进的代谢能系统  $ME_{modified}$
- (5) 净代谢能为基础的能量系数系统  $NE$
- (6) 其它总能为基础的经验公式



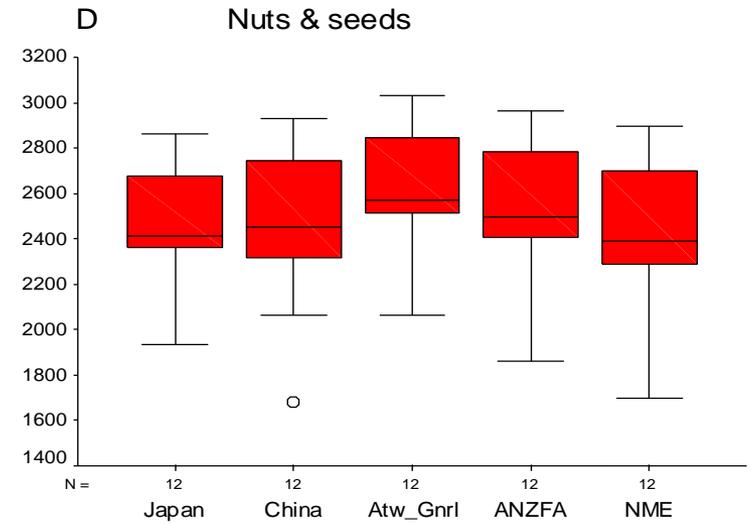
Energy Systems



Energy Systems



Energy Systems



Energy Systems

Fig 2 Data Profile of Energy Values for Systems Comparison

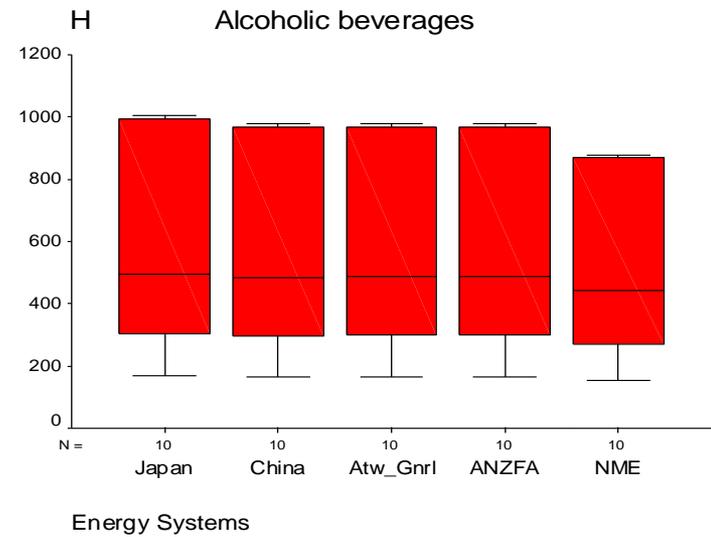
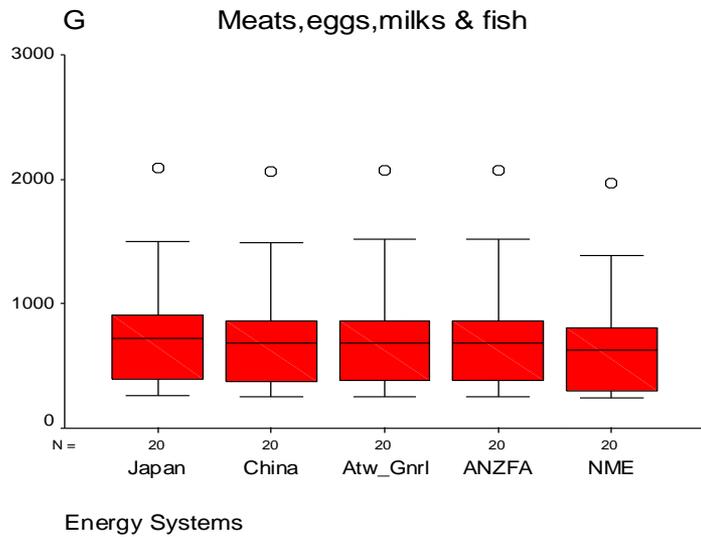
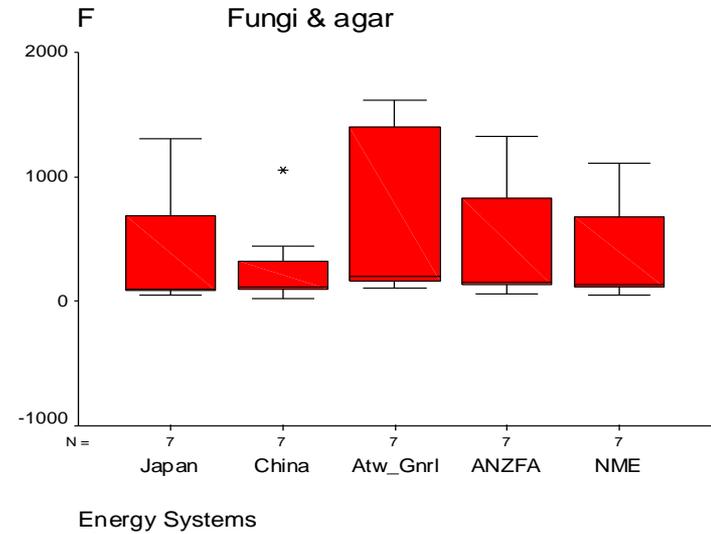
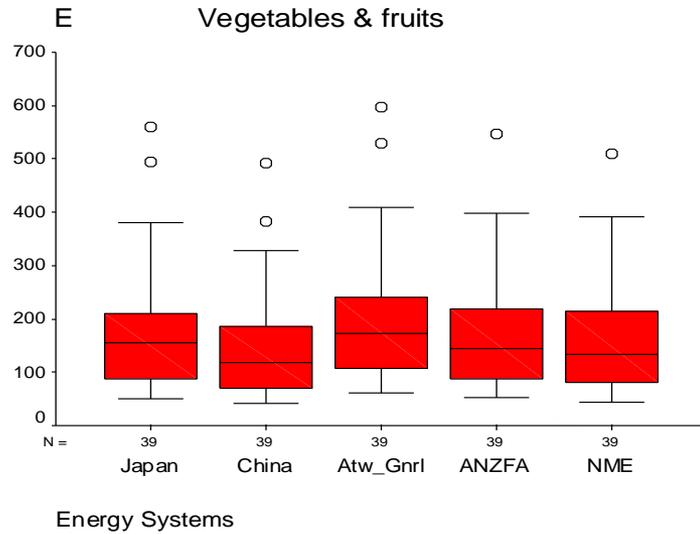
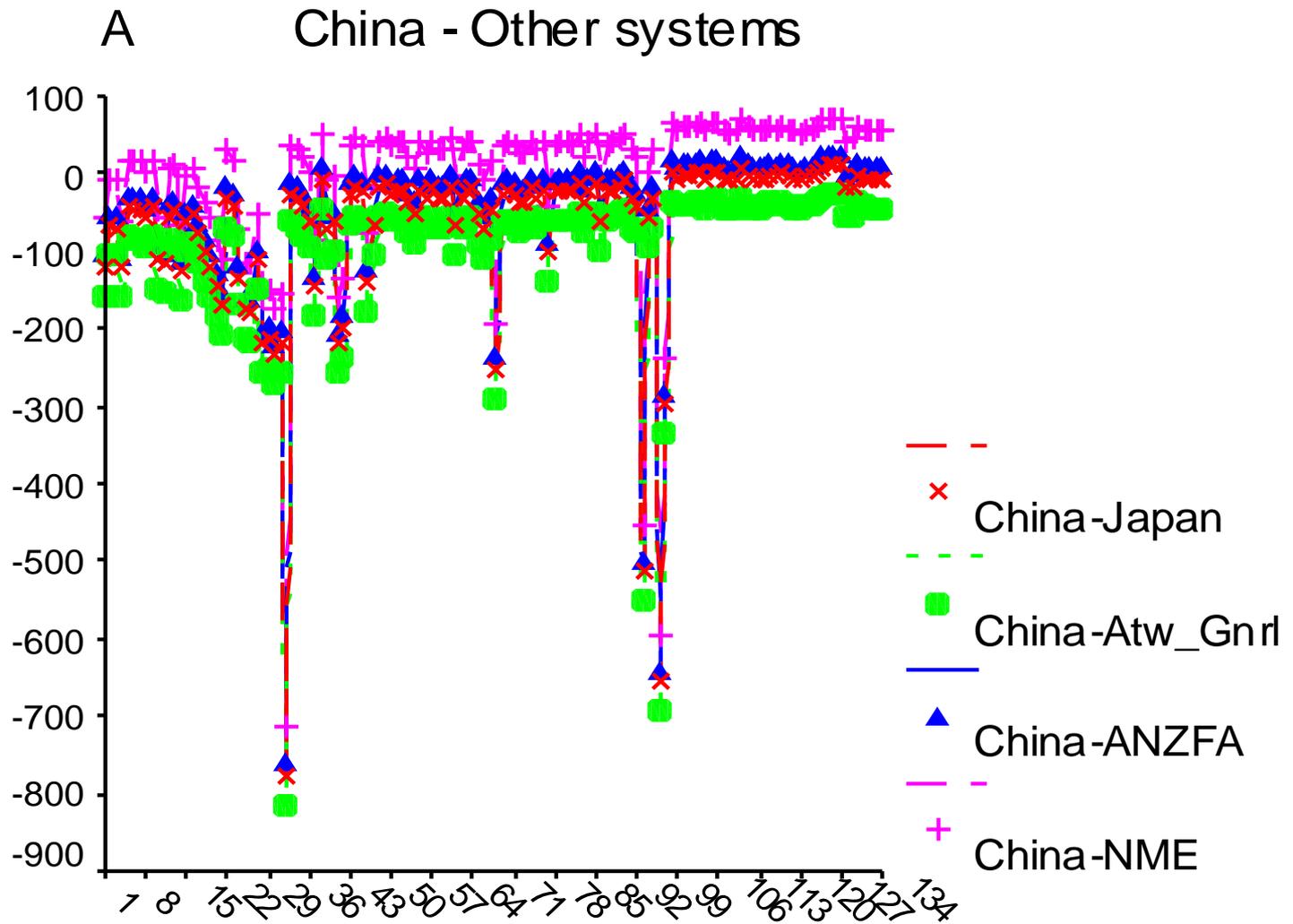
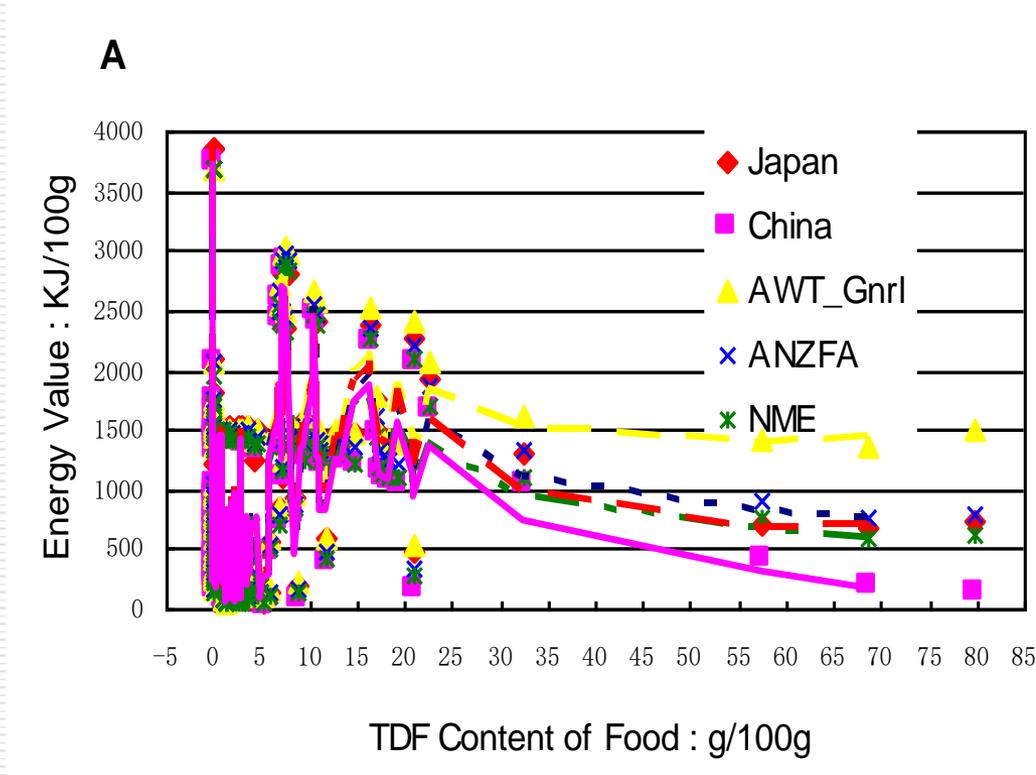


Fig 2 Data Profile for Energy Conversion Systems Comparison



**Fig 4 Absolute differences of Energy Values for Systems Comparison**



**Fig 1 Dispersion Tendency of Energy Systems**

**A** Total food samples, TDF content 0~80g/100g;

**B** Samples with TDF 5~25g/100g. The line of each system goes through the mean point of every nearest two values of corresponding system.

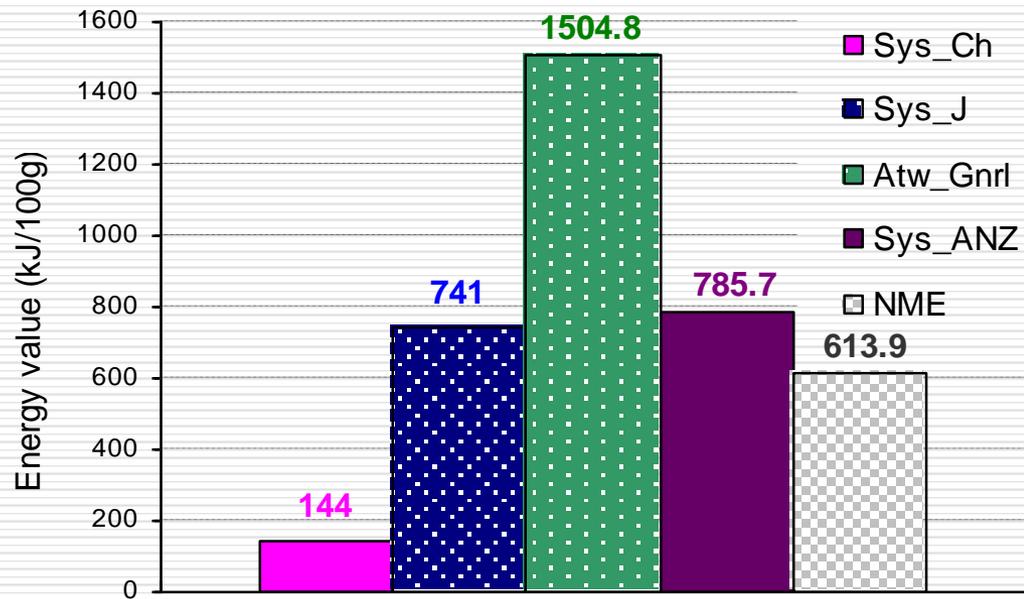


图 不同系统换算的魔芋粉能量值

Fig 3 Calculated Energy Values of Konjak Powder

# 食物能量换算系统

(1) 阿特氏通用系数 *Atwater's*

*Atwater* W O 1896 年

	kcal/g	kJ/g
碳水化合物	4	17
脂肪	9	37
蛋白质	4	17
乙醇	7	29

$$ME_{Atwater} = protein \times 17 \text{kJ/g} + fat \times 37 \text{kJ/g} + TC \times 17 \text{kJ/g} + alcohol \times 29 \text{kJ/g}$$

## (2) 食物特异系数系统 *ME specific* *Merrill & Watt 1953 (1973)*

不同食物来源的同种营养素，能量系数不同。

如 动物蛋白和植物蛋白

同种谷物加工精度不同，能量系数不同

如 全麦粉和出粉率70%的面粉

目前至少有50套系数

$$ME_{Atwater} = protein \times f_{pro_1} + fat \times f_{fat_1} + TC \times f_{TC_1} + \dots + protein \times f_{pro_n} + fat \times f_{fat_n} + TC \times f_{TC_n}$$

(3) 欧式通用系数系统  $ME_{Europe}$

*Southgate & Durnin 1970*

碳水化合物

可利用  $\sim AC$   $17 \text{ kJ/g}$

不可利用  $\sim UC/DF$   $0 \text{ kJ/g}$

$$ME_{Europe} = \text{protein} \times 17 \text{ kJ/g} + \text{fat} \times 37 \text{ kJ/g} \times AC \times 16 \text{ kJ/g} + \text{alcohol} \times 29 \text{ kJ/g}$$

## (4) 改进的代谢能系统 $ME_{modified}$

*Livesey G 1990*

*ANZFA 1999*

*FAO 1998 2003*

膳食纤维  $DF \rightarrow 8 \text{ kJ/g} , 2 \text{ kcal/g}$

$$ME_{modified} = \text{protein} \times 17 \text{ kJ/g} + \text{fat} \times 37 \text{ kJ/g} + \text{AC} \times 16 \text{ kJ/g} + \text{DF} \times 8 \text{ kJ/g} + \text{alcohol} \times 29 \text{ kJ/g}$$

## (5) 净代谢能为基础的能量系数系统

*Livesey G 2001*

	<i>kJ/g</i>	<i>kcal/g</i>
蛋白质	13.3	3.18
脂肪	36.6	8.75
可利用碳水化合物	16.7	4
膳食纤维	6	1.5
乙醇	26	6.2

$$NME = \text{protein} \times 13.3 \text{kJ/g} + \text{fat} \times 36.6 \text{kJ/g} \times AC \times 16.7 \text{kJ/g}^* + DF \times 6 \text{kJ/g} + \text{alcohol} \times 26 \text{kJ/g}$$



2005年6月15 - 18日 第三届营养与保健食品专业会议  
北京潇湘大厦

G Livesey 博士 (英国) 著名营养学家  
ME<sub>modified</sub> 和NME系统的提出者

## 4. 能量平衡 — 与肥胖

□ 能量平衡：

指机体**摄入能量**与**消耗能量**之间的平衡。

是一种**动态平衡**。

□ 能量**零平衡**：摄入的食物能量 = 人体所需能量

□ 能量**负平衡**：摄入能量少于所需能量，体重减轻

□ 能量**正平衡**：大于所需能量，体重增加

## 肥胖的直接因素/营养因素

- 是由于 **能量摄入** 和 **消耗** 失去平衡 造成的。
- **身体质量指数/体质指数** *Body Mass Index, BMI*

### 肥胖程度的一种表示方法

$$BMI = \frac{\text{体重}}{\text{身高}^2} (kg / m^2)$$

*BMI* 等级:

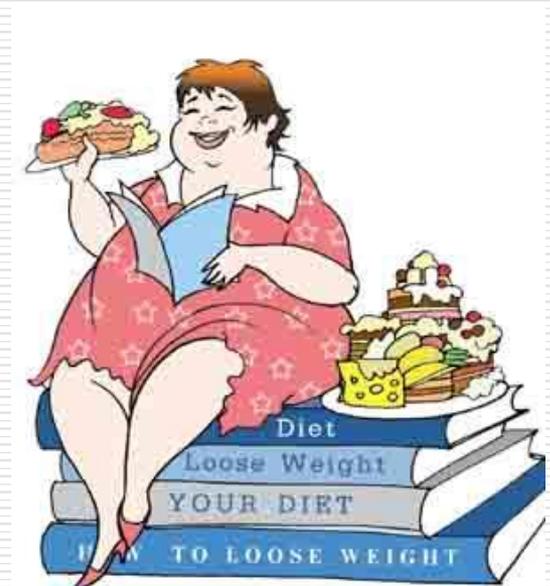
20~25 理想体重

25~30 I 级肥胖

30~35 II 级肥胖

35 ~ III 级肥胖

30.5 → 31.8



## 5. 人体能量代谢的测定

□ 原理：能量守恒

□ 能量代谢率 *energy metabolic rate*

单位时间内机体释放的能量

□ 方法：

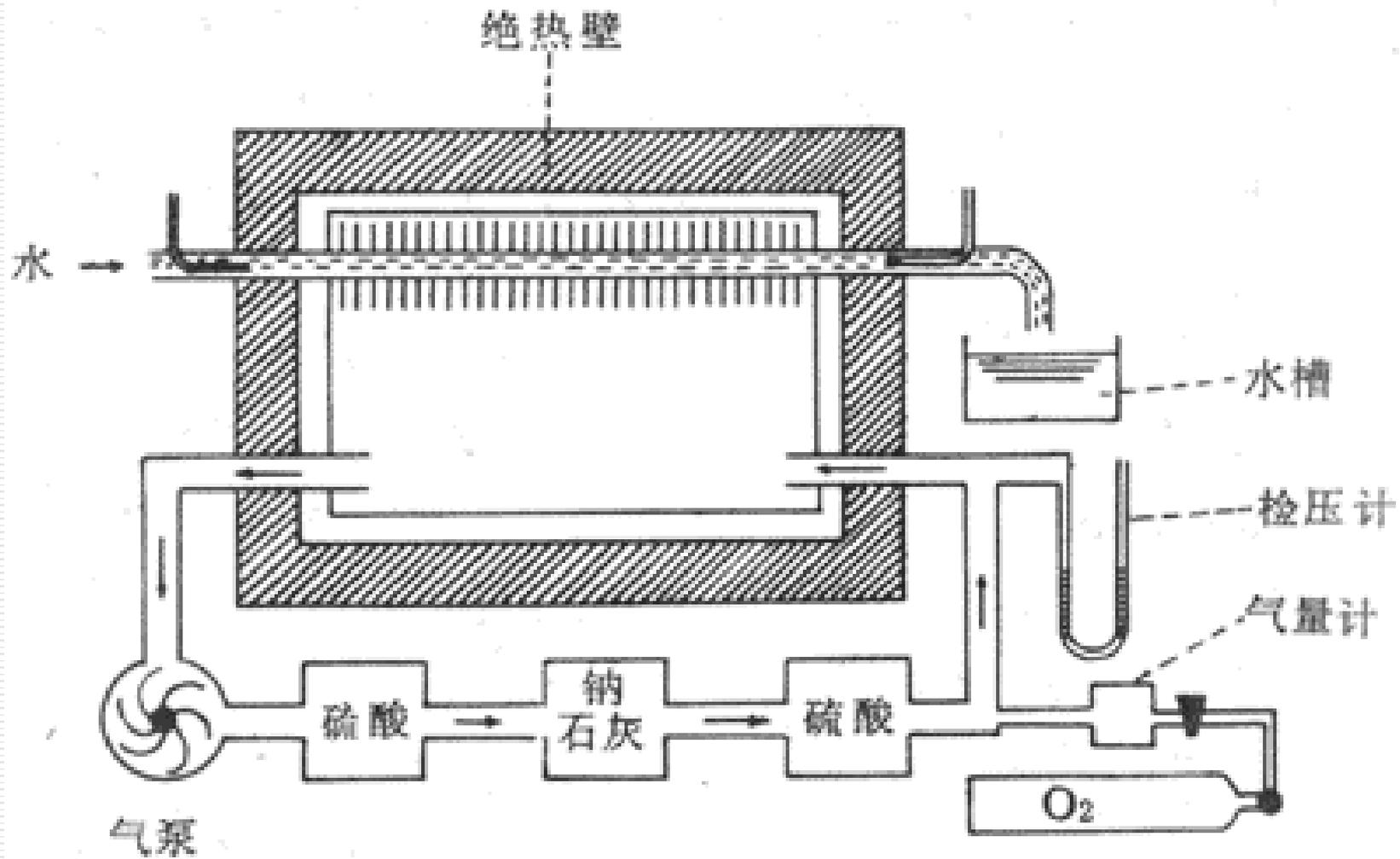
直接测定 *direct calorimetry*

间接测定 *indirect calorimetry*

## 5.1 直接测热法 *direct calorimetry*

收集人体在一定时间内释放的体热

代谢室



直接测热装置示意图

## 5.2 间接测热法 *indirect calorimetry*

□ 原理 化学反应的定比定律

### (1) 食物记录法

$$\begin{aligned} ME &= \text{机体所需能量 (可利用部分)} \\ &= \text{食物总能} - \text{粪能} - \text{尿能} \\ &\quad - \text{表面能} - \text{燃气能} \end{aligned}$$

必需有营养素的能量系数



## (2) 耗氧量法、呼吸商法

必须解决的问题：

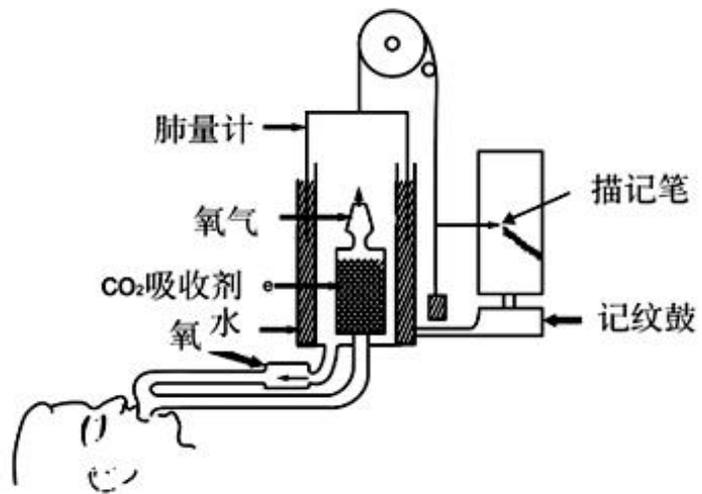
i 氧热价 (已知、有数据表)

每克食物

耗氧量



$CO_2$ 生成量  $\rightarrow$  呼吸商  $RQ$



## 呼吸商 RQ

$$RQ = \frac{\text{产生的 CO}_2 \text{ mol 数}}{\text{消耗的 O}_2 \text{ mol 数}} = \frac{\text{产生的 CO}_2 \text{ ml 数}}{\text{消耗的 O}_2 \text{ ml 数}}$$

(1) 糖  $RQ = 1.0$

(2) 脂肪  $RQ = 0.71$

(3) 蛋白质  $RQ$  推测值为 0.80

(4) 混合食物 0.71-1.00 之间

(5) 非蛋白呼吸商

非蛋白QR	糖	脂肪	氧热价kJ/L
0.707	0.00	100.0	
0.71	1.10	98.9	19.62
0.72	4.75	95.2	19.64
0.73	8.40	91.6	19.69
0.74	12.0	88.0	19.74
0.89	64.2	35.8	20.51
0.90	67.5	32.5	20.56
0.91	70.8	29.2	20.61
0.92	74.1	25.9	20.67
0.93	77.4	22.6	20.71
0.94	80.7	19.3	20.77
0.95	84.0	16.0	20.82
0.96	87.2	12.8	20.87
0.97	90.4	9.58	20.93
0.98	93.6	6.37	20.98
0.99	96.8	3.18	21.03
1.00	100.0	0.0	21.08

教材 152页

## 6. 人体能量 需要/消耗

三个方面：

6.1 基础代谢 *basal metabolism*

6.2 机体活动 体力、精神活动、维持姿态

6.3 食物特殊动力作用

## 6.1 基础代谢 *basal metabolism*

基础代谢率 *basal metabolic rate*, *BMR*

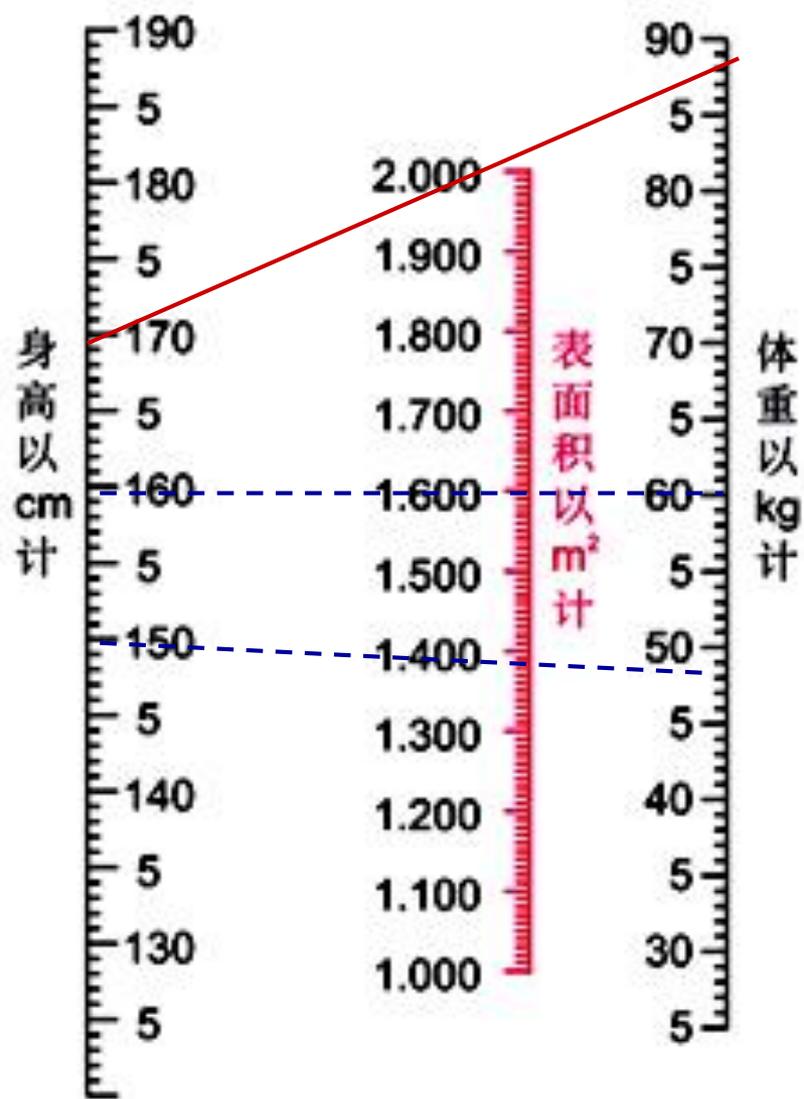
状态：静卧、清醒、空腹 (12~14h)

室温：18~25°C

单位： $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ;  $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{h}$

体表面积

$$= 0.0061 \times \text{身高 (cm)} + 0.0128 \times \text{体重 (kg)} - 0.1529$$



## 人体产热量和体表面积的关系

测定人数	平均体重 (kg)	体重范围	$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot 24\text{h}$
6	48.7	40-50	3860
41	53.4	50-60	3827
164	64.5	60-70	3881
24	74.7	70-80	3868
8	83.7	80-90	3868
平均			3860

## □ 影响BMR因素/能量代谢的因素

(1) 年龄

(2) 性别

(3) 体表面积

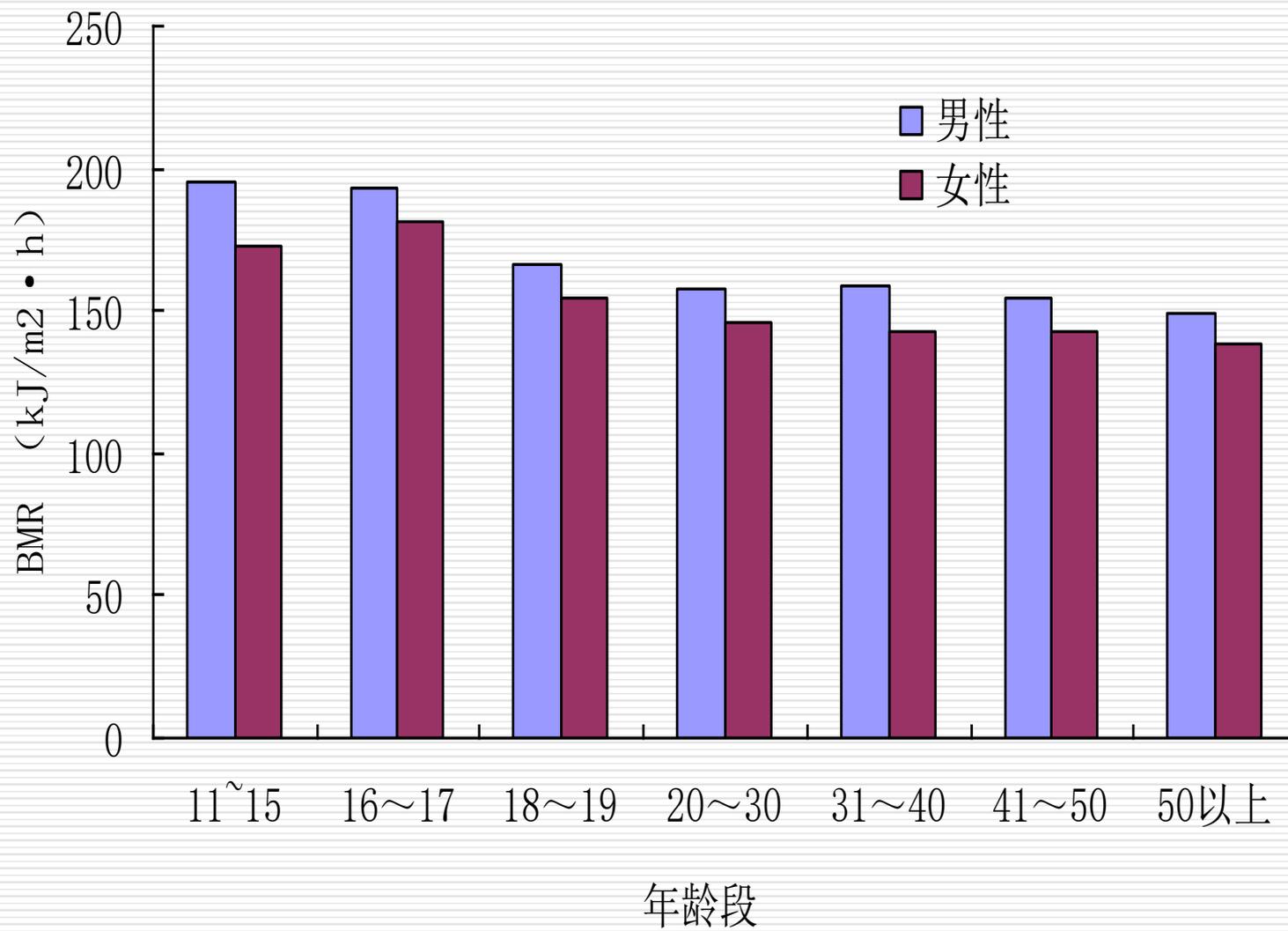
(4) 内分泌

(5) 环境

我国人正常的基础代谢率平均值 (kJ/m<sup>2</sup>·h) p155

年龄	婴幼儿	11-15	16-17	18-19	20-30	31-40	41-50	51以上	70~80
男性		195.5	193.4	166.2	157.8	158.7	154.1	149.1	
女性		172.5	181.7	154.1	146.4	142.4	142.4	138.6	

傻小子睡凉炕，全凭活力壮！  
小孩屁股底下三盆火！  
老年人带孩子热，年青人带孩子凉！  
西部区：男孩子不能热着！



## 6.2 机体活动

体力、精神活动

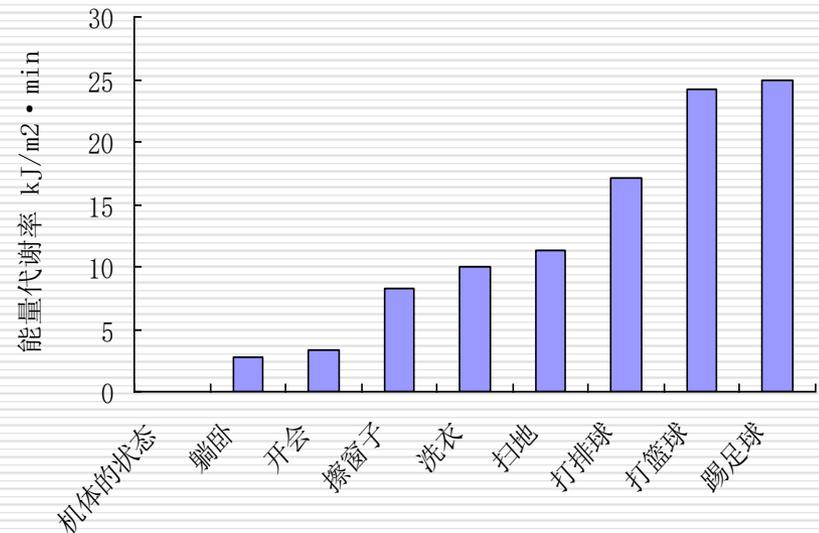
维持姿势

## 6.3 食物特殊动力作用 *specific dynamic action*

糖类或脂肪的食物特殊动力作用为其产热量的4%-6%，

蛋白质 30%

机体的状态	产热量 平均 (kJ/m <sup>2</sup> ·min)
躺卧	2.73
开会	3.40
擦窗子	8.30
洗衣	9.98
扫地	11.37
打排球	17.05
打篮球	24.22
踢足球	24.98



## □ 影响能量需要的因素

A 机体活动/维持姿势

B 精神活动

C 食物特殊动力作用

D 影响基础代谢的因素

年龄 性别、体表面积、内分泌

E 体格大小、胖瘦

F 环境气候、温度

安静代谢能在 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 下稳定

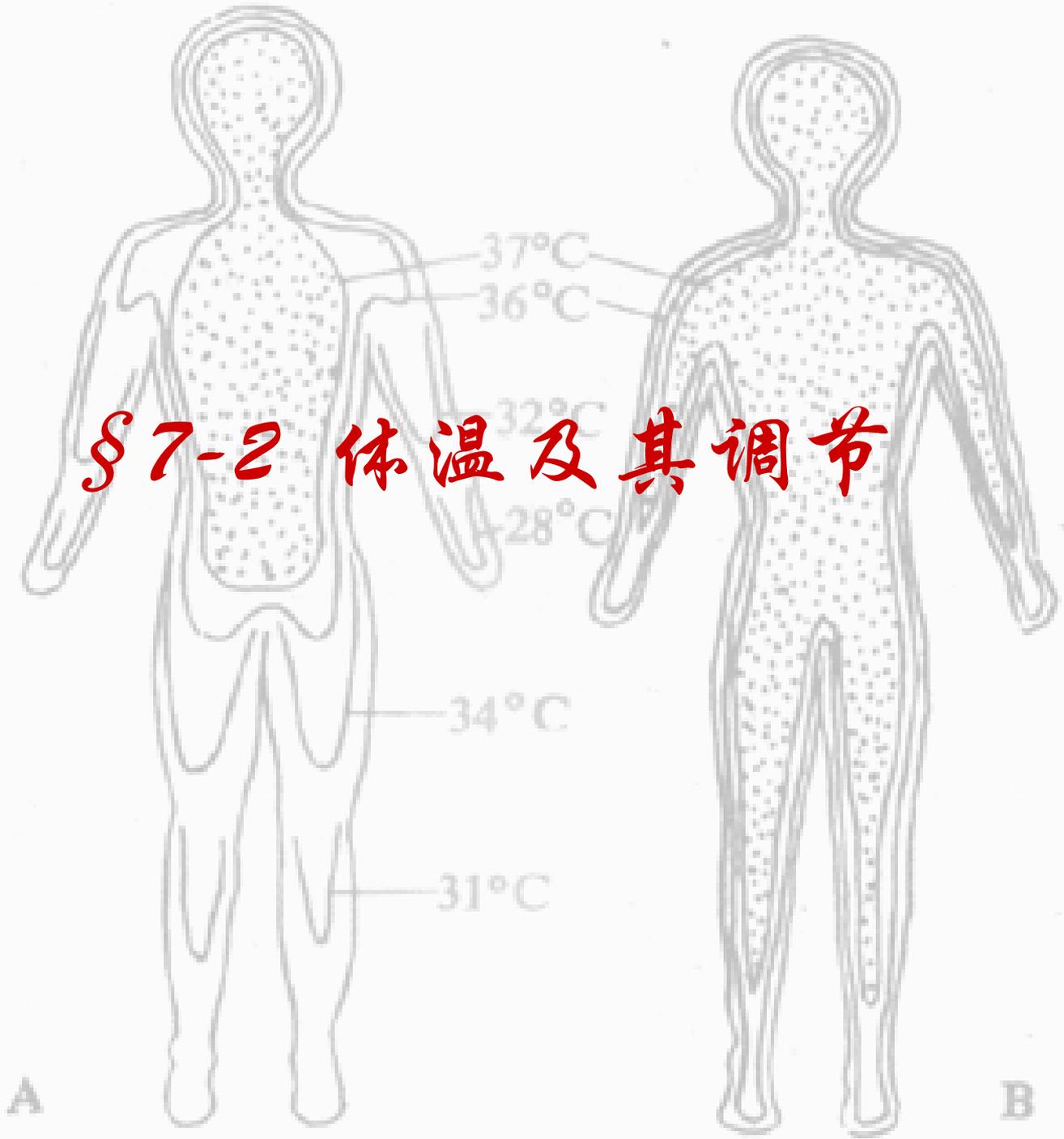
低温

$20^{\circ}\text{C}$ 以下有所增加

$10^{\circ}\text{C}$ 以下代谢率显著增加

高温

$30^{\circ}\text{C}$ 以上增加



# § 7-2 体温及其调节

# 1. 体温

□ 是新陈代谢和正常生命活动的必要条件

□ 四大生命体征之一：

呼吸、体温、脉搏、血压

如何判断它们的正常和异常，已成为每个人的必备知识和技术。

# 表层体温和深部体温

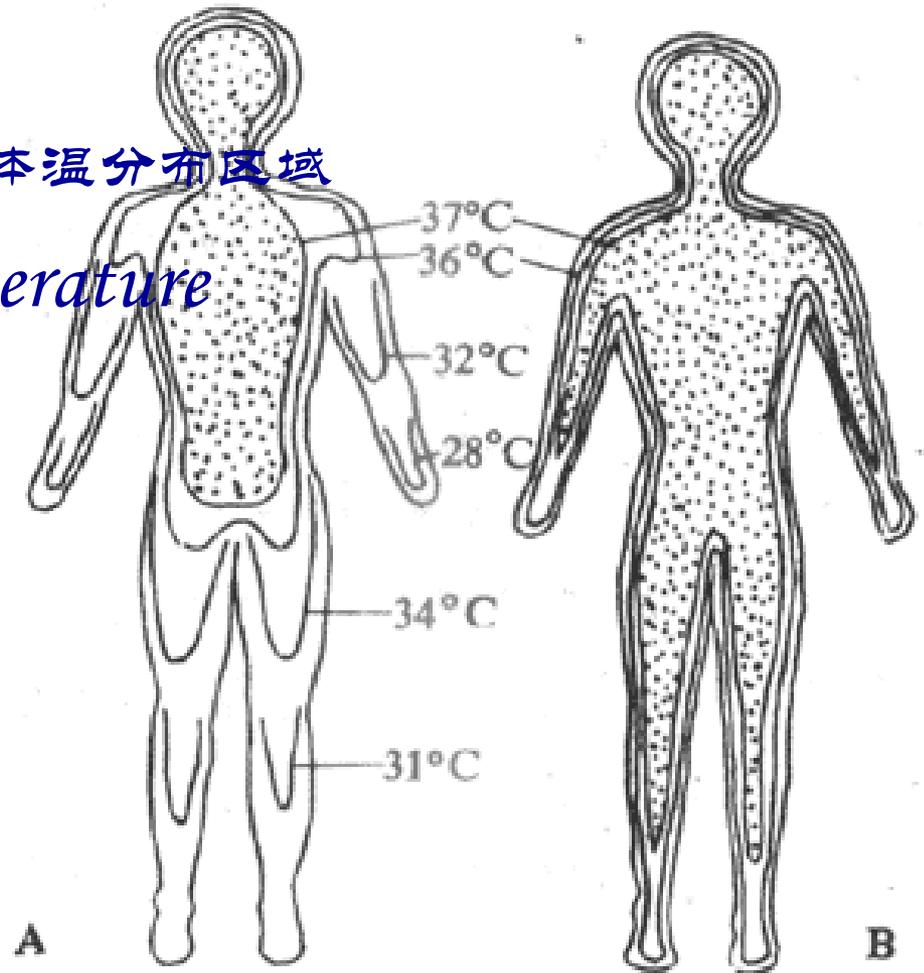
不是严格的解剖学结构，是体温分布区域

## 1.1 表层体温 *shell temperature*

皮肤

皮下组织

肌肉的温度



在不同环境温度下人体体温分布图

A: 环境温度 **20°C** B: 环境温度 **35°C**

## 影响皮肤温度的因素

凡影响皮肤血流的因素

(1) 环境温度

(2) 精神紧张      手 $30^{\circ}\text{C}$   $\rightarrow$   $24^{\circ}\text{C}$

## 1.2 深部温度

core temperature

心、肺、脑和腹腔内脏

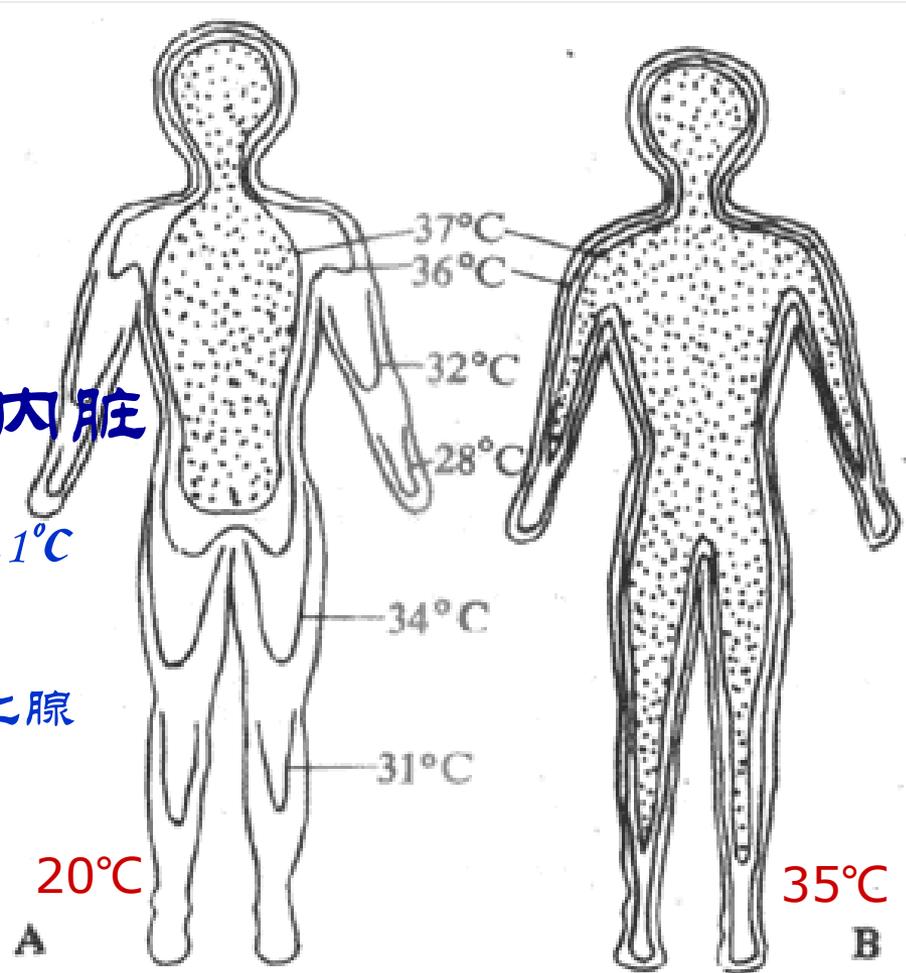
内脏温度有所差异，但不超过 $1^{\circ}\text{C}$

安静时

肝脏最高，其次是心脏和消化腺

活动时肌肉最高

男性睾丸需低温



体温 指机体深部平均体温

右心房 温度为平均体温标准值

## 1.3 体温的代表值

### (1) 临床上通常

**腋窝温度** 比口腔低  $0.4^{\circ}\text{C}$

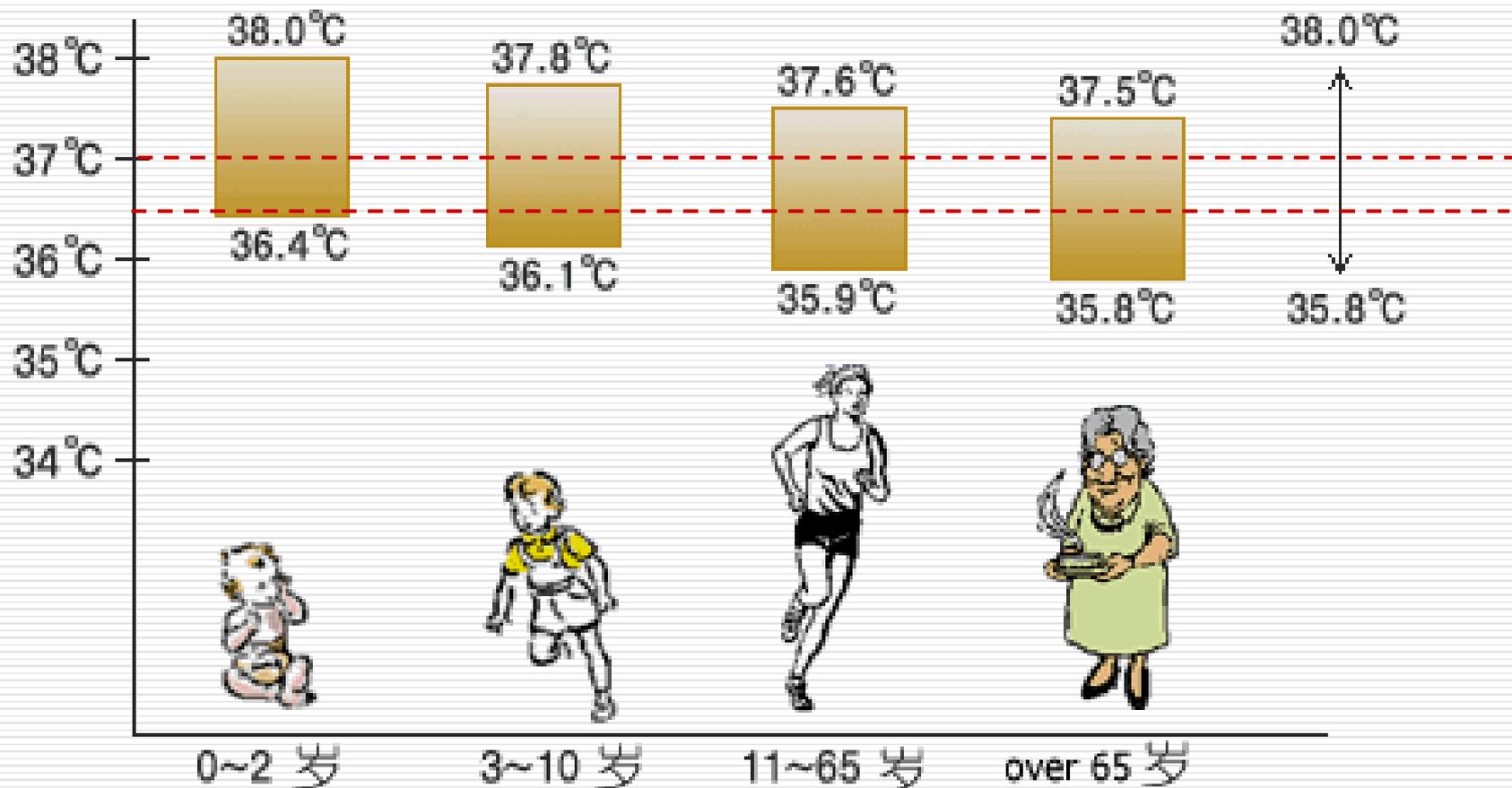
**口腔温度** 比直肠低  $0.3^{\circ}\text{C}$

**直肠温度** 正常  $36.9^{\circ}\text{C} \sim 37.9^{\circ}\text{C}$

### (2) 实验研究中

**食管温度** 与右心房接近，深部温度一代表值。

**鼓膜温度** 与下丘脑温度成正比，脑组织温度的指标。



## 2. 体温的正常变动

### 2.1 昼夜节律 或 日周期 *circadian rhythm*

2~6时最低，13~18时最高

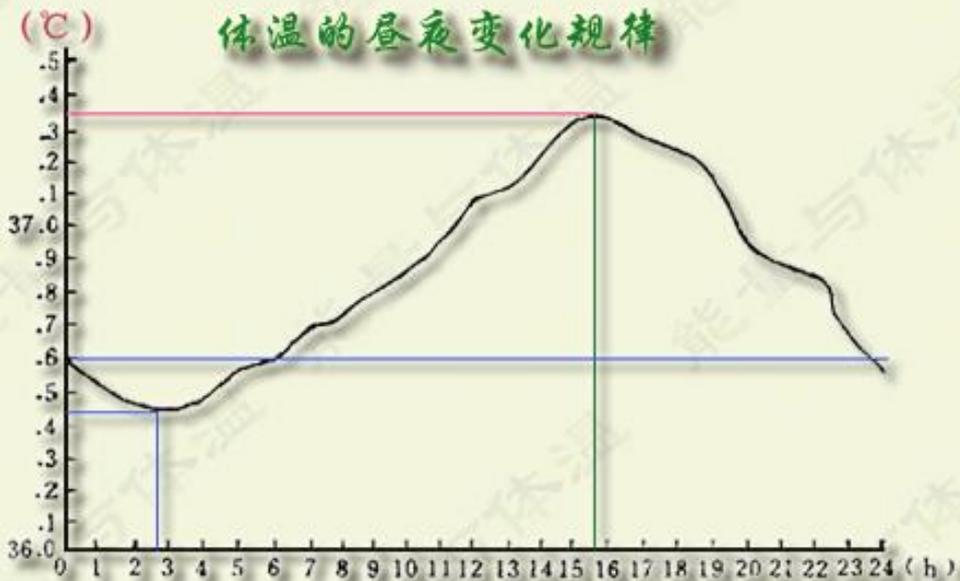
### 2.2 女性月经

成女比成男高  $0.3^{\circ}\text{C}$

排卵后升高，

同孕激素分泌有关

# 体温的昼夜变化规律



## 2.3 年龄与体温

儿童较高、新生儿和老年人低

新生儿、早产儿

## 2.4 肌肉活动 运动时体温显著增加

## 2.5 精神和神经因素

## 2.6 环境因素

## 2.7 进食

食物特殊动力作用

## 2.8 其它、非正常因素

感染、炎症等等病理过程；药物、吸烟

### 3. 体热平衡 p157

体温调节机制作用下，

机体产热与散热过程处于动态平衡

#### 3.1 产热过程



#### □ 机体热量的几大来源

(1) 基础代谢  $BMR$  成男  $170kJ/m^2 \cdot h$  肝脏产热最高

成女  $155kJ/m^2 \cdot h$

安静代谢率 比  $BMR$  高 25%

轻运动 比  $BMR$  高 3~5倍

剧烈运动 比  $BMR$  高 10~20倍

(2) 大脑、神经和肌肉活动

(3) 食物特殊动力作用

## (4) 寒战 即时维持寒冷环境下的体热平衡

寒冷环境中主要依靠寒战增加产热量

骨骼肌自主节律性收缩造成，曲肌和伸肌同时，基本不做功，但产热量高。9~11次/min

环境低温

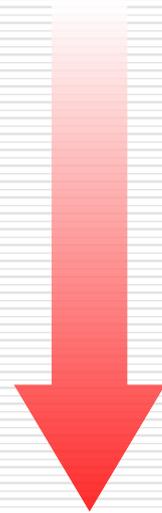


刺激性肌紧张 *thermal muscle tone*

寒战前肌紧张 *pre-shivering tone*



肌肉颤抖



## (5) 激素

内分泌也影响、调节产热

### 肾上腺素和去甲肾上腺素

产热量迅速增加，但维持时间短

### 甲状腺素

产热增加缓慢，但维持时间长

物质分解代谢增强

机体在寒冷环境几周后，甲状腺素分泌增加2倍以上，代谢率增加20%~30%。

## □ 产热器官/从器官角度看机体产热

### 两个主要产热器官群

#### a 内脏器官、组织

产热量大，稳定

安静时，主要由内脏产热

肝脏产热最多，温度最大，其次心、脑等

#### b 骨骼肌

劳动、运动时的主要产热器官，变化大

## □ 机体产热的调节 p158/从调节的角度总结产热

### (1) 代谢性产热

- a 基础代谢； b 肌肉活动、 c 精神活动
- d 食物特殊动力效应

### (2) 反射性产热

- e 激素/内分泌
- f 寒战/战栗
- g 非寒战—褐色脂肪组织
- h 动物换羽毛(季节气候刺激、内分泌、生物钟)

### (3) i 行为性产热

- 趋热、避热行为；晒太阳；戏水；增减衣物；
- .....

## 3.2 散热过程 主要部位 皮肤

散热方式和作用 环境温度 21°C

---

散热方式	性质、形式	散热量%
(1) a 辐射 radiation	热射线, 红外线	70
b 传导 conduction	游泳、水囊、冰袋	
c 对流 convection	气体、液体, 风	
(2) d 蒸发 evaporation	汗腺, 2.4kJ/g水	27
(3) e 呼吸 respiration		3
f 排尿 micturition		
g 粪便 defecation		

---

# (1) 辐射、传导、对流

散热量取决于皮肤和环境温度差

环境温度明显低于体温

炎热环境 交感神经紧张度 低

皮肤动脉扩张

动静脉吻合支 开放

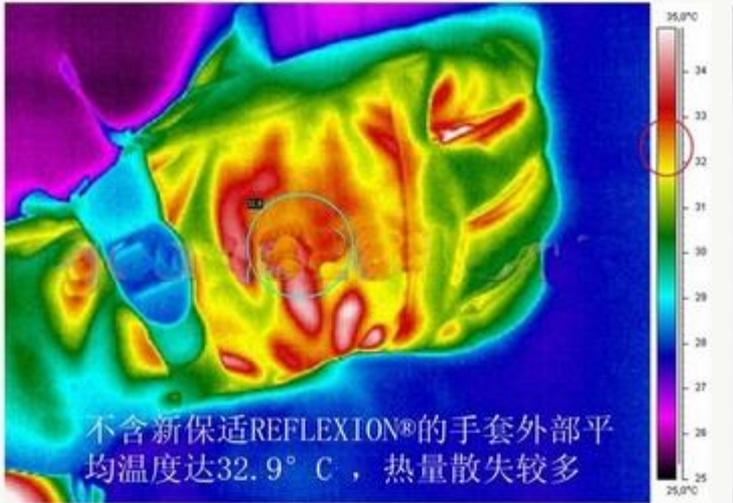
皮肤血流量增高

寒冷环境 交感神经紧张度 增高

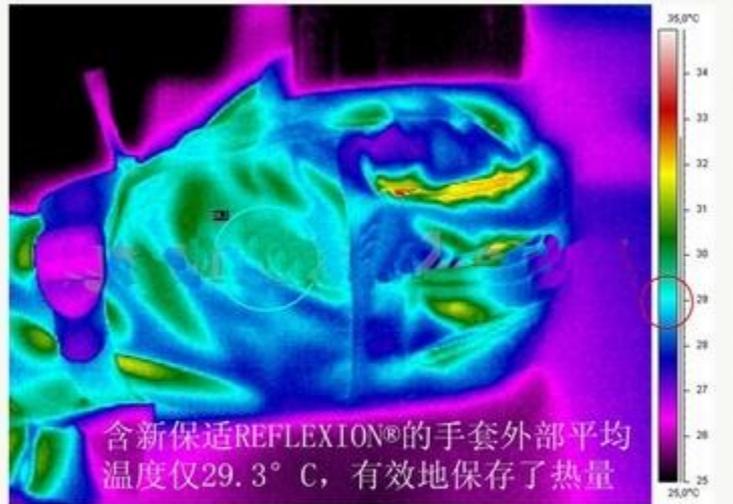
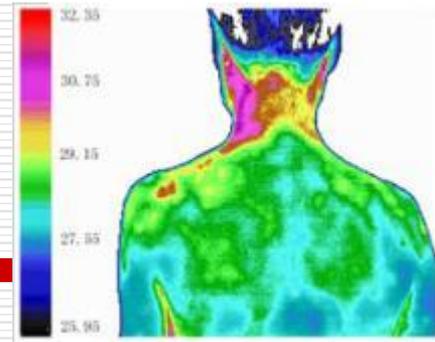
皮肤血流量剧减

体表“隔热器”作用

肢体热量逆流交换



[www.ezlife.com.cn](http://www.ezlife.com.cn)

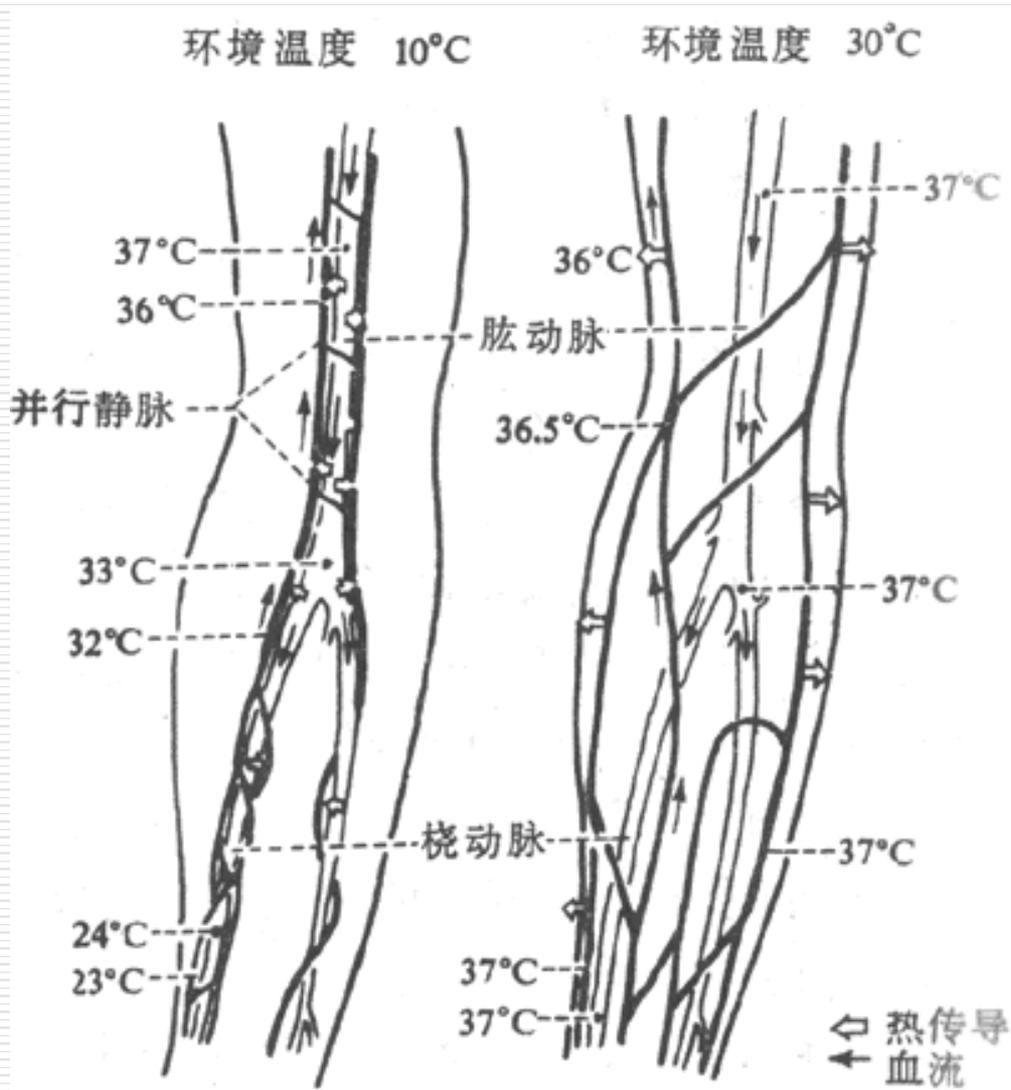


[www.ezlife.com.cn](http://www.ezlife.com.cn)



“体表隔热器”

热量逆流交换



### 上肢的逆流热量交换

环境温度降低时，热量由肱动脉传向它周围的静脉，动脉血温度因此下降到24°C。

环境温度升高时，热量由表层静脉发散

## (2) 蒸发

环境温度增高，蒸发加强

环境温度高于皮肤温度，仅靠蒸发散热

### 蒸发的形式

i 不感蒸发 *insensible perspiration*

低温、没有汗液分泌，皮肤、呼吸道仍有水分渗出和蒸发。400~600ml/d

ii 可感蒸发—发汗 *sweating*

安静30°C开始发汗

## 汗液

水 99%

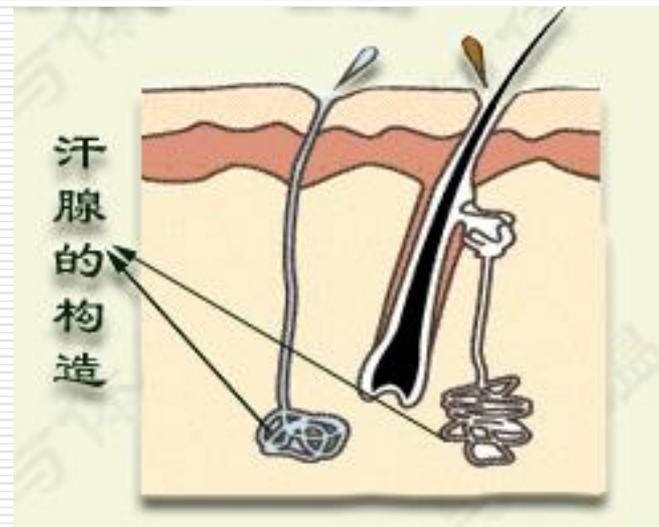
干物质 < 1%，大部氯化钠、少量氯化钾、尿素等  
也有乳酸

发汗是反射活动

受交感胆碱能神经调节

乙酰胆碱促进汗液分泌

中枢为下丘脑发汗中枢



## 温热性发汗

a 热→皮肤热感受器→发汗中枢→发汗

b 热→体温升高→下丘脑发汗中枢

温热性发汗的生理意义——散热

活动/劳动强度

## 精神性发汗

紧张、激动

一种副作用

## 4. 体温调节

温血动物有完善的体温调节机制。在环境温度改变时通过调节产热和散热过程维持体温恒定。

### 4.1 体温调节系统是“生物自动控制系统”

#### □ 控制系统

下丘脑体温调节中枢

调定点神经元

#### □ 受控系统

产热器官：肝、肌肉等等

散热系统：皮肤、皮肤血管、汗腺

□ 温度检测器

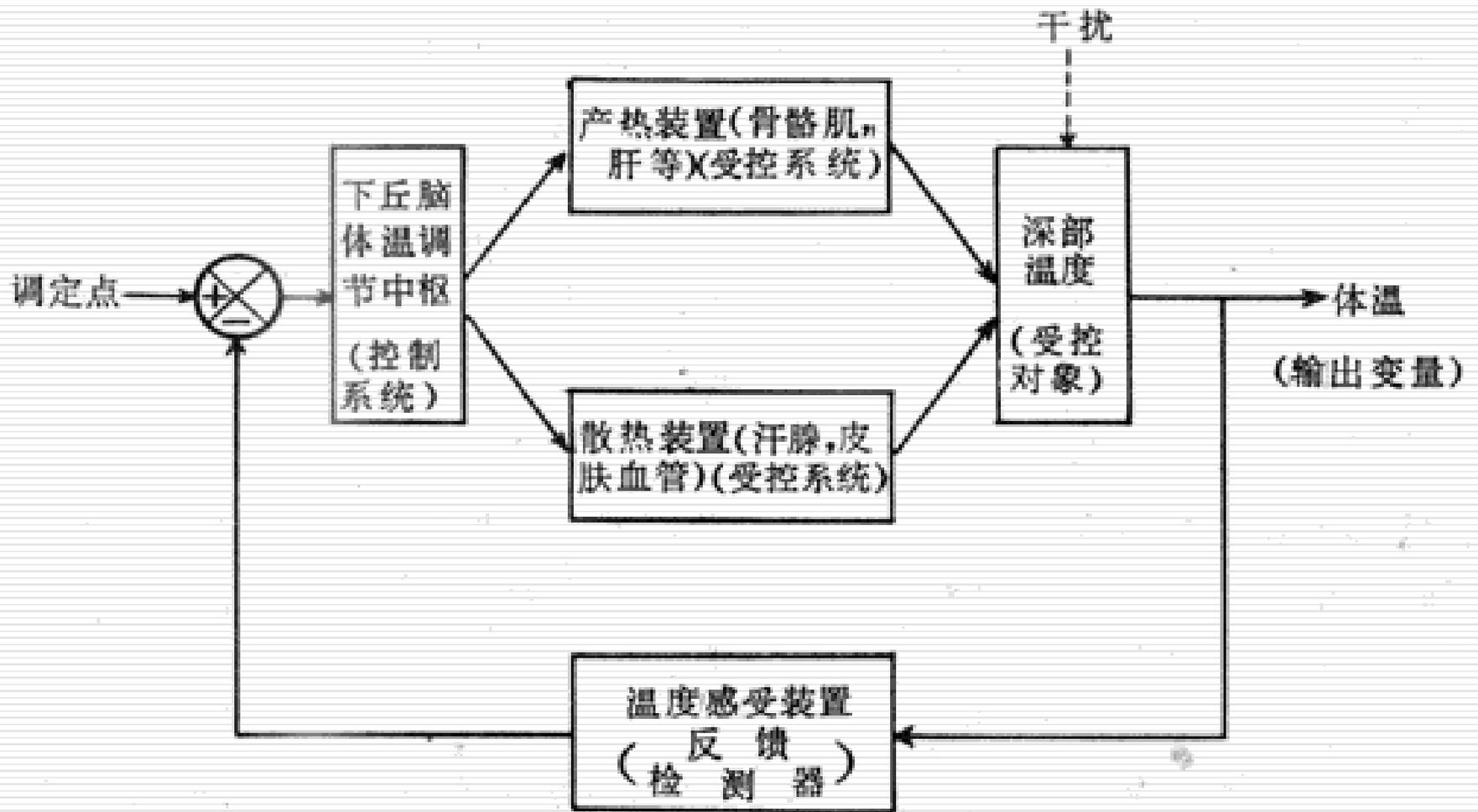
外周温度感受器

中枢温度感受器

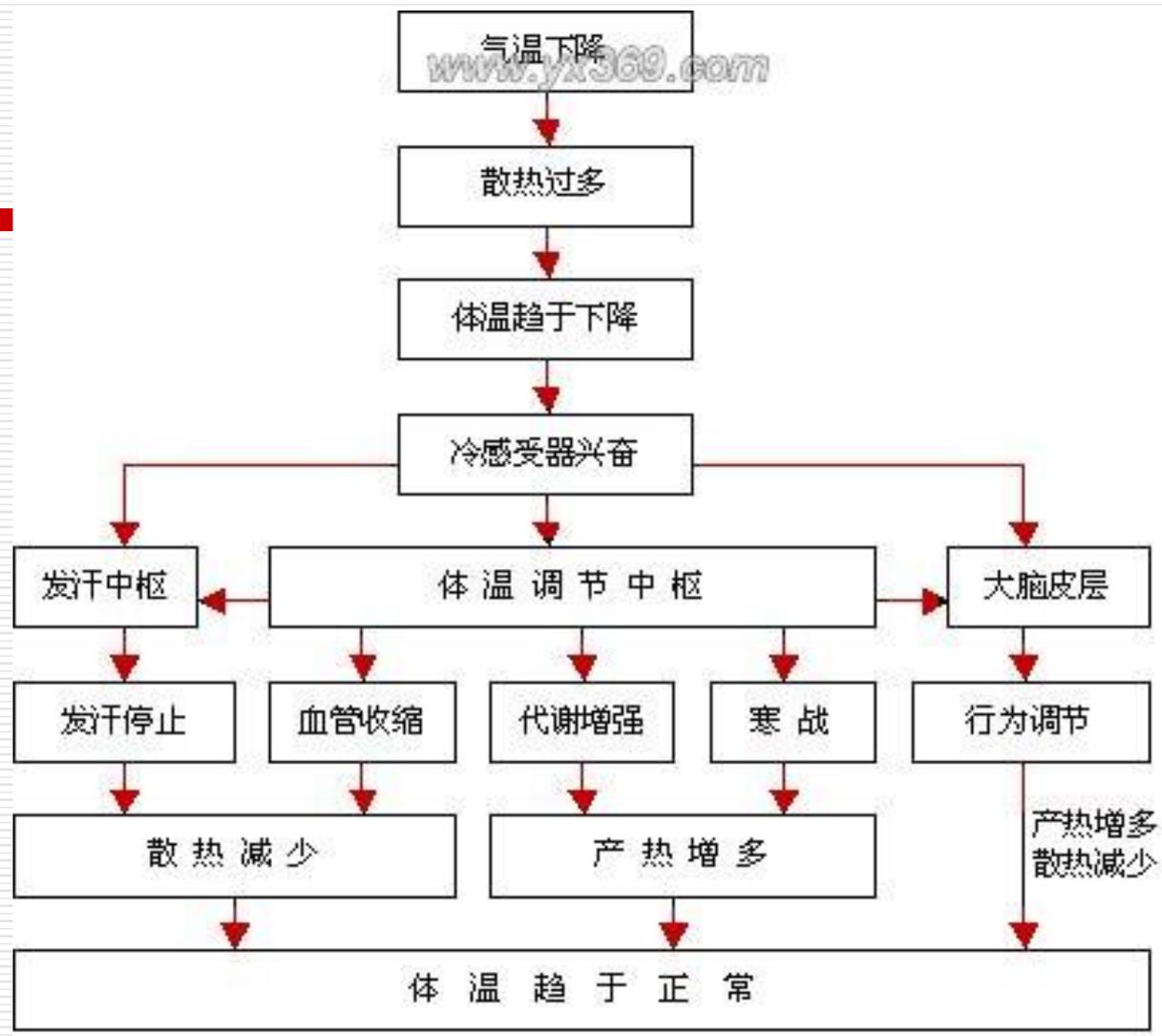
□ 控制目标（受控对象、指标）

体温/深部温度

□ 输出变量 体温



体温调节自动控制示意图

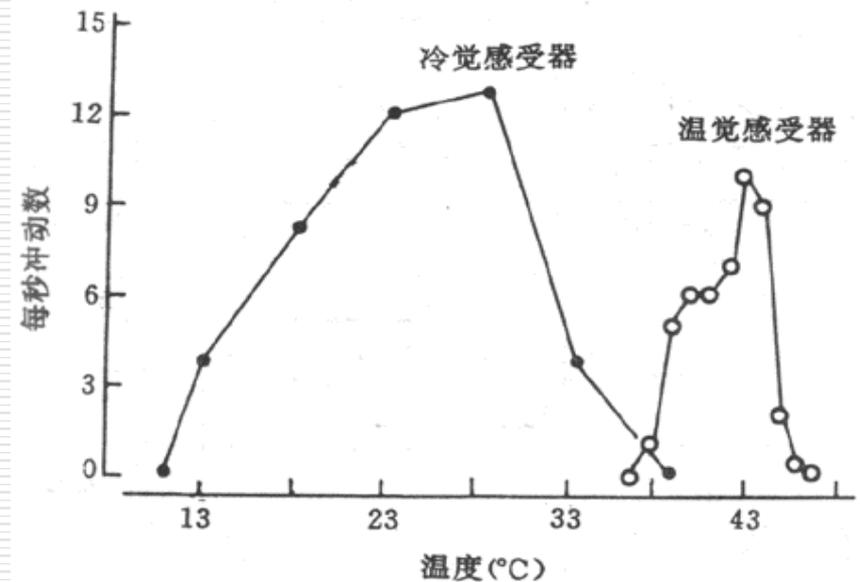


## 4.2 温度感受器

### □ 外周感受器

本质：游离神经末梢

分布：皮肤、黏膜和内脏



类型：冷感受器 28°C 最活跃

温觉感受器 43°C 最活跃

大鼠阴囊皮肤冷觉和温觉感受器

# □ 中枢温度感受器

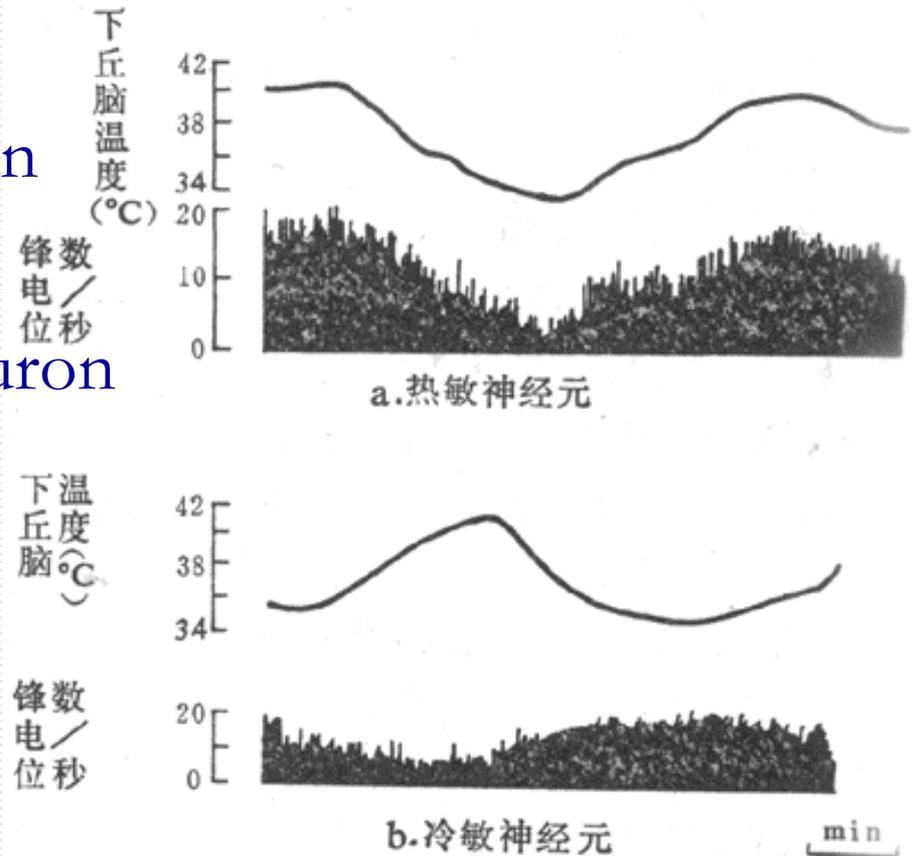
分布：脊髓、延髓、脑干、**下丘脑**

类型：冷敏神经元

cold-sensitive neuron

热敏神经元

warm-sensitive neuron



## 4.2 体温调节中枢

基本中枢在下丘脑

散热中枢 下丘脑前部

产热中枢 下丘脑后部

分段切除试验、电刺激试验

破坏下丘脑，动物失去维持体温恒定的能力

破坏下丘脑，体温下降

电刺激，寒战 产热

## □ 信息上传途径



## □ 指令下传途径



## 4.3 体温调定点学说 感染发烧机制

类似于 恒温器调节

下丘脑有个温度调定点，即约 $37^{\circ}\text{C}$

体温偏离→反馈系统→输送中枢→受控系统→  
调整体温到恒定值。

病原感染发热 致热原

是由于热敏神经元阈值受致热原作用而升高，  
如到 $39^{\circ}\text{C}$ 。因此引起寒战，到 $39^{\circ}\text{C}$ 停止。

发热时体温调节功能无障碍。



完

2008年4月24日

2013年5月7日



## □ 什么是基础体温

基础体温是指经过一夜的完全休息以后，早晨从熟睡中醒来，躺在床上，在未受任何外在因素（如运动、吃饭、情绪变化）影响的情况下所测得的最原始体温。

- --基础体温怎样变化呢？-- 有排卵的月经基础体温呈双向型，即月经前半期体内偏低，后半期体温偏高。排卵前体温一般为36.2-36.5度，排卵后体温较排卵前增高0.3-0.5度。即36.8度左右。发育成熟的女性，从月经期结束以后至排卵期开始前，其基础体温偏低，排卵期开始时再一次降到最低点（有的人不降低），但仅为1天，此后，至月经开始时体温持续升高达36.7度左右。