

第九章 能量代谢与体温

energy metabolism and body temperature

李卓明 副教授 中山大学药学院

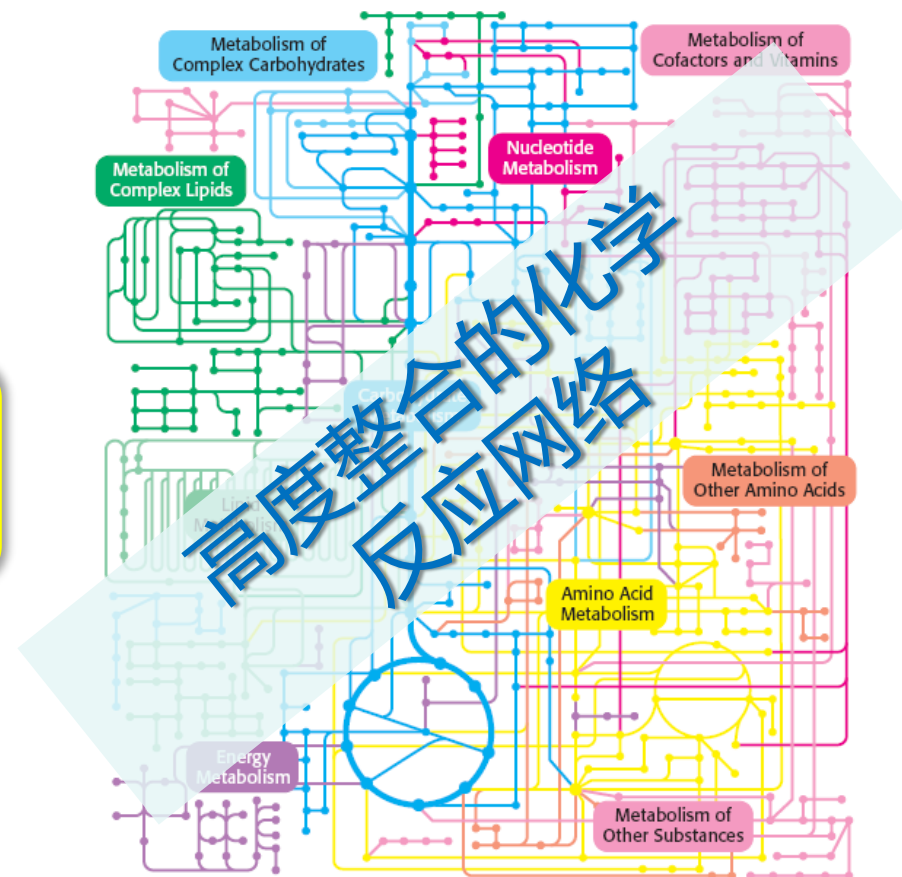
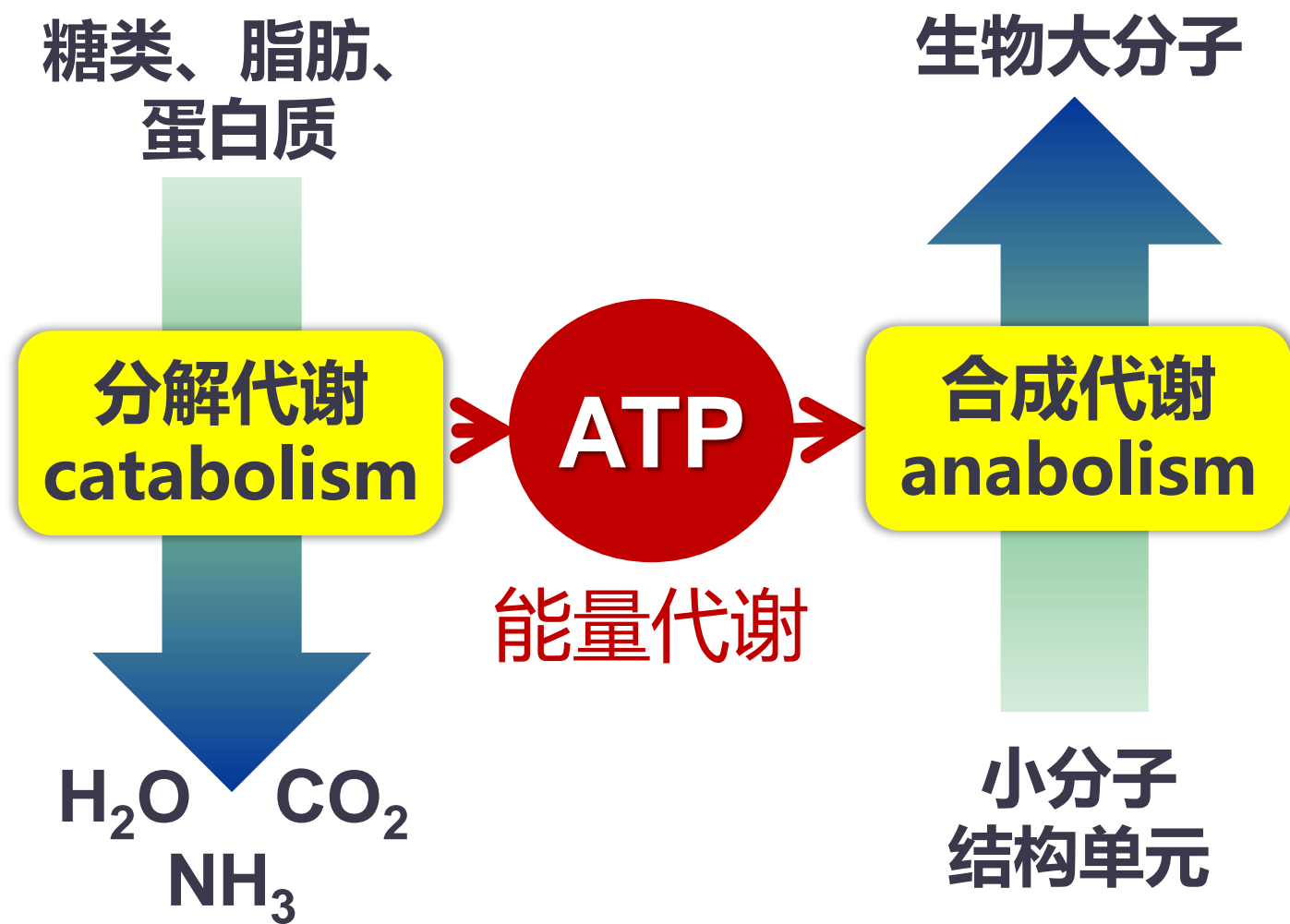
lizhm5@mail.sysu.edu.cn



OUTLINE

1. 能量代谢的来源、去路及影响因素
2. 基础代谢率的概念及测定方法
3. 体温的概念及体温的生理波动
4. 产热器官及产热方式
5. 散热方式
6. 体温调节（感受器、中枢、调定点学说）

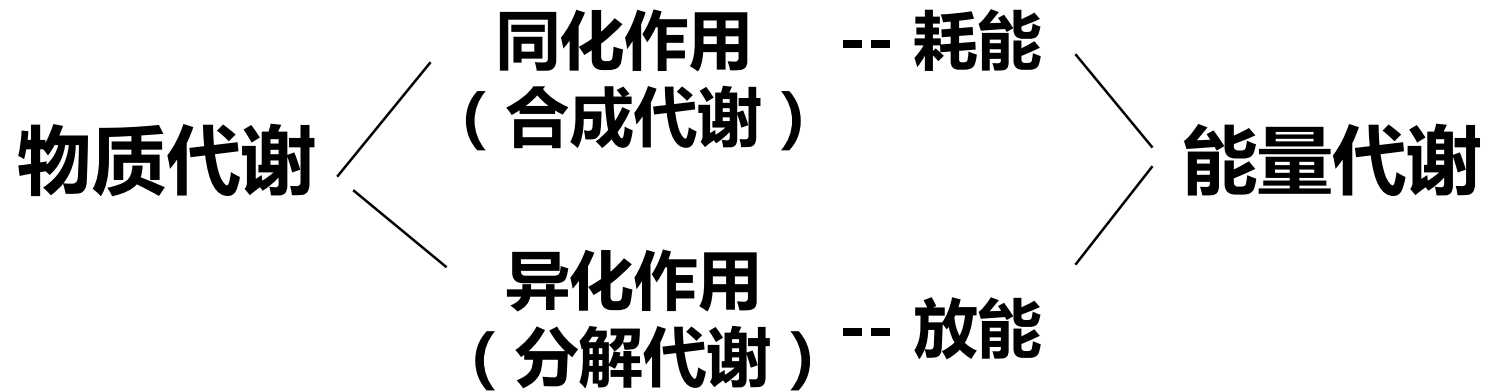
什么是能量代谢？



From the Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (www.genome.ad.jp/kegg).

什么是能量代谢？

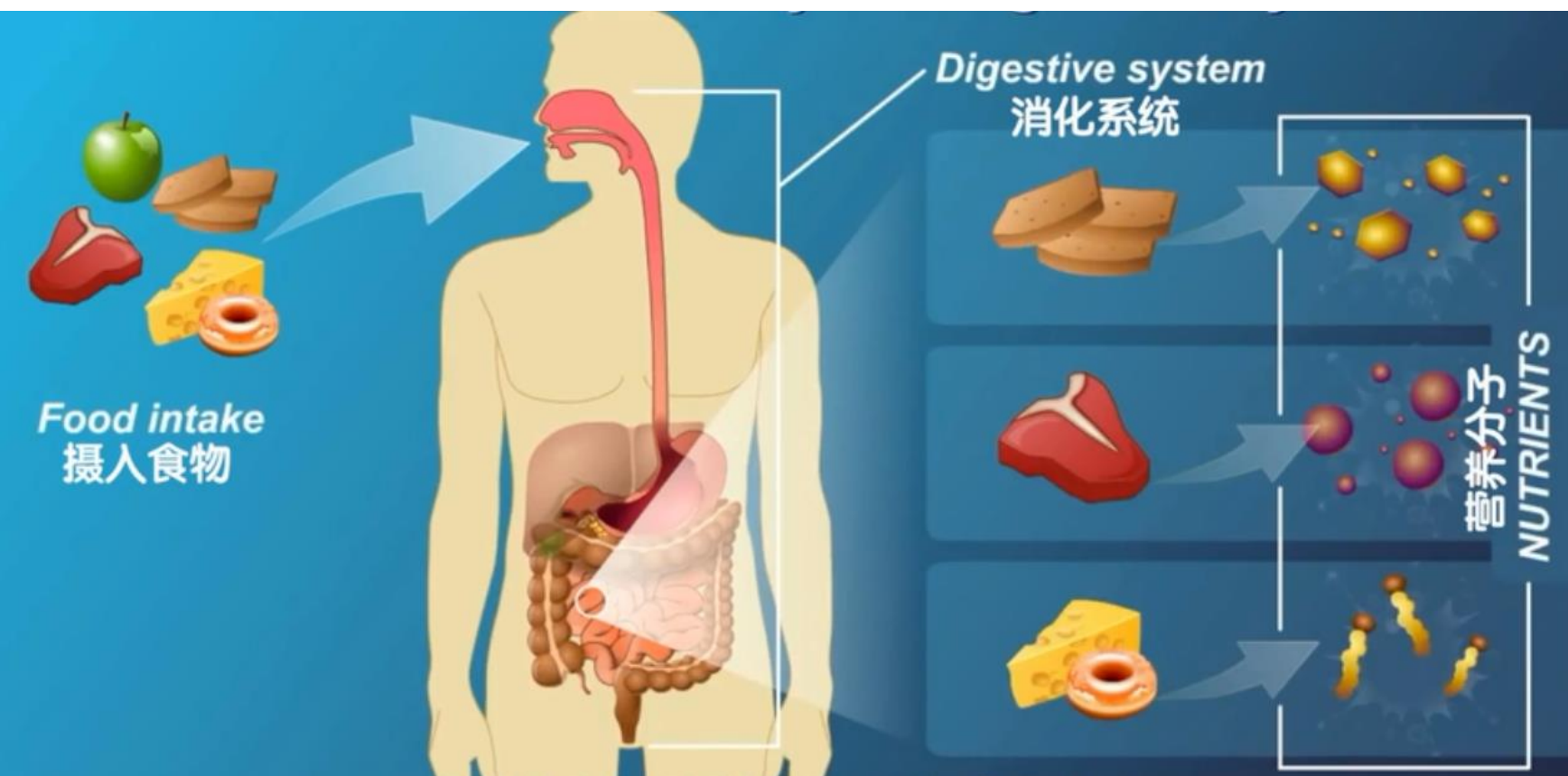
生物体的基本特征之一：新陈代谢



*** 能量代谢 (energy metabolism) : 生物体内物质代谢中伴随着的能量的释放、转移、贮存和利用。**

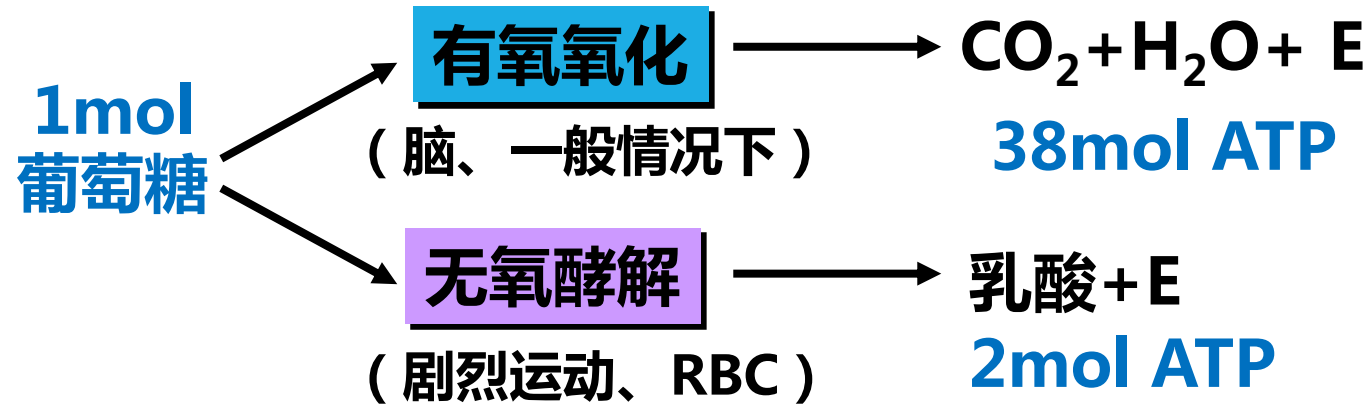
能量的来源

机体所需的能量来源于食物中的糖、脂肪和蛋白质的**碳氢键**断裂。

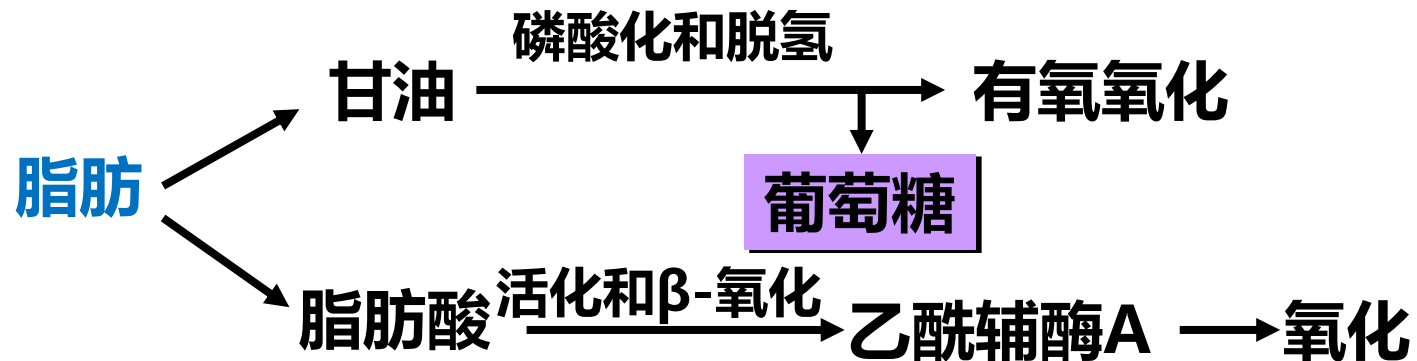


- **碳水化合物**：重要供能物质
- **蛋白质**：维持机体细胞的结构和功能，供能是其次要功能
- **脂肪**
重要的供能物质及主要的贮能物质

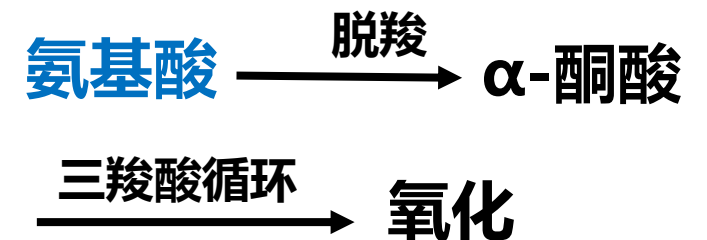
1、碳水化合物：机体的**主要能源** 70%



2、脂肪：**贮存**和供给能量，提供约30%能量



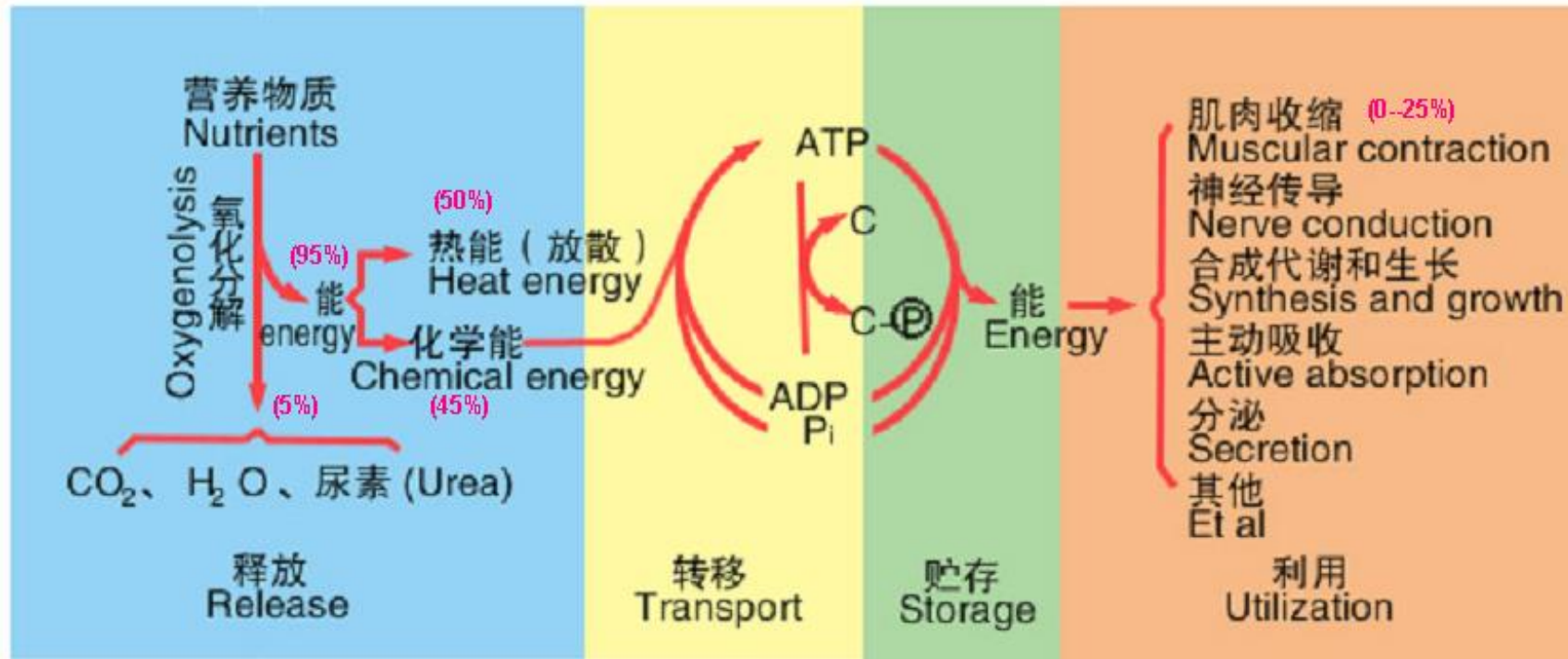
3、蛋白质（氨基酸）： 主要用于重新合成细胞 成分或酶、激素等生物 活性物质，**次要功能是 提供能量。**



三种能源物质的比较

| 能源物质 | 糖 | 脂肪 | 蛋白质 |
|---------|----------------------------|--------------|-------------------|
| 主要功能 | 供给机体生命活动所需能量 | 储存能量 供给能量 | 构成细胞成分及某些生物活性物质 |
| 占正常供能比例 | 70% | <30% | 很少 |
| 供能特点 | 有氧氧化（主要，尤其是脑） 无氧氧化（骨骼肌） | 短期饥饿时成为主要供能物 | 长期饥饿脂肪耗竭时供能，以维持生命 |
| 储备情况 | 较少，仅150g | 占体重20% | |

能量的贮存与利用



体内能量的释放、转移、贮存和利用示意图

Pi: 磷酸; Phosphonic acid C: 肌酸; Creatine C-P: 磷酸肌酸; Phosphocreatine

- ATP：既是体内重要的储能物质，又是直接的供能物质
- CP：ATP的贮存库

能量平衡

- 摄入的能量等于机体产热、做功和贮存的能量三部分的总和。
- 如果机体产热和做功总和小于能量摄入，就有能量在机体贮存，导致体重增加。
- 身体质量指数 (body mass index , BMI)
- $BMI = \text{体重(kg)} / \text{身高(m)}^2$



成人的BMI数值

| 体重指数 | 男性 | 女性 |
|------|-------|-------|
| 过轻 | 低于20 | 低于19 |
| 适中 | 20-25 | 19-24 |
| 过重 | 25-30 | 24-29 |
| 肥胖 | 30-35 | 29-34 |
| 非常肥胖 | 高于35 | 高于34 |

专家指出最理想的BMI是**22**



HOW FAST YOUR BODY BURNS
THE FUEL IN YOUR FOOD



HOW HIGH YOUR PERSONAL
ENERGY LEVEL IS



能量代谢的测定原理和方法

原理：能量守恒定律

食物中的化学能 = 热能 + 所作功

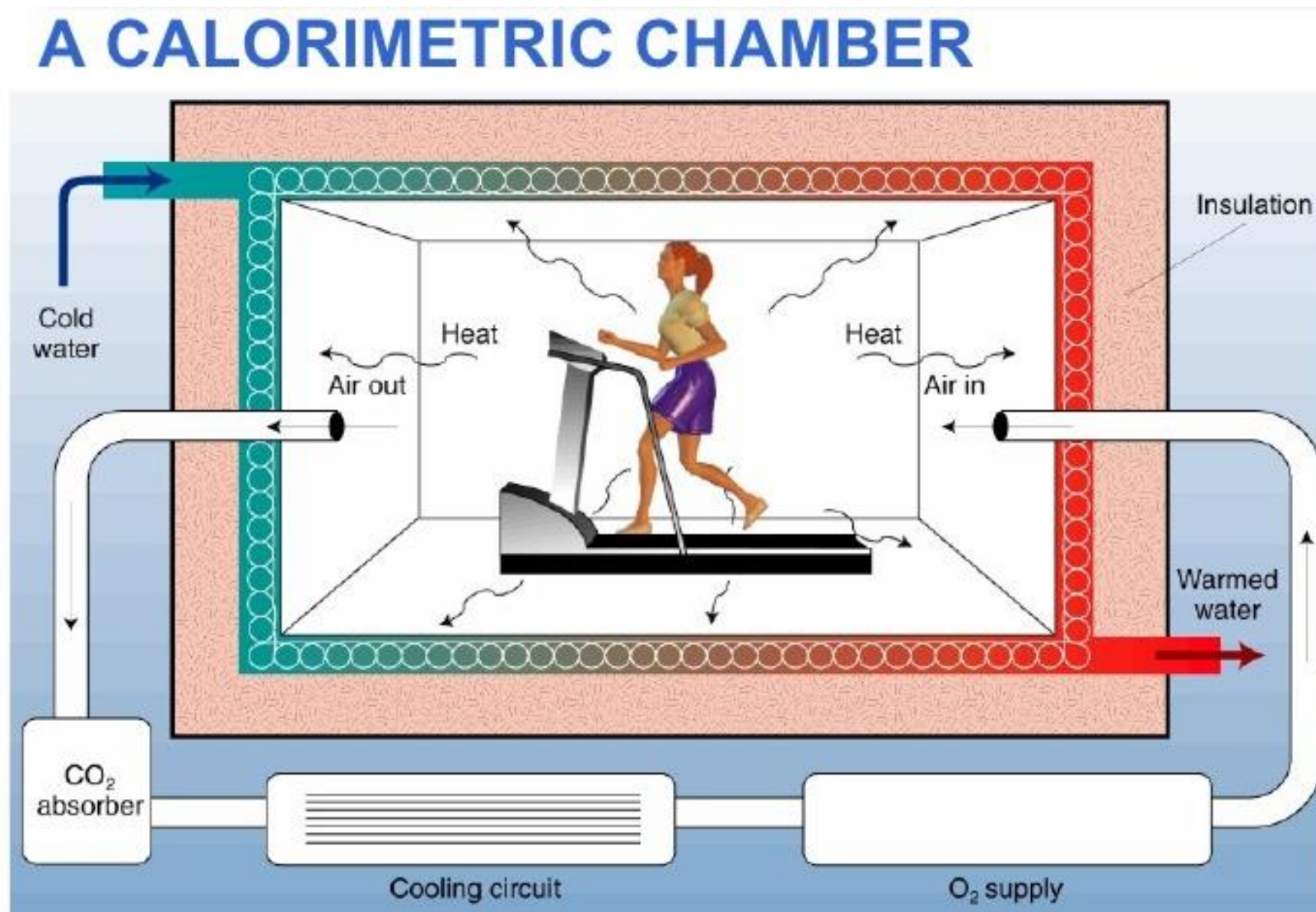
方法：测定整个机体在单位时间内发散的总热量，通常有两类方法：直接测热法与间接测热法。

1. 直接测热法 (direct calorimetry)

将被测者置于一特殊的检测环境中，收集被测者在一定时间内发散的总热量，然后换算成单位时间的代谢量，即能量代谢率。

能量代谢率：单位时间机体产生的热量。

直接测定单位时间内人体体表、呼出气、尿液和粪便排出的总热量。



准确但设备复杂,操作繁琐

与能量代谢测定有关的几个基本概念

食物的热价 (thermal equivalent of food)

1g某种食物在体内氧化(或在体外燃烧)时所释放的能量称为该种食物的热价。又称卡价，单位为kJ。

{ 生物热价—食物经**体内**生物氧化所产生的热量
物理热价—食物在**体外**燃烧释放的能量

糖与脂肪：物理热价 = 生物热价

蛋白质：生物热价 ≠ 物理热价

脂肪的热价最高

与能量代谢测定有关的几个基本概念

食物的氧热价(thermal equivalent of oxygen)

某种食物氧化时消耗**1L氧**所产生的能量。

呼吸商 (respiratory quotient , RQ)

一定时间内机体CO₂的产生量与O₂耗量的比值。

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

与能量代谢测定有关的几个基本概念

呼吸商

- 糖 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) 为1
- 脂肪($\text{C}_{57}\text{H}_{104}\text{O}_6$)约为0.71
- 蛋白质则一般视为0.80
- 混合食物为0.71 ~ 1.00 , 一般视为0.82

根据RQ可估计
某一段时间内
机体氧化各种
食物的比例：

RQ = 1.0 → 氧化糖
RQ = 0.70 → 氧化脂肪
RQ = 0.82 → 一般饮食

非蛋白呼吸商 (non-protein RQ)

根据糖和脂肪按不同比例混和氧化时所产生的
 CO_2 量以及消耗 O_2 量计算出相应的呼吸商。

将蛋白质代谢
忽略不计：

2. 间接测热法(indirect calorimetry)

原理：定比定律 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \Delta H$

测量单位时间内总耗 O_2 量和总 CO_2 产量

查清蛋白质氧化的克数（根据尿氮量估算，
1 g尿氮相当于氧化分解6.25 g 蛋白质）

计算蛋白质氧化代谢的产热量

计算氧化蛋白质的耗 O_2 量和 CO_2 产量

算出糖和脂肪氧化（非蛋白代谢）的耗 O_2 量
和 CO_2 产量，得到非蛋白呼吸商(NPRQ)

查表得糖和脂肪氧化的相对比例及氧热价

计算糖和脂肪代谢产热量

总产热量为蛋白质产热量和非蛋白质产热量之和

简化方法：

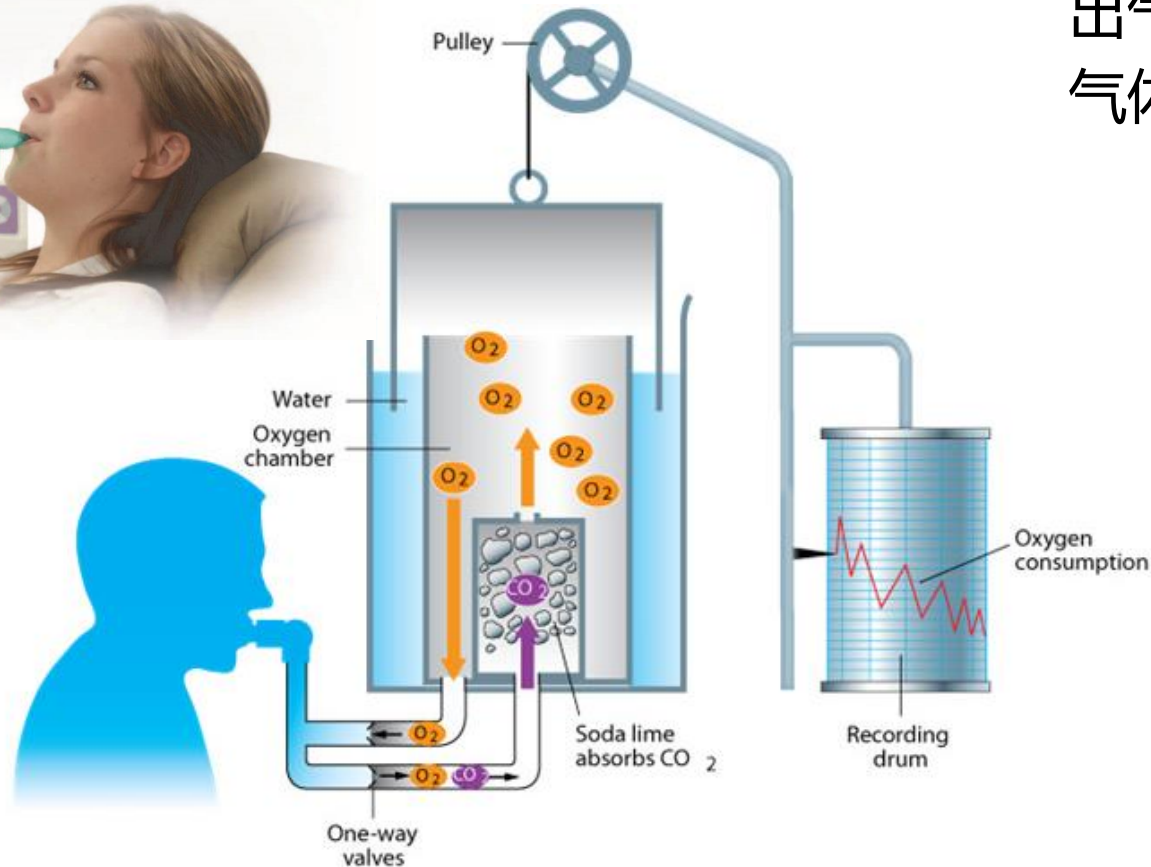
- ✓ 忽略蛋白代谢部分，根据总耗 O_2 量和总 CO_2 产量求出呼吸商，按非蛋白呼吸商的氧热价进行计算
- ✓ 将呼吸商定为0.82，氧热价为20.19 kJ/L，只需测单位时间总耗 O_2 量

产热量 (kcal) = 20.19 × 耗氧量

耗氧量与CO₂产量的测定方法

(1) 闭合式测定法：

临床上通常只使用**肺量计**来测量耗氧量。



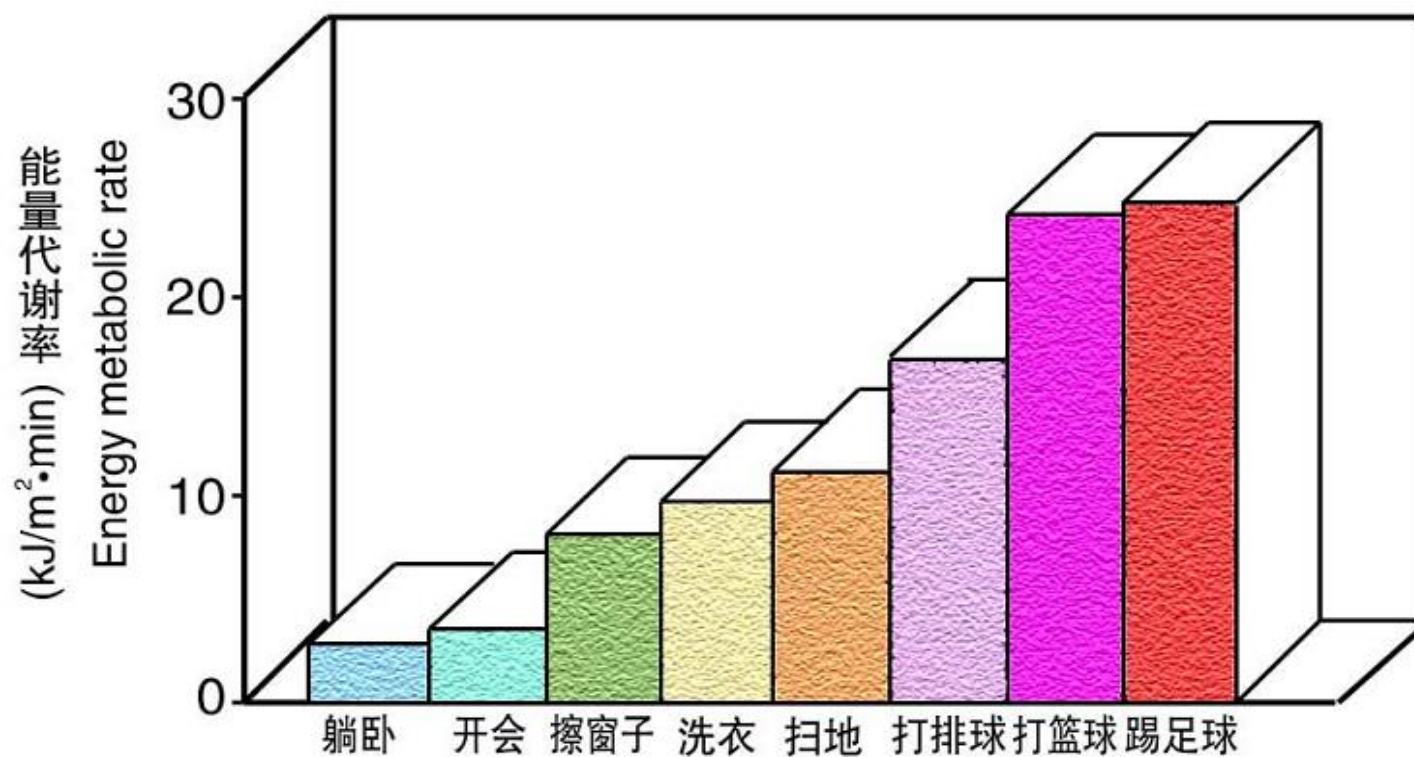
(2) 开放式测定法(气体分析法)：

在机体呼吸空气的条件下测定耗氧量和CO₂产量的方法，即采取受试者一定时间内的呼出气，通过**气量计**测出呼出气量并分析呼出气体中O₂和CO₂容积百分比。



影响能量代谢的因素

(一)肌肉活动



不同活动状态时的能量代谢率

影响能量代谢的因素

(二) 环境温度

- 人体安静时的能量代谢,在 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 的环境中较为稳定,肌肉松弛。
- $T > 30^{\circ}\text{C}$ 能量代谢率增加;
酶活性增强。
- $T < 20^{\circ}\text{C}$ 能量代谢率增加;
寒战和肌紧张增加;
激素分泌。

舰艇舱内温度可高达 60°C ,故舰员的能量代谢率很高。



影响能量代谢的因素

(三) 食物的特殊动力效应 (specific dynamic effect)

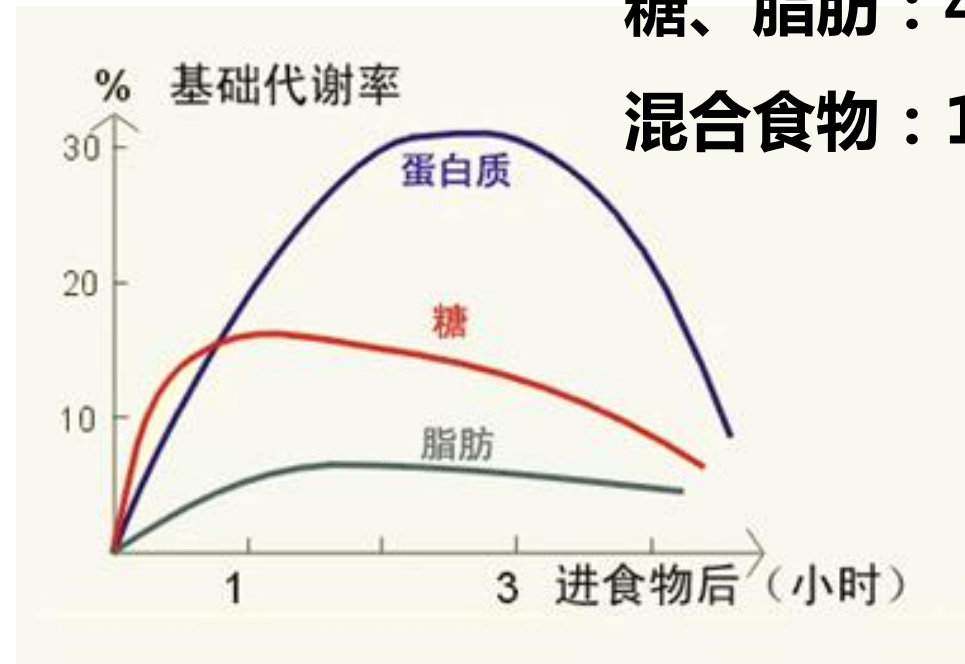
食物刺激机体产生额外热量的现象，称为**食物的特殊动力效应**。



蛋白质：30%

糖、脂肪：4~6%

混合食物：10%



影响能量代谢的因素

(四)精神活动

人在平静地思考问题时，能量代谢受到的影响不大，其产热量一般不超过4%。

精神紧张时，产热量可显著增加。原因：无意识的肌紧张及刺激代谢的激素释放增多



一直搞不懂人生为啥那么悲催。



基础代谢

- **基础代谢(basal metabolism)：**基础状态下的能量代谢。

基础状态：清晨、清醒、静卧，未作肌肉活动；

前夜睡眠良好，测定时无精神紧张；

测定前至少禁食12小时；

室温保持在20 ~ 25℃；

体温正常。

- **基础代谢率(basal metabolic rate , BMR)：**基础状态下，单位时间内的能量代谢。这种状态下体内能量的消耗只用于维持基本的生命活动，能量代谢比较稳定。

BM R的测定和正常值

BM R以每小时、每平方米体表面积产热量为单位。

1. BM R的测定:(通常采用简易法)

①把基础状态下的呼吸商定为0.82、氧热价为20.20KJ。

②测出1h内(测6min的耗氧量×10)的耗氧量。

③测出体表面积。

④按下面公式计算出BM R实测值：

$$\text{BM R实测值} = 20.20 \times \text{耗氧量} / \text{体表面积}$$

⑤对照表9-3的BM R平均值,按下面公式计算出BM R相对值：

$$\text{BM R相对值} = \frac{\text{BM R实测值} - \text{BM R平均值}}{\text{BM R平均值}} \times 100\%$$

BMR的测定和正常值

机体能量代谢率与体重相关性不明显，而与体表面积基本上成正比。

如：以体重为指标,身材瘦小者的产热量/Kg显著高于身材高大者;以体表面积为指标,则身材高大或瘦小者的产热量/m²都比较接近。

人体表面积推算:

①公式计算： $= 0.0061 \times \text{身高 (cm)} + 0.0128 \times \text{体重(kg)} - 0.1529$

②体表面积测算图测出。

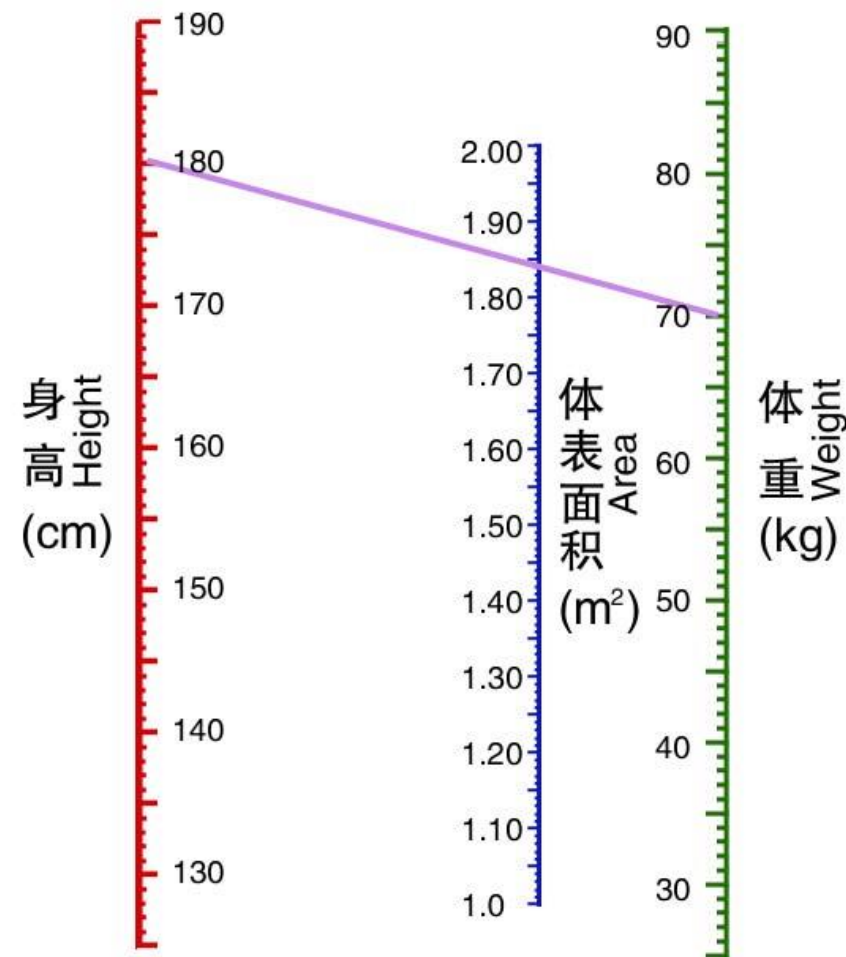


图 — 体表面积测算用图

BM R的测定和正常值

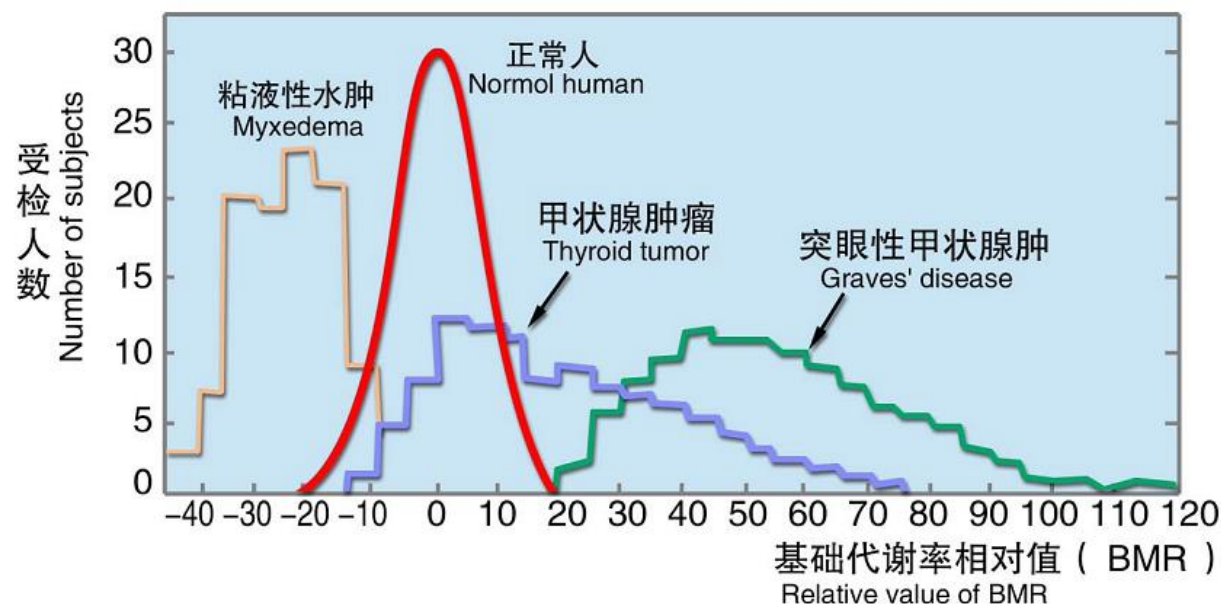
BM R率随着性别、年龄等不同而有生理变动。男子的BM R值平均比女子的高；儿童比成人高；年龄越大，代谢率越低。

我国人正常的 BM R 平均值 [kJ / (m²·h)]

| 年龄 | 11~15 | 16~17 | 18~19 | 20~30 | 31~40 | 41~50 | 51 以上 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 男性 | 195.5 | 193.4 | 166.2 | 157.8 | 158.6 | 154.0 | 149.0 |
| 女性 | 172.5 | 181.7 | 154.0 | 146.5 | 146.9 | 142.4 | 138.6 |

BMR的临床意义

1) 与我国正常人BMR平均值比较：
相差在10-15%之间，均不属病态
相差之数超过20%时，才可能是病理变化
体温每升高1℃，BMR将升高13%左右

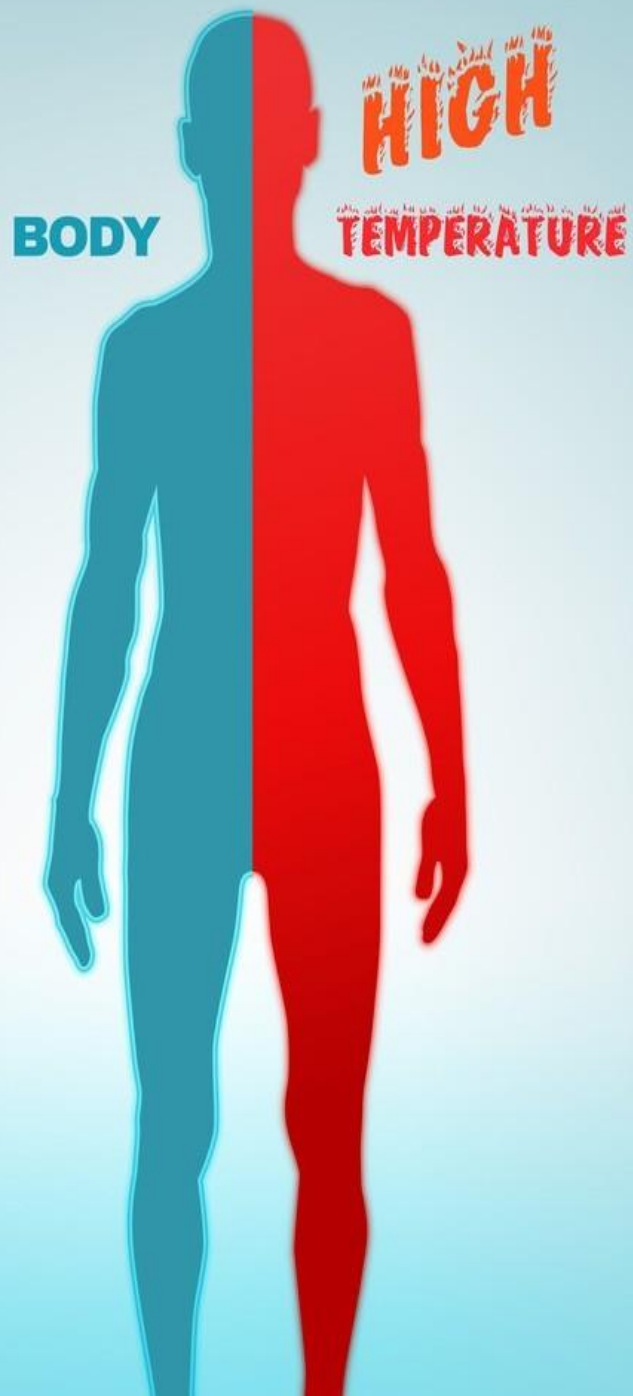


甲状腺疾病患者的基础代谢与正常人基础代谢的比较

2) BMR的测量是临床诊断**甲状腺疾病**的重要辅助方法

甲状腺功能低下时（粘液性水肿），BMR可比正常值低20-40%；

甲状腺功能亢进时（甲状腺肿瘤、甲状腺肿大），BMR可比正常值高出25-80%。



体温及其调节

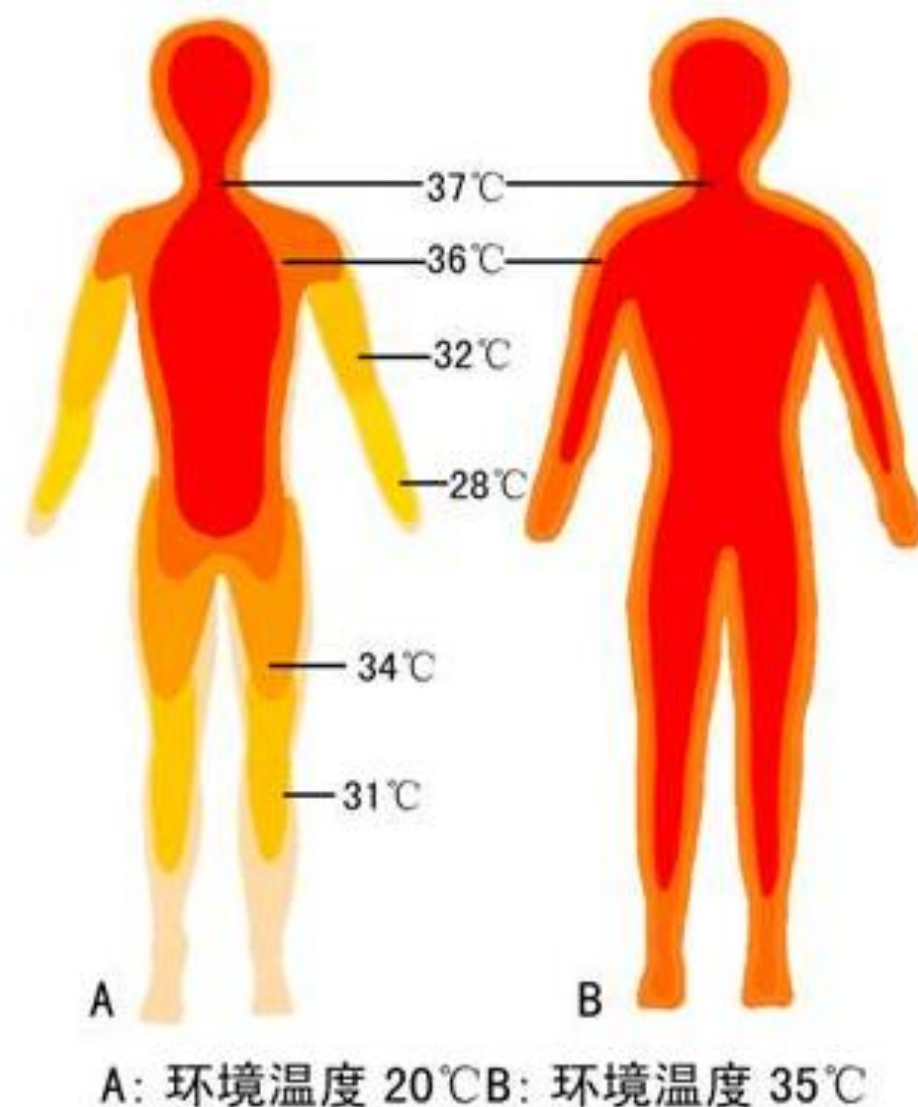
- 一、 体温
- 二、 机体的产热与散热
- 三、 体温调节

体温(body temperature)

在研究体温时，把人体分为**体核**与**体表**两个层次。

深部温度：相对稳定，身体各部位之间的温度差异很小。

表层温度：机体外壳的温度。



体温(body temperature)

身体深部的平均温度。由于深部血液温度不易测试，所以临床上通常用**直肠、口腔和腋窝**等部位的温度来代表体温。

体温的测定：人类的体温范围：35 - 41 °C

临床：直肠温度：36.9-37.9°C

(插入直肠6cm以上)

口腔温度：36.7-37.7 °C

(不能配合的病人，不适宜用)

腋窝温度：36.0-37.4 °C

(形成人工体腔；至少10min)

体温的正常变动

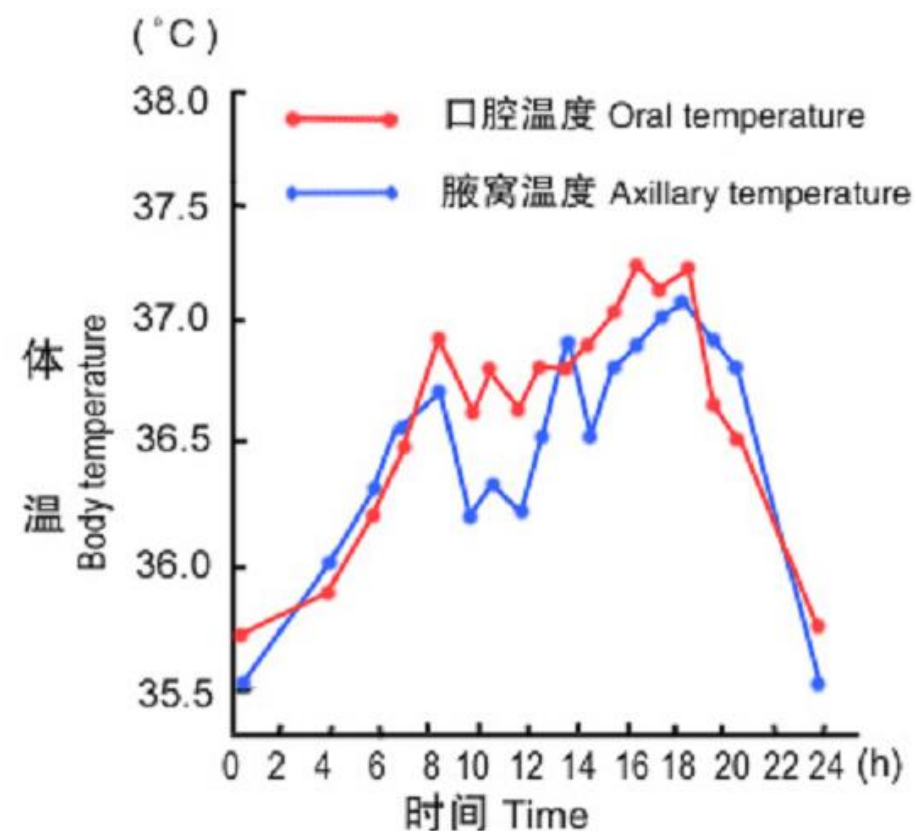
在生理情况下，体温可随昼夜、年龄、性别等因素而有所变化，但这种变化的幅度一般不超过 1°C 。

1. 体温的昼夜变化

体温在一昼夜之间有周期性的波动：

清晨2～6时体温最低，午后1～6时最高。

这种昼夜周期性波动称为**昼夜节律**
(circadian rhythm)或**日节律**。

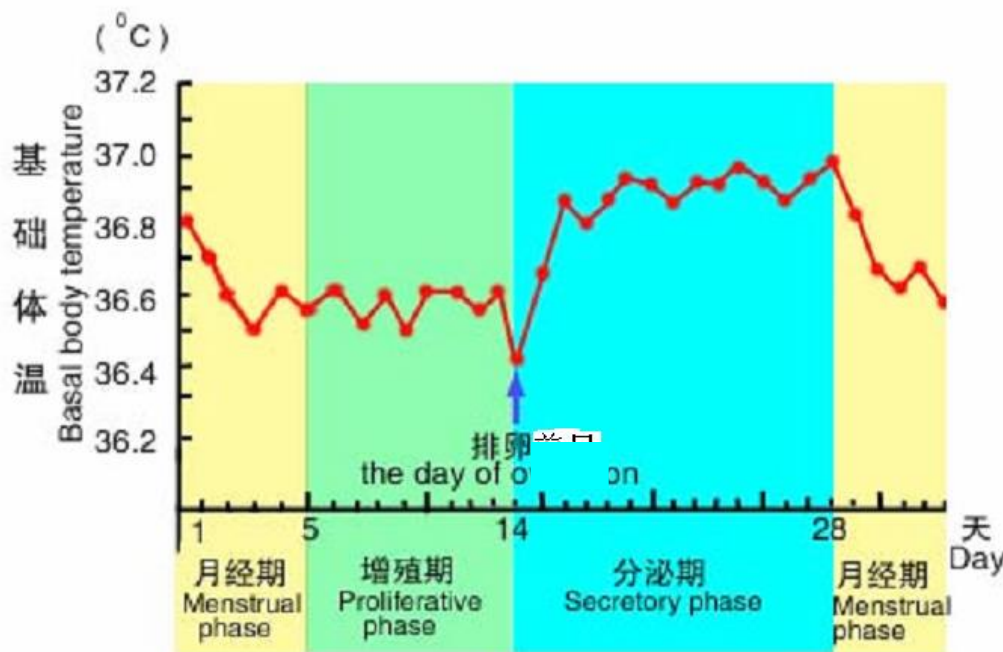


人体体温的昼夜变动

2. 性别的影响

成年女子的体温平均比男子的高 0.3°C ，而且其体温随**月经周期**而发生变动。

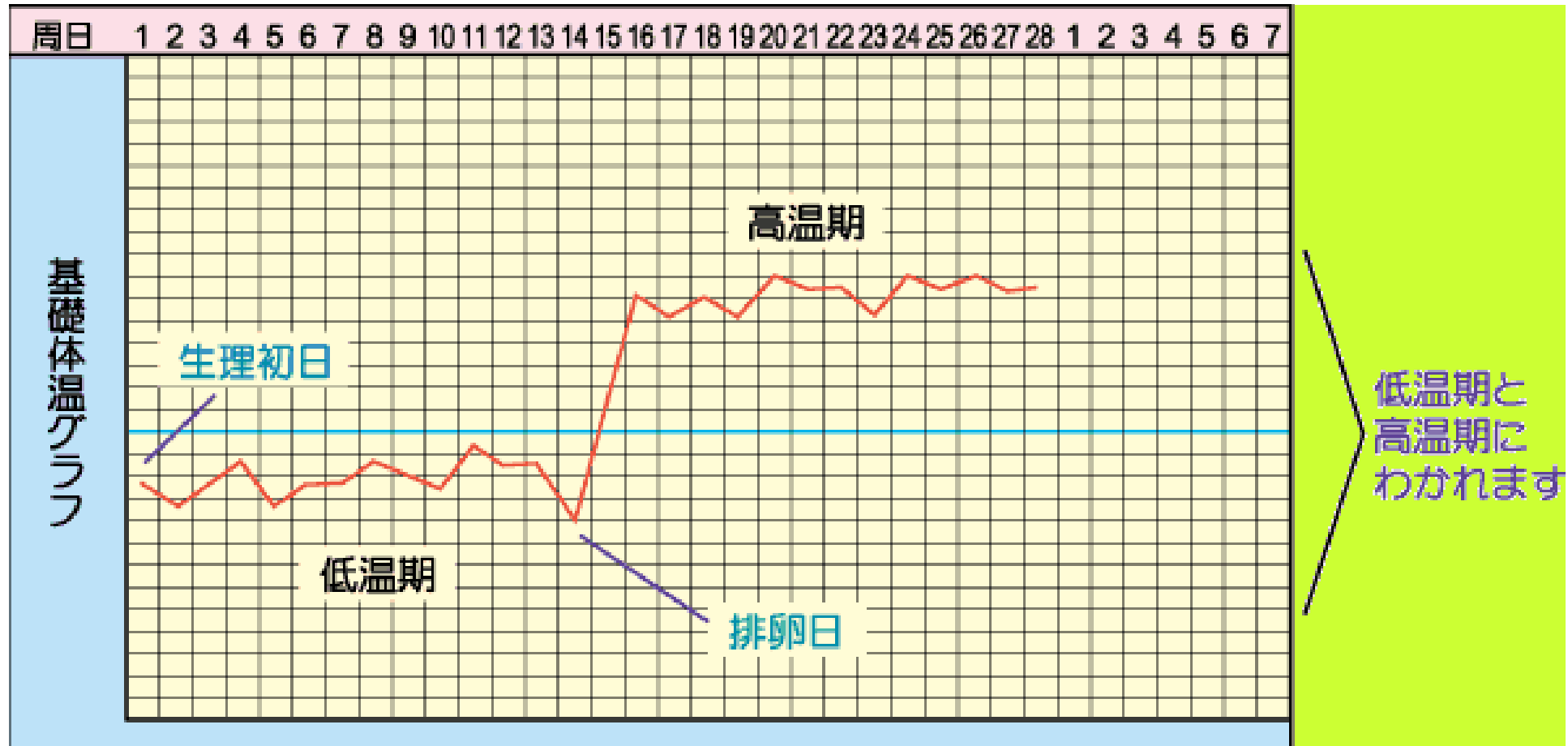
女子的**基础体温**(basal body temperature，指在早晨醒后起床前测定的体温)在月经期和月经后的前半期较低，**排卵前日最低**，排卵日升高 $0.3 \sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 。



女子月经周期中基础体温的变化

每天测定基础体温可有助于了解有无排卵和排卵的日期，即**基础体温突然升高的一天**。排卵后体温升高，可能是**孕激素**作用的结果。

女性基础体温图表（正常）



体温双相变化：排卵前体温较低，排卵后体温升高

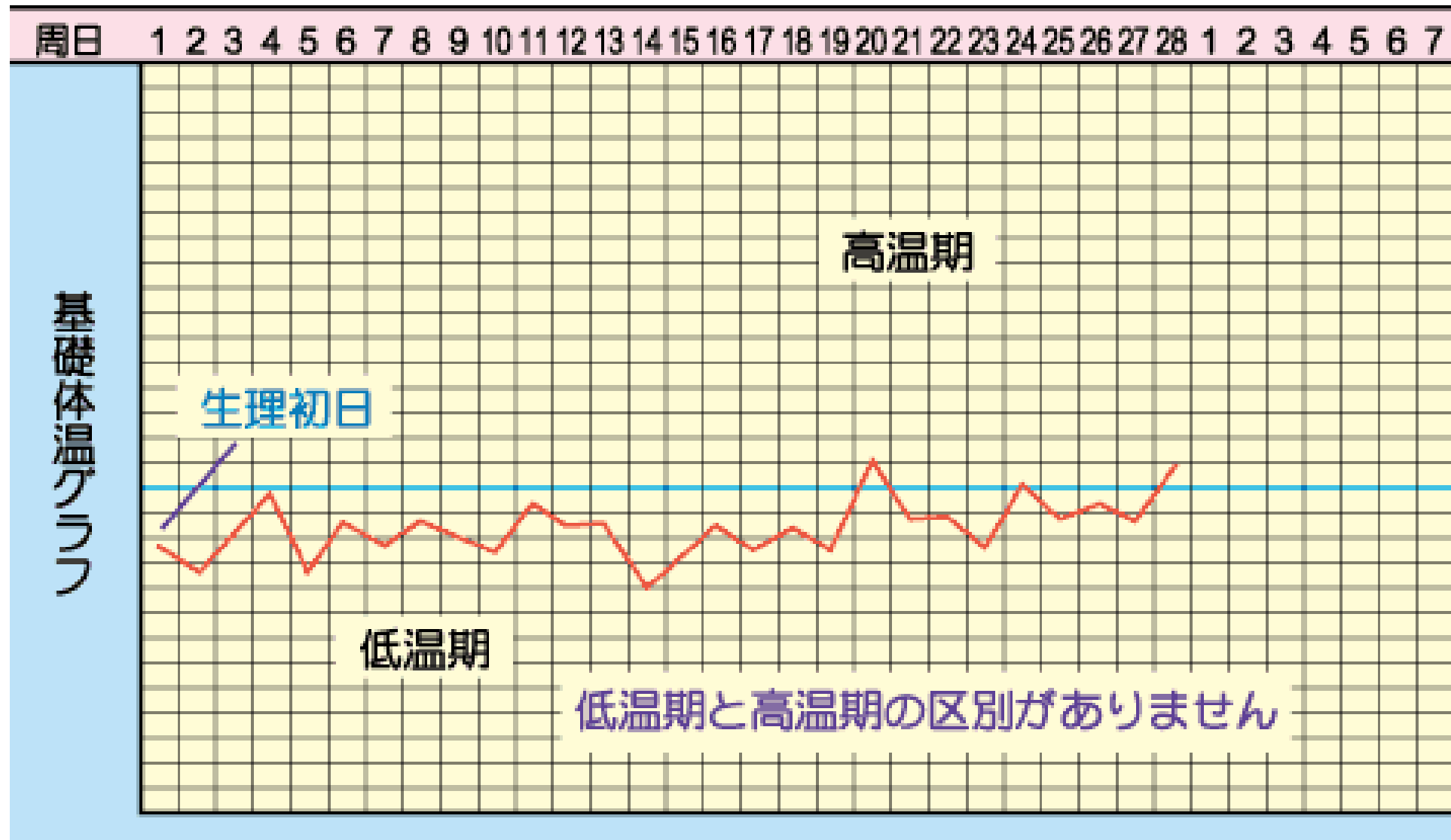
怀孕时基础体温图表 (高温持续21天无月经)



长期低温-排卵延迟-非妊娠时-基础体温图表



无双相-无排卵-基础体温图表 (低温期与高温期无区别)



3.年龄的影响：**新生儿体温 > 成年人 > 老年人。**

新生儿，特别是早产儿：体温容易受环境因素的影响。

老年人因基础代谢率低，体温也偏低。

4.肌肉活动

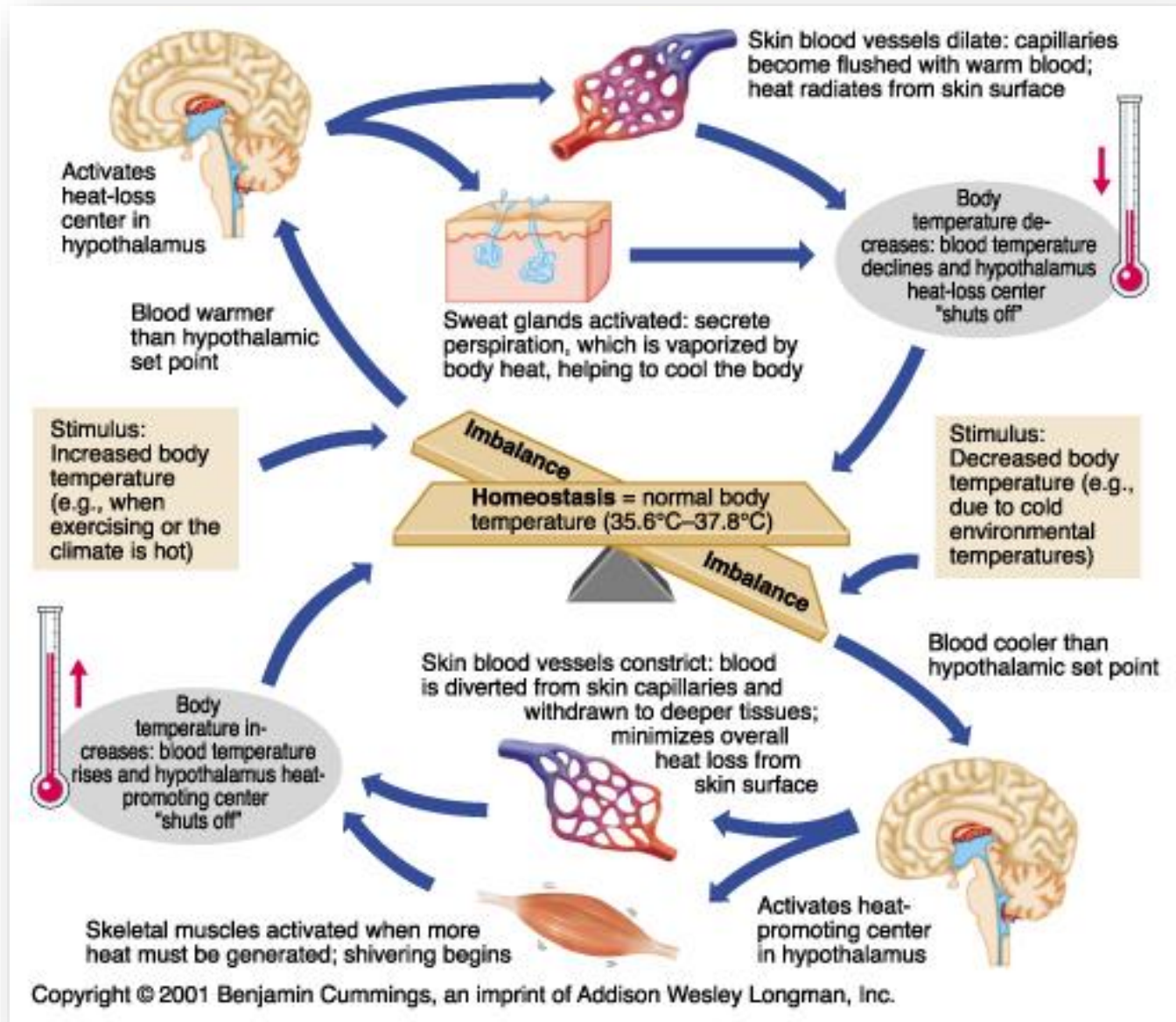
代谢增强，产热量增加，体温升高

5.其它

情绪激动、精神紧张、进食等情况对体温都会发生影响。

机体的产热与散热

恒温动物之所以能维持相对稳定的体温，就是因为
在体温调节机构的控制下，
产热和散热两个生理过程能
取得动态平衡的结果。



产热过程

1.主要的产热器官

人体主要的产热器官是**肝脏、大脑和骨骼肌**。

安静—**肝脏、大脑** 运动—**骨骼肌**

2.机体的产热形式

基础代谢产热：高 产热量高, 低 产热低

食物特殊动力效应产热

骨骼肌运动产热（随意运动）：轻度运动 3-5倍，剧烈运动 40倍

寒冷时增加产热 { 寒战产热(shivering thermogenesis)
非寒战产热(non-shivering thermogenesis)

- **寒战产热**：骨骼肌不随意的节律性收缩，其特点是屈肌和伸肌同时收缩，不做外功但产热量很高。

实际上，机体在寒冷环境中，通常在战栗之前，首先出现战栗前肌紧张，当肌紧张上升到一临界水平时就转变为战栗。

- **非寒战产热**：又称代谢产热，机体所有的组织器官都能进行代谢产热，但以**褐色脂肪组织**的产热量最大（约占70%）。



产热活动的调节

(1) 体液调节：

甲状腺激素是调节产热活动的最重要的体液因素。代谢率增加20% ~ 30%。特点：作用缓慢但持续时间长。

肾上腺素、去甲肾上腺素以及**生长激素**等也可刺激产热，特点是作用迅速，但维持时间短。

(2) 神经调节：

寒冷刺激→交感神经系统→肾上腺髓质→肾上腺素和去甲肾上腺素释放增多→产热增加。

寒冷刺激→下丘脑释放促甲状腺激素释放激素(TRH)→腺垂体释放促甲状腺激素(TSH)→甲状腺→甲状腺激素→产热增加。

散热过程

主要散热途径：皮肤（85%），呼吸道（15%），尿、粪等排泄物（1.5%）

散热的四种方式：辐射、传导、对流和蒸发

1、辐射散热(thermal radiation)

辐射散热：人体以发射**热射线**的形式将体热传给外界的一种散热形式。

影响因素：

1. 皮肤与周围环境的温度差
2. 机体的有效散热面积

在高温环境中作业（如舰船、炼钢人员），因环境温度高于皮肤温度，机体不仅不能辐射散热，反而会吸收周围的热量，故易发生中暑



2、传导散热(thermal conduction)

机体的热量直接传给与机体**接触**的温度较低的物体的一种散热方式。

影响因素：与之接触的物体的导热性、温度差、接触面积

- 水的导热性好，因此临床上常利用冷水袋或冰袋为高热患者降温。
- 脂肪的导热性差，因而肥胖者炎热的天气易出汗。

3、对流散热(thermal convection)

通过**气体**进行热量交换的一种散热方式。体热先传导给空气，然后通过对流将热量带走。

影响因素：风速、气温

- 衣服覆盖于体表，不易实现对流；棉、毛纤维间的空气不易流动，因此增加衣着可以保温御寒。
- 若在较密闭的高温环境中（如船舱内）或闷热气候，因空气对流差，易发生中暑。

辐射、传导和对流，只有在皮肤温度高于环境温度时才有意义。

4、蒸发散热

机体通过体表水分的蒸发而散失体热的一种形式。
分不感蒸发和可感蒸发。

当气温 \geq 体温时，蒸发是唯一的散热途径



➤ **不感蒸发**insensible perspiration：又称不显汗。指体液的水分直接透出皮肤和粘膜表面，在未聚成明显水滴前蒸发掉的散热形式。

不感蒸发是持续进行的。人体不感蒸发量约1000ml/日（皮肤约占2/3,肺占1/3）。∴临床上给病人补液时应考虑到由不感蒸发丢失的体液量。

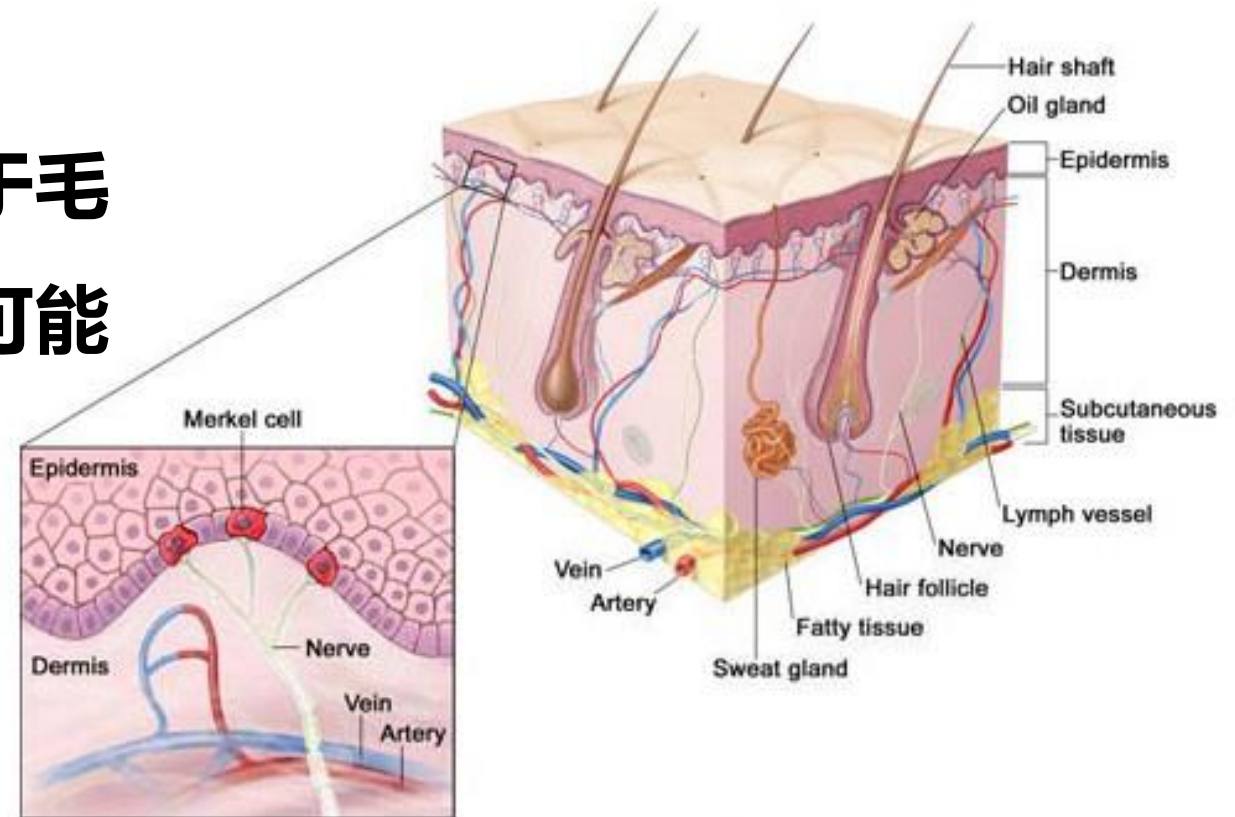
➤ 发汗 sweating or sensible perspiration :

又称可感蒸发。通过汗腺分泌汗液，汗液蒸发带走热量。

两种汗腺：大汗腺和小汗腺

大汗腺：腋窝和阴部等处，开口于毛根附近。它由青春期开始活动，可能和性功能有关。

小汗腺：全身皮肤



汗液

{ 水分： $> 99\%$ { 大部分为NaCl
固体： $< 1\%$ { 其余为KCl、尿素、乳酸等
无葡萄糖和蛋白质

∴汗液流经汗腺排出管的起始部时，有一部分NaCl可被重吸收，从而使最终排出的汗液成为低渗。

∴机体大量出汗可造成高渗性脱水，要补充大量的水份和适量的NaCl。

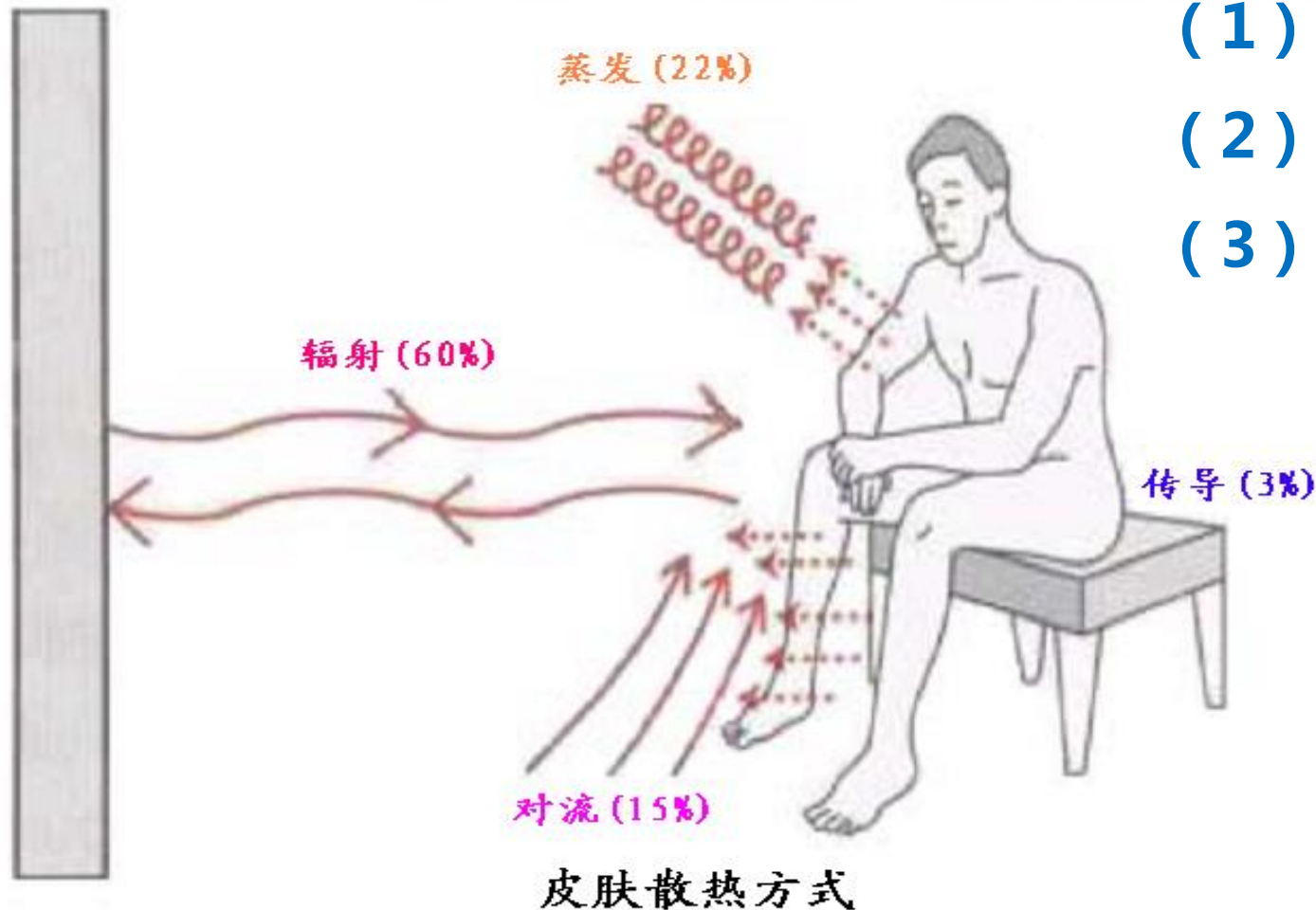
| | 温热性发汗 | 精神性发汗 |
|------|---------------------|-----------------------------|
| 汗腺 | 全身绝大部分汗腺分泌(手掌、足跖除外) | 手掌、足跖、前额和腋窝等部位汗腺 |
| 神经支配 | 交感神经的胆碱能节后纤维 | 肾上腺素能神经纤维 |
| 刺激 | 温热刺激 | 情绪激动或精神紧张 |
| 意义 | 加强散热，对体温调节有重要作用。 | 与体温调节无关，可能与湿润手掌和足跖，增加摩擦力有关。 |

降温措施：

(1) 冰囊、冰帽：增加传导散热

(2) 通气、减衣：增加辐射、对流散热

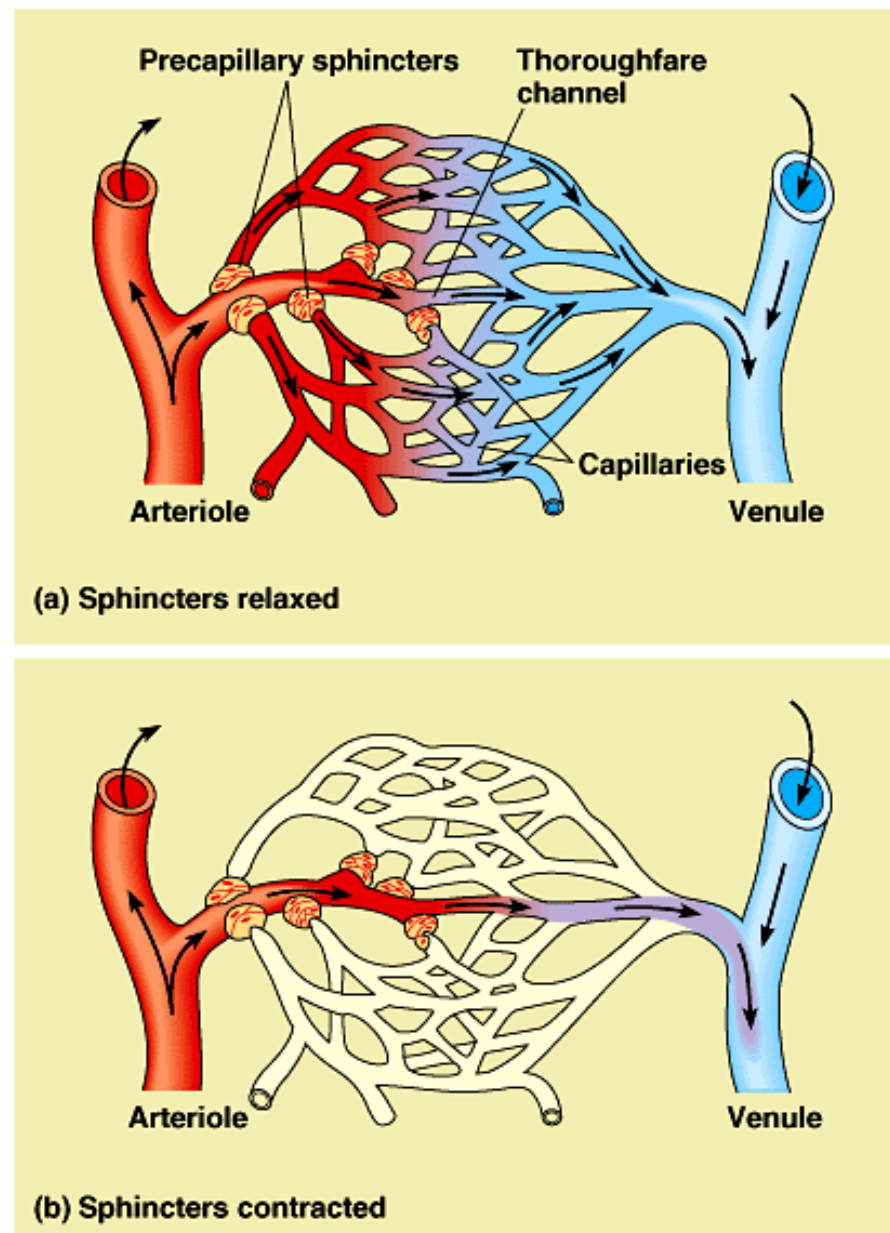
(3) 酒精擦浴：增加蒸发散热



循环系统在散热中的作用

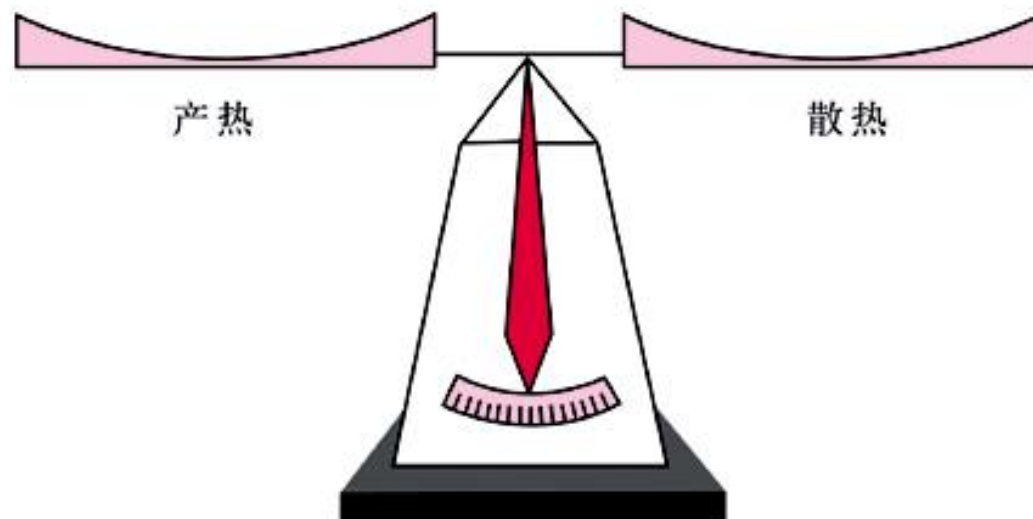
机体可以通过改变**皮肤血管的舒缩状态**来调节体热的散失量。

炎热→交感神经紧张活动降低
→皮肤小动脉舒张，动-静脉吻合支开放→皮肤血流量增加→散热量增加。



- 代谢性产热
 - 基础代谢、肌肉活动
 - 食物特殊动力效应
 - 非寒颤产热
- 反射性产热
 - 寒颤
 - 皮肤血管收缩
- 行为性产热
 - 环境
 - 增加衣着
 - 食物获得热量

- 物理性散热
 - 辐射
 - 传导与对流
 - 不感蒸发
- 反射性散热
 - 发汗
 - 皮肤血管舒张
- 行为性散热
 - 环境
 - 减少衣着
 - 食物散热



机体的产热和散热平衡

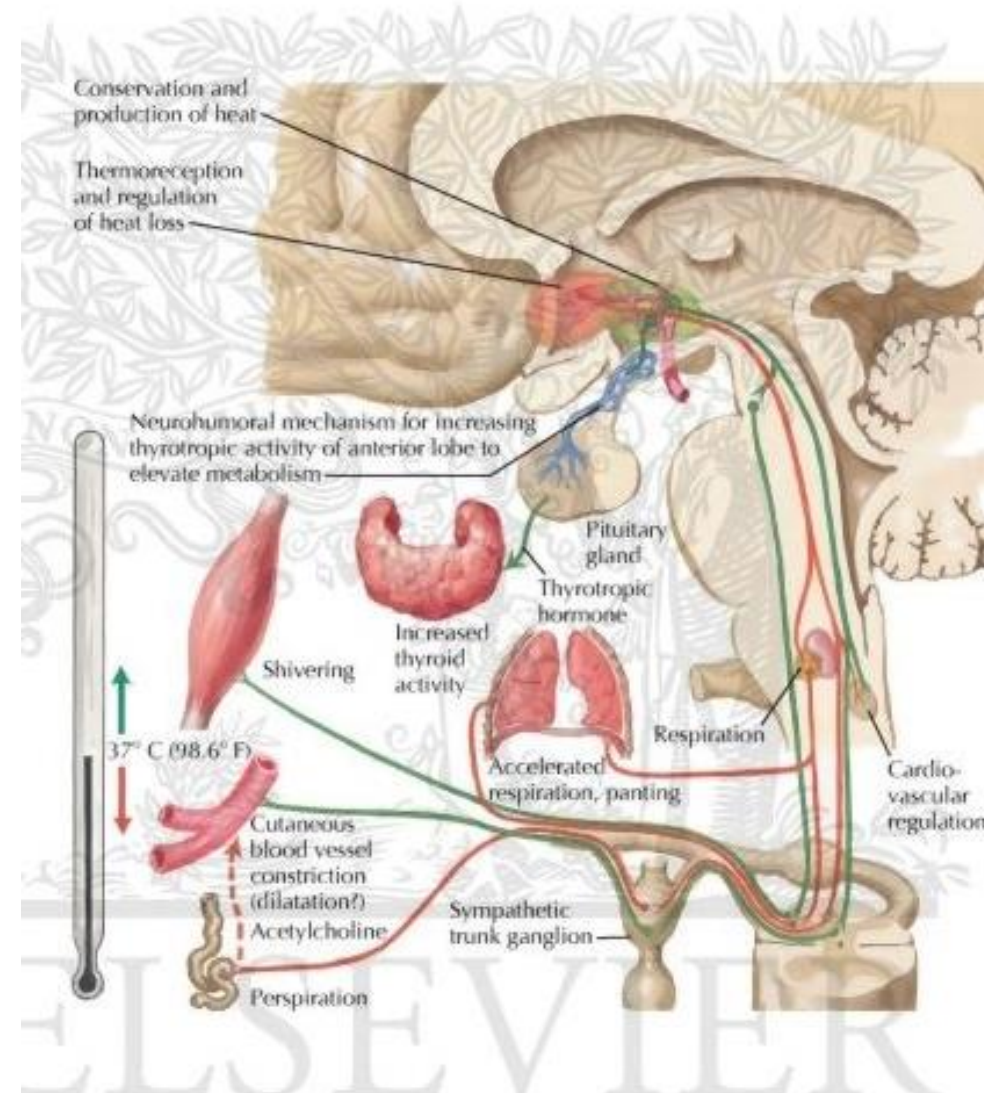
体温的调节

（一）行为性体温调节：

机体通过一定的行为来维持体温的相对恒定。

（二）自主性体温调节：

恒温动物和人的体温，在下丘脑体温调节中枢的控制下，通过增减皮肤的血流量、发汗、战栗等生理反应，以维持产热和散热过程的动态平衡。



外周温度感受器

- 分布在皮肤、黏膜和腹腔内脏游离的神经末梢

皮肤的温度感受器对温度的变化速率更为敏感

- 两种温度感受器：冷感受器、热感受器

局部温度升高时，热感受器兴奋；

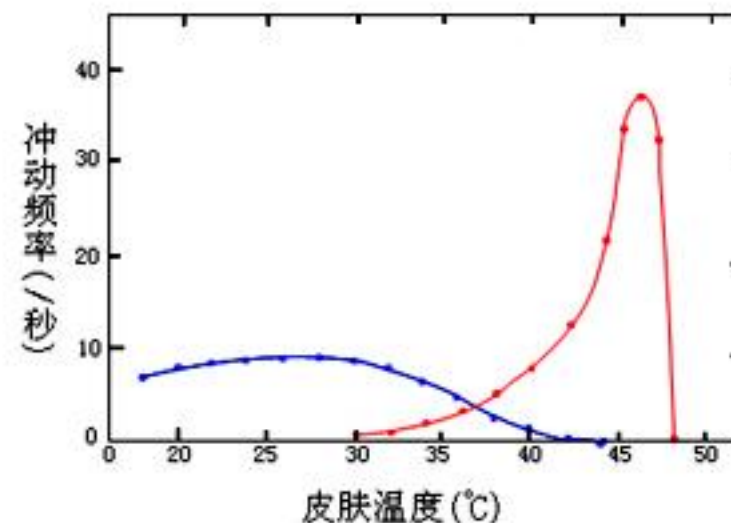
温度降低时，冷感受器兴奋。

热感受器：43°C冲动频率最高

冷感受器：28°C冲动频率最高

皮肤温度约30°C时引起冷觉；

35°C时引起温觉



中枢温度感受器

存在于中枢神经系统内的对温度变化敏感的**神经元**。分为：

热敏神经元(warm-sensitive neuron)：

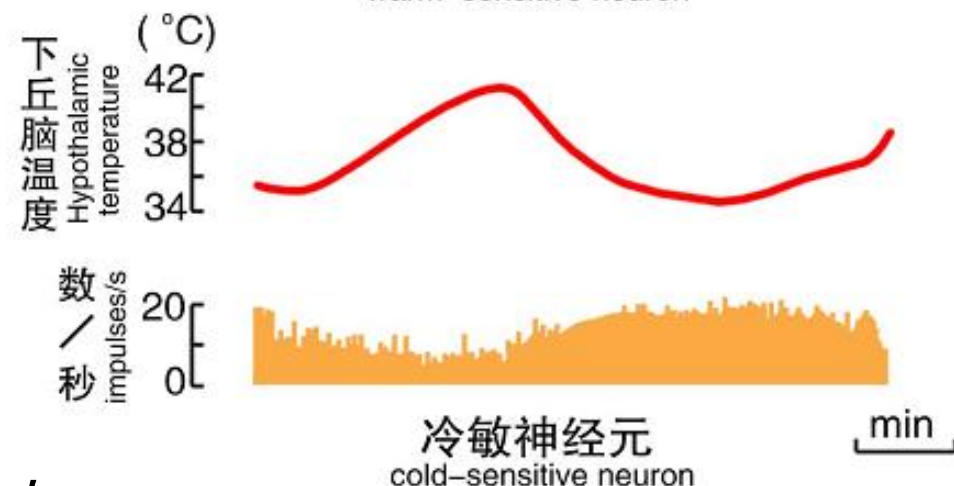
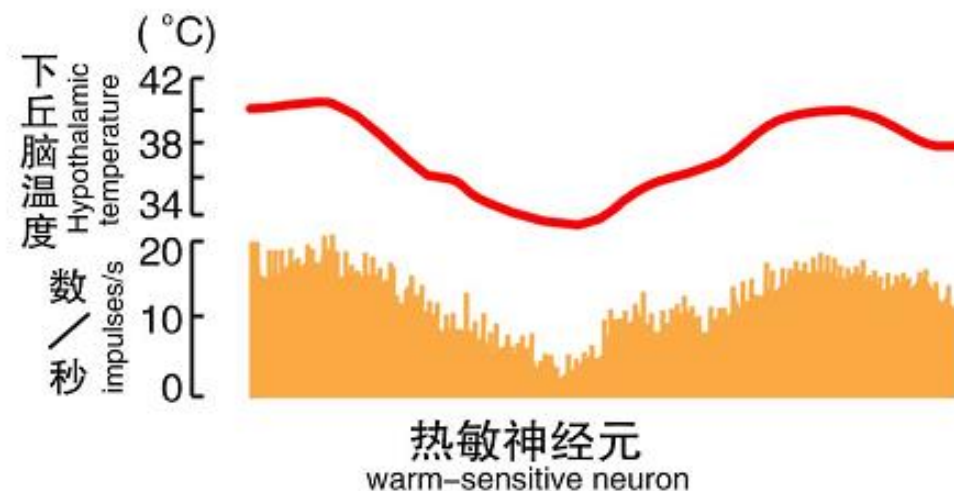
局部组织温度升高时冲动发放频率增加。

冷敏神经元(cold-sensitive neuron)：

局部组织温度降低时冲动发放频率增加。

特点：

- **对温度变化敏感** 局部脑组织温度变动 0.1°C ，两种神经元的放电频率就会发生变化
- **不出现适应现象**



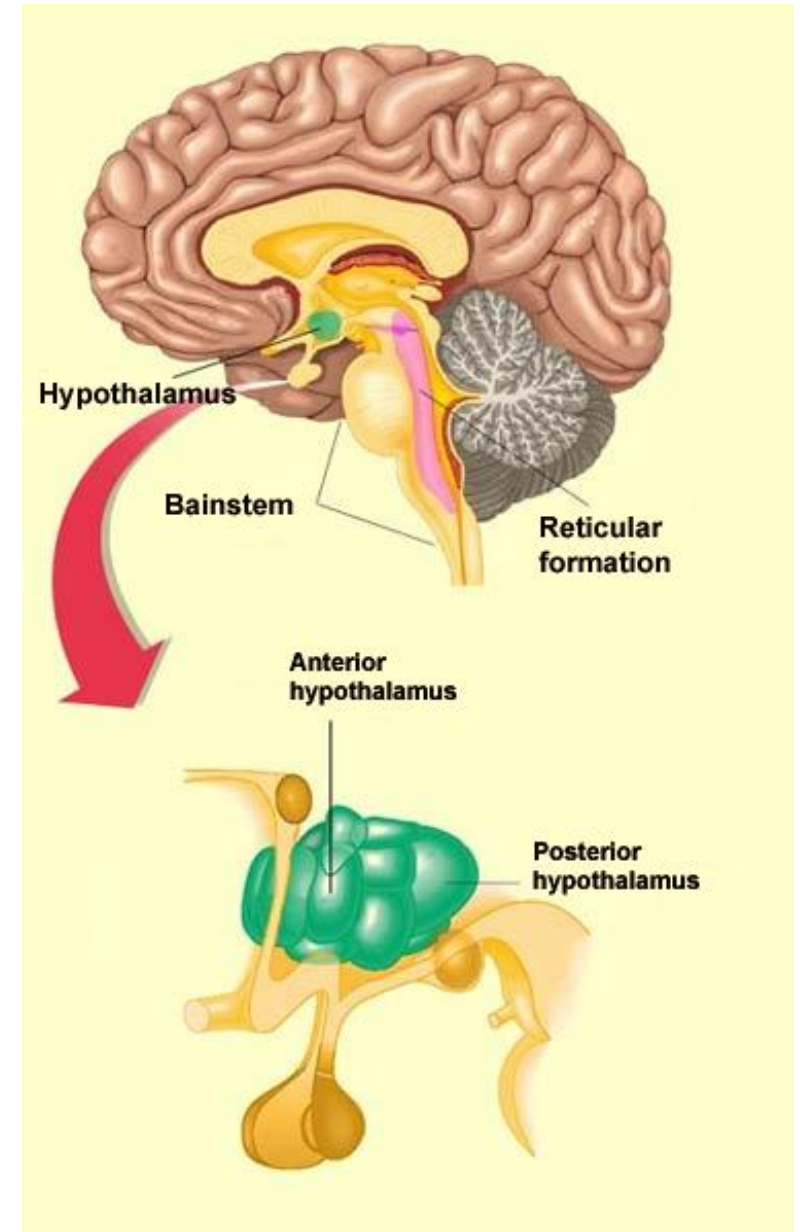
由下丘脑视前区导出的
温度敏感神经元的放电活动

体温调节中枢

视前区-下丘脑前部

(preoptic-anterior hypothalamus , PO/AH)

虽然从脊髓到大脑皮层的整个CNS中都存在调节体温的中枢结构。但从恒温动物脑的分段切除实验证明，只要保留下丘脑及其以下神经结构的完整，动物仍具有维持体温相对恒定的能力。说明：**调节体温的基本中枢位于下丘脑。**



体温调节中枢

- PO/AH中的温敏神经元能**感受**局部脑温的变化
- PO/AH还能对中脑、延髓、脊髓、皮肤等处传入的温度信息发生反应，以及能直接对致热物质、5-HT、NE等物质发生反应，说明：**PO/AH具有体温调节整合中枢的地位。**



温度敏感神经元起**调定点**作用，其规定的温度值的高低决定体温水平的高低。

调定点水平是由PO/AH中热敏神经元和冷敏神经元之间相互制约而又协调的活动形成。

调定点

体温在偏离某一临界温度（ 37°C ）时，将会导致明显的产热和散热改变，从而使体温恢复到临界温度，这一临界温度即称调定点。

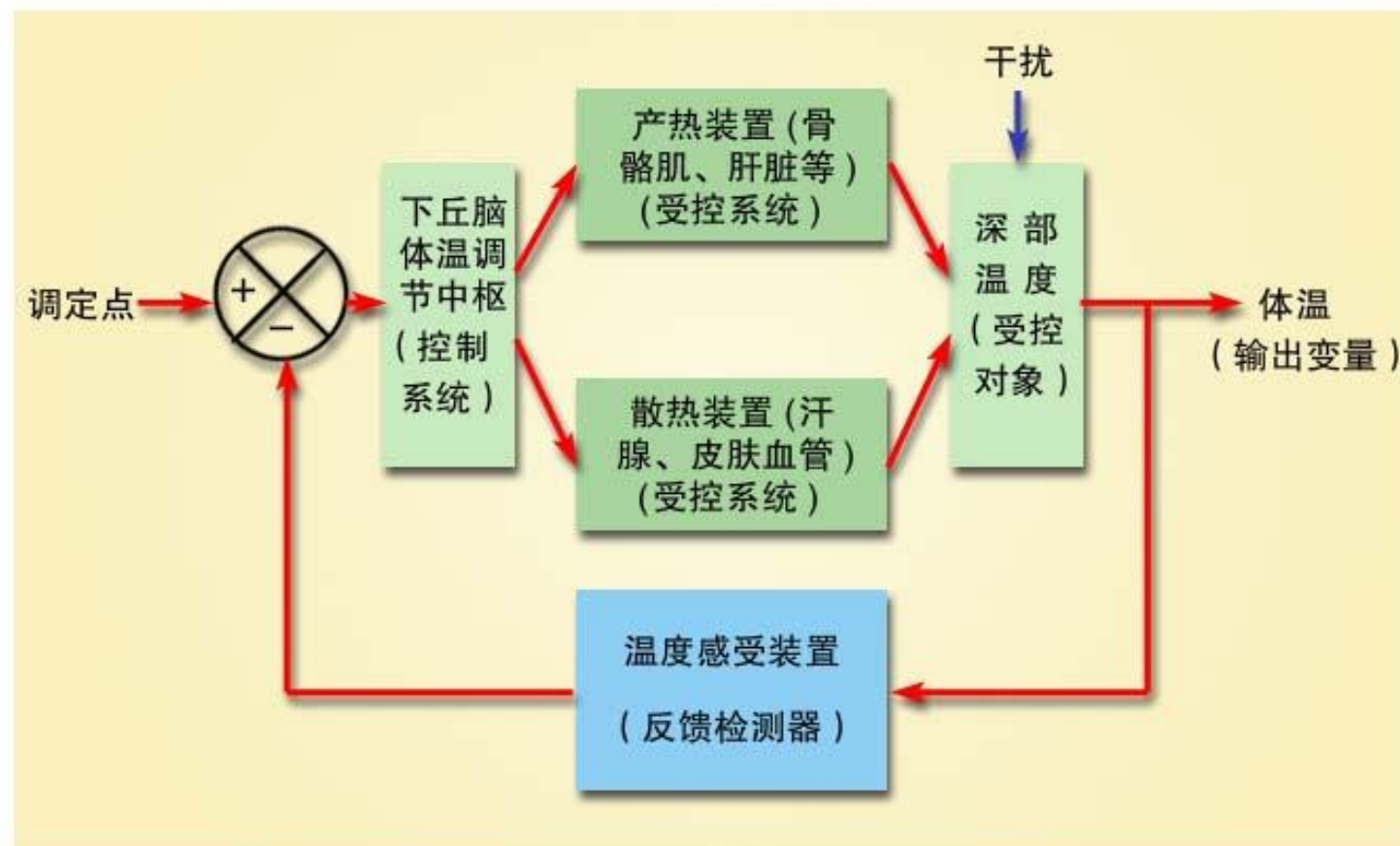
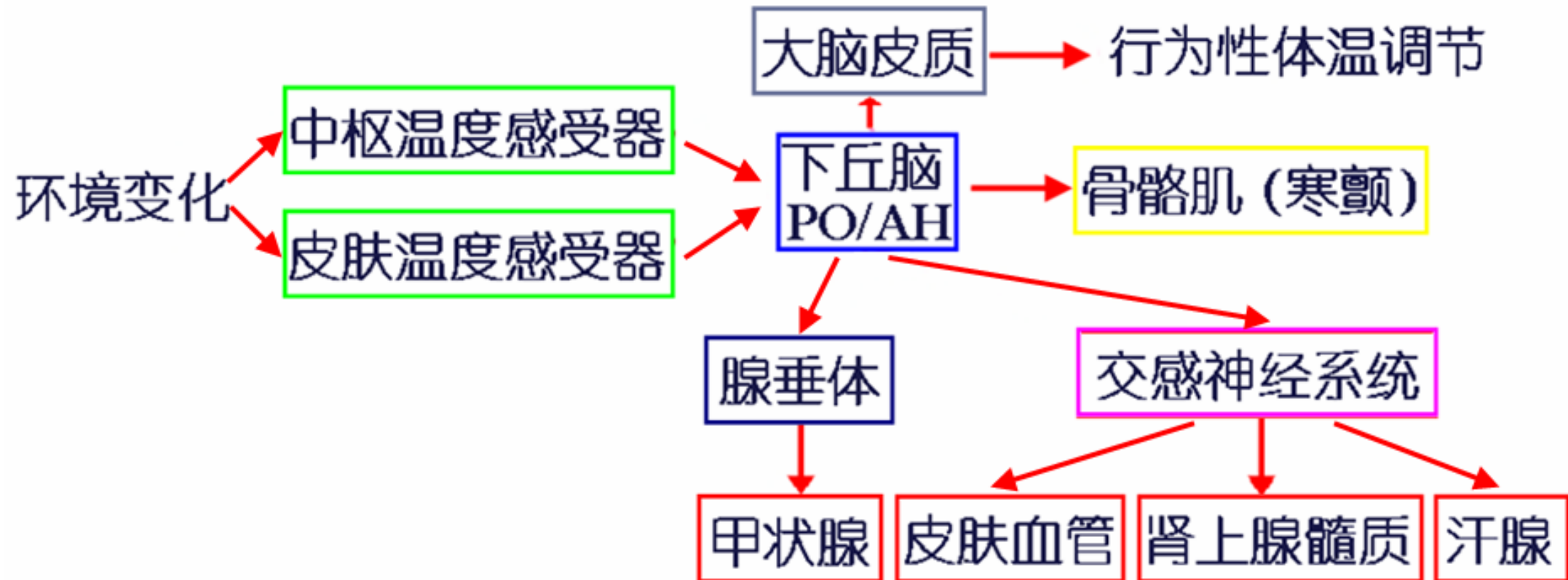


图 - 体温调节自动控制示意图

体温调节的传出路径和效应器



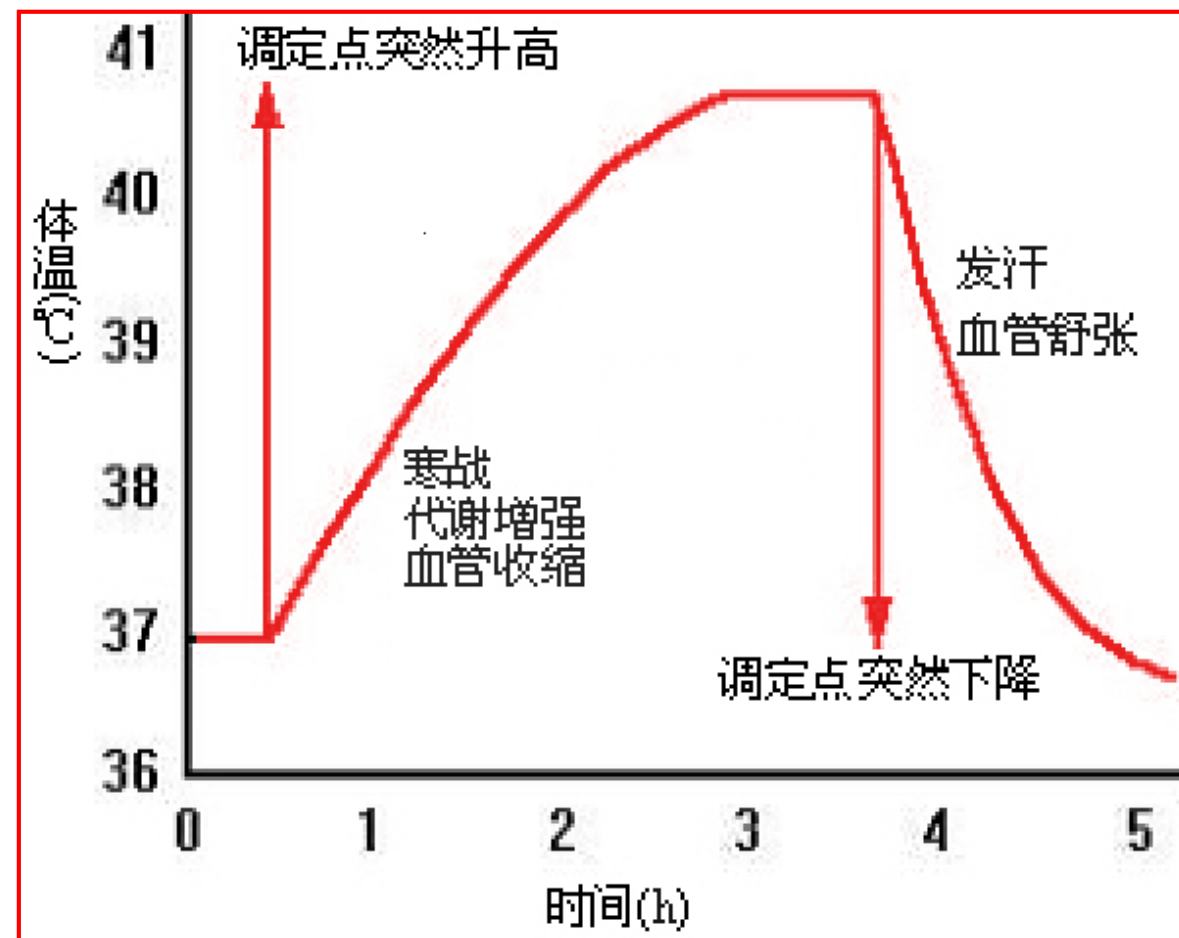
体温调节机制

“调定点”学说：即体温调节类似恒温器的调节；PO/AH中的温度敏神经元可能起着“调定点”的作用；“调定点”所规定的温度值决定着体温的高低。

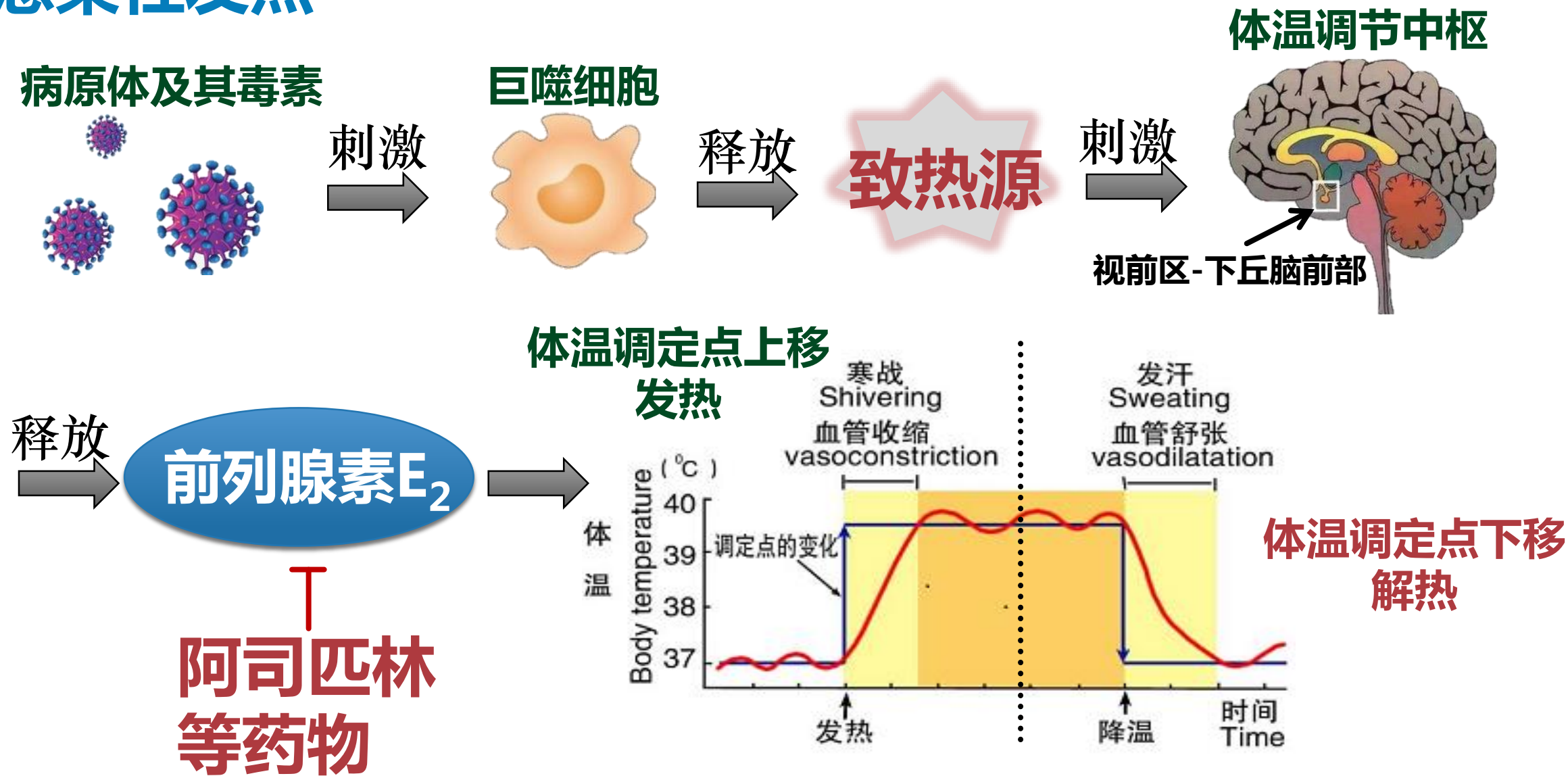
调定点的干扰因素：

致热原：调定点↑

孕激素：调定点↑



感染性发热

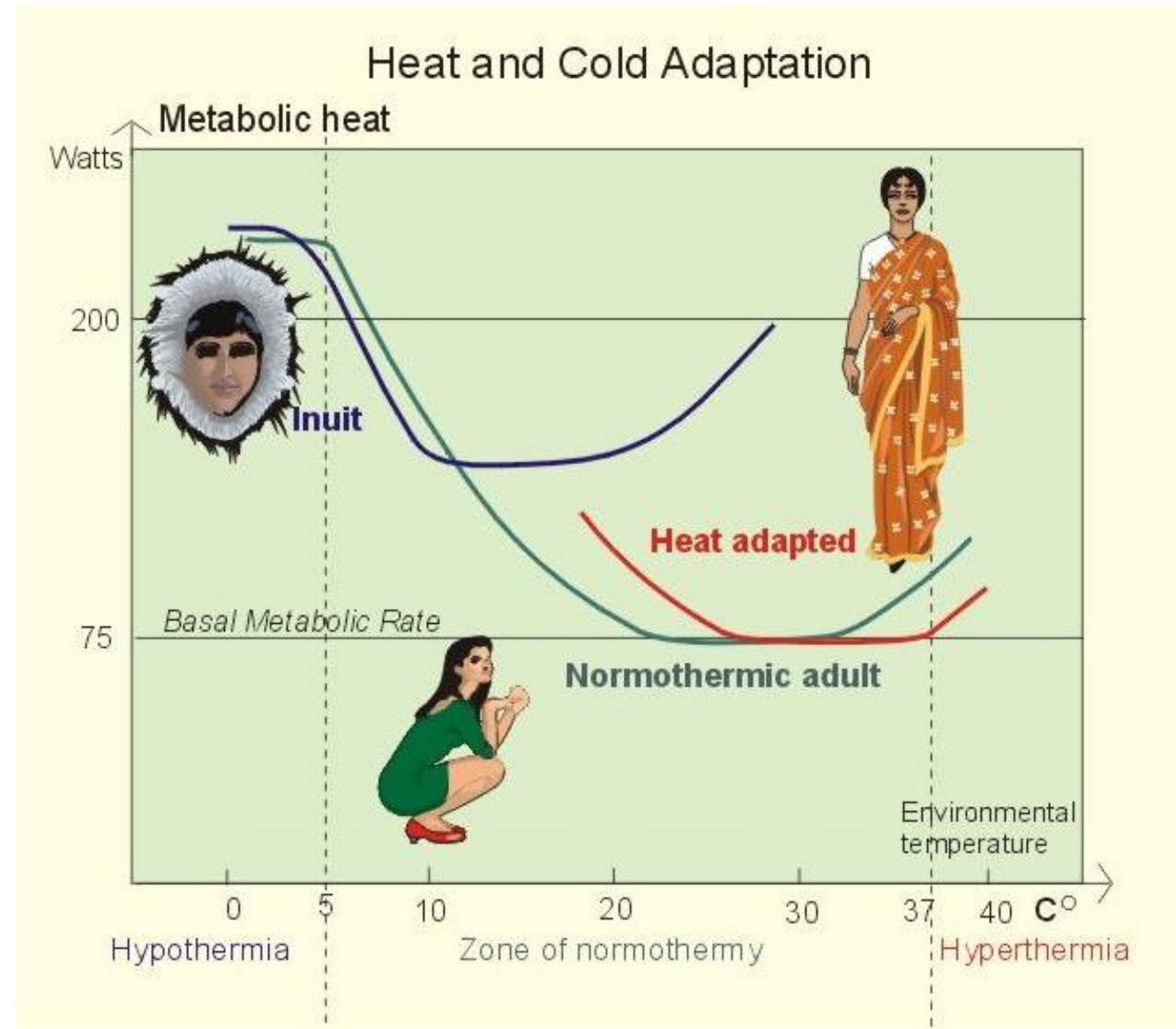


影响体温调定点变化的因素

| | 视前区-下丘脑前部 (PO/AH) | | 调定点 | 结果 |
|------|-----------------------------|-----------|-----|----------|
| | 热敏神经元 | 冷敏 神经元 | | |
| 孕 酮 | — | + | 上移 | 体温 升高 |
| 致热源 | 阈值升高 | | 上移 | 发热 |
| 阿司匹林 | 去除对热敏N元的抑制 (抑制 P G E 合成) | | 复位 | 退热 |

温度习服

- 热习服：发汗量增加、醛固酮分泌增加
- 冷习服：甲状腺激素增加，可引起甲状腺肿



复习思考题

1. Page 190
2. 食物的氧热价；食物的卡价；呼吸商；非蛋白呼吸商；能量代谢；食物的特殊动力效应；热敏神经元；基础代谢率
3. 影响能量代谢的因素。
4. 试述在临床发热状态下机体的体温调节。
5. 试述在寒冷和炎热环境体温怎样保持恒定？
6. 精神性发汗和温热性发汗有哪些不同？
7. PO/AH在体温调节中起哪些作用？
8. 人体散热方式主要有哪些？根据散热原理，如何降低高热病人的体温？
9. 机体的主要产热和散热过程。
10. 根据调定点学说，解释细菌导致发热的机制及阿司匹林解热的机制。