

# 第 1 章

## 体 温

### 第一节 环境温度的一般效应与温标

#### 一、温度的概念与环境温度

##### (一) 温度的概念

温度是表征物体冷热程度的物理量。从微观上来说,物体温度的高低标志着组成物体的大量分子无规则运动的剧烈程度,即对其分子平均动能大小的一种度量。显然,物体的物理、化学特性与温度密切相关。

温度概念的建立及温度的测量都是以热平衡为基础。当两个冷热不同的物体接触后就会产生导热换热,即热量从高温物体向低温物体传递,直到两物体温度相等,即达到热平衡为止,这就是温度最基本的性质。

##### (二) 环境温度

环境温度是表示环境冷热程度的物理量。地球上气温在南极地区最低达 $-89.2^{\circ}\text{C}$ 和 $-94.5^{\circ}\text{C}$ ,在北极地区可低到 $-70^{\circ}\text{C}$ ,西伯利亚的奥米亚康 1 月份平均气温为 $-50^{\circ}\text{C}$ 以下,曾记录到 $-71^{\circ}\text{C}$ 。热带沙漠的气温可高达 $85^{\circ}\text{C}$ ,温泉的温度也可达 $90^{\circ}\text{C}$ 以上。从冰封的南极高原到沸腾的温泉,几乎在各种环境温度下,都有生命存活。尽管地面的温度和气温变化较大,但地下或土壤内的温度,甚至雪层下面的温度都比表面平稳,海洋深处的温度虽然比表面低,却比较稳定,大部分生物生活在接近地球表层。温带的气候一年四季不同,赤道地区的温度比较平稳,但是赤道地区或赤道附近的高山上昼夜温差也很大。

##### (三) 环境温度测量方法

常用的环境温度测量方法有干球温度法、湿球温度法和黑球温度法。

1. 干球温度法 在温度计的水银球不加任何包被的情况下进行测量,测出的温度是大气温度,俗称气温。

2. 湿球温度法 用湿棉纱把温度计的水银球包起来进行测量,测出的温度是大气湿度饱和情况下的温度。干球温度与湿球温度的差值可反映出环境的湿度。

湿球温度与气温和水汽压力(分压)之间的关系为:

$$h_e(p_w - p_a) = h_c(T_a - T_w) \quad (\text{式 1-1})$$

式中  $h_e$  为热蒸发系数,  $p_w$  为湿球温度下的饱和水汽分压(湿球表面的水汽压力),  $p_a$  为周围环境中的水汽分压,  $h_c$  为热对流系数,  $T_a$  为干球温度(气温),  $T_w$  为湿球温度。

3. 黑球温度法 将温度计的水银球放入一个直径为 15cm 外涂黑色的空心铜球的中心进行温度测量, 这种温度计又称黑球温度计或铜球温度计。黑球温度 ( $T_g$ ) 可以反映环境的热辐射情况, 其关系为:

$$T_g = (h_c \cdot T_a + h_r \cdot T_r) / (h_c + h_r) \quad (\text{式 1-2})$$

式中  $T_r$  为平均辐射温度,  $h_r$  为热辐射系数。

这三种温度所反映的环境温度性质是不同的, 所以在表示环境温度时必须说明所采用的测量方法。

#### (四) 热生理指标

环境温度对于人体产生的生理效应, 除了温度的高低外, 还与环境中的湿度和风速(空气流动速度)等因素有关。因此在环境生理学上常采用温度-湿度-风速的综合指标来表示环境温度。这类温度指标统称为热生理指标, 常用的有以下几种。

1. 有效温度 根据人的主诉制定的温度指标。它将温度、湿度和风速等条件综合在一起, 成为一种具有同等温度感觉的最低风速和饱和湿度的等效气温指标。同样数值的有效温度对人来说有同等的主诉温度感受, 应用最广。但是有效温度只考虑了湿度和风速, 而没有考虑热辐射对人体的影响。

2. 干-湿-黑球温度 以干球、湿球、黑球三种不同温度数值按一定的比例加权平均求得温度指标。这种温度指标能反映环境温度对人体生理影响的程度。

3. 操作温度 是空气温度和平均辐射温度对各自的换热系数的加权平均值, 当空气温度与平均辐射温度相同时, 操作温度等于空气温度。

## 二、环境温度的一般效应

一般有生命的机体均被它们所能生存的温度极限所限制, 通常是生活在十分狭窄的温度范围内, 越是复杂的有机体, 这种限制越严。在防止脱水和细胞内过度冰晶形成的情况下, 一些单细胞生物被冷却到接近绝对零度 ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) 时, 其生存能力仍能维持一段时间。不过, 在这样的温度下, 所有的代谢活动完全被抑制。一些多细胞生物通常是不能耐受冰点以下的温度, 因为冷却到  $0^{\circ}\text{C}$  以下, 细胞内产生冰晶, 胞内溶液渗透压升高, 就会损害其结构。对于大多数的恒温动物, 即便是高于冰点的低温, 也会妨碍代谢过程而导致损伤或死亡。但是, 生活在两极海域的鱼, 因血浆中有抗冻蛋白, 可防止体内冰晶的生成, 这些鱼能在低于其血液冰点的

海水中生活。生活在北极圈内的一种树蛙,其细胞有最大的耐受脱水能力,体内含冰量可达 60%~70%(即-5℃下冰冻),在冻结中存活。

大多数细胞的温度上限在 45℃左右。一般温度上升到 45℃以上,蛋白质开始变性,变性的蛋白质就失去了其功能特性。但也有很特殊的藻类,它们能在 70℃的热泉中生长;有些细菌甚至在接近 100℃的环境温度条件下也能存活;在深海洋的热裂隙口附近的温度为 250℃左右,仍有细菌生活。哺乳类动物细胞在预先处理后,能惊人地增加其耐受热损害的能力。有证据表明,热激蛋白提供了保护性机制,参与了耐热能力的获得、维持和衰退。有人用 HeLa 细胞中总蛋白的合成活动演示,耐热力的发展可在 42℃下连续进行,或在 45℃短时处理中形成。分子量为 70kDa 的热激蛋白在帮助热损伤的细胞核仁修复中起特殊作用。因此细胞功能大多限制在 0~45℃的温度范围内,可以认为这就是生命的温度范围。

对某一个动物种系来说,这种温度限制,体现于物种的优选温度(preferred temperature)。能适应较宽的环境温度范围的动物(如温带地区的动物),就必须有代谢的补偿,才能达到对温差较大环境的习服。有机体受到酶活性的适宜温度限制,催化同一生化反应;有些机体仅有单一的酶,限制了生存的范围;而另一些机体对相应的反应可有复杂的不同的酶,使其机体能在更宽的温度和 pH 范围内生存。代谢的代偿可以重新调整生化机制以对抗温度的影响,如夏季催化某反应使用某一种酶,到冬季则用另一种酶,使机体能适应季节性温度变化。生理生化过程很少因温度变化而导致严重的波动或中断。温度对于构成大量生物活动的基础化学反应速率的效应,可以用下列方程式来表示:

$$k = Ce^{-\Delta E/RT} \quad (\text{式 1-3})$$

式中  $k$  是反应速率, $C$  是常数, $e$  是自然对数的底数(2.718), $\Delta E$  是反应的激活能, $R$  是气体常数, $T$  是绝对温度。这个方程式曾被认为适用于平滑肌的收缩速率、呼吸运动等,因为这些活动都受温度的影响。由选择两个相隔 10℃的温度,并测定在此温度下有机体的活动性,这些活动性的比率被称为  $Q_{10}$ ,可以得到下列简便的方程式:

$$Q_{10} = (k_1/k_2)^{10/T_1-T_2} \quad (\text{式 1-4})$$

有人曾从发热病人测出人体代谢率的  $Q_{10}$  约为 2.5。大多数生物学过程的  $Q_{10}$  为 2~3,亦即温度每升高 10℃,反应的速率升高 2~3 倍(图 1-1)。如果一个反应或生理过程是非温敏性的,其  $Q_{10}$  应为 1。在处理发热并以静脉输液给予营养的病人时, $Q_{10}$  效应则有重要临床意义,体温高于正常 1℃,体液和能量的需要增加 13%。在组织处于高温时,可产生另一方面的危险,当  $Q_{10}$  大于 2.5 时,一些细胞蛋白质迅速失活。这样,当温度升高时,组织被热破坏的速度远远超过由于代谢活动增加而得到修复的速度,于是造成组织损伤或烧伤。

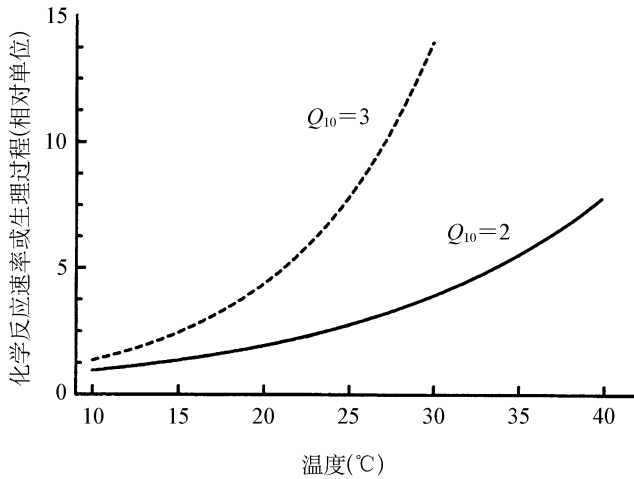


图 1-1 温度对化学反应速率或生理过程的影响

(引自: Gordon CJ. Temperature and toxicology. New York: CRC Press, 2005.)

虽然人体组织在 45~50℃ 的温度时,就有被烧伤的事实,而另一些具有比较耐热的生物体组织却能够在接近 100℃ 的温泉中生存和发育。不过即使对于体温稳定的有机体,持续地生存于极高或极低的温度中是不可能的,这类生物也是受温度所限制的。

由于生命系统中各个组成反应的  $Q_{10}$  并非精确一致,在生理过程的复杂网络中,联系在一起的各种反应的  $Q_{10}$  不相同,温度的变化就会使机体的功能平衡与整合中断,为了保持内环境的稳定,机体必须有能力代偿或阻止温度的变化。如果一个人的平均体温每降低 10℃,代谢率就可降低 2~3 倍。利用这一事实,在一些外科手术中,如果必须阻断血流时,就可用局部或全身降温的方法降低组织的代谢,以防止过度缺氧。另外,动物种系不同,温度对其生理过程的影响则不同,因而它们的生理过程的  $Q_{10}$  也不同(表 1-1)。

### 三、温标

在一定的温度下,许多物理量总是有一定的数值。临床上普遍使用的水银温度计是利用一定质量的水银的体积来指示温度。一根细玻璃管与一个较大的球泡相连,在球泡和一部分管子中注入水银,而管子的其余部分是抽空并且密封的。当温度增加时,水银的体积比球泡的体积增加得快,所以管中的水银就上升了。

表 1-1 温度对不同种系动物细胞和生理过程的影响

动物	生理指标	温度系数	Q <sub>10</sub> 温度范围
狗	心率	正	1.52(33~37℃)
豚鼠	心率	正	1.32(32~38℃)
大鼠	心率	正	1.62(35~38℃)
青蛙	心率	正	2.10(15~25℃)
鱼	心率	正	1.77(12~25℃)
大鼠	大脑皮质代谢	正	2.40(30~39℃)
	心室肌代谢	正	1.60(30~39℃)
	肝脏代谢	正	2.16(30~39℃)
兔	神经传导速度	正	3.70(20~40℃)
豚鼠	神经传导速度	正	1.30(30~40℃)
青蛙	神经传导速度	正	1.50(15~36℃)
人	手和臂部神经动作电位的幅度	负	0.40(21~31℃)

为了校准温度计,通常选择两个参考温度,再把它们之间的间隔划分为若干个相等的刻度。这样,我们可以取在标准大气压下水的冰点和沸点作为参考温度,并且把它们之间的间隔分为 100 个相等的刻度。如果我们设冰点是 0℃,设沸点是 100℃,这样就得到了摄氏温标。在世界上大部分地区的日常生活中,都采用这种温标,并且在科学工作中也广泛应用。在美国,采用的是华氏(°F)温标。最初,它的定义是把一种规定好了的冰-水-盐混合物的最低温度作为 0°F,并把人体温度规定为 96°F。由于人体温度是可变的,所以后来又把这个温标重新定义为:水的冰点是 32°F,沸点是 212°F。下述方程给出了摄氏温度(T<sub>C</sub>)与华氏温度(T<sub>F</sub>)之间的关系:

$$T_C = 5/9(T_F - 32^\circ\text{F}) \quad (\text{式 1-5})$$

例如:正常的体温是 98.6°F。在摄氏温标上它是:

$$\begin{aligned} T_C &= 5/9(T_F - 32^\circ\text{F}) \\ &= 5/9(98.6^\circ\text{F} - 32^\circ\text{F}) = 37^\circ\text{C} \end{aligned}$$

## 第二节 体温及其生理波动范围

人和高等动物机体都具有相对稳定的体温,故称为恒温动物(homeothermic animal),正常体温是机体进行新陈代谢和生命活动的必要条件。

### 一、机体热量

人体组织的比热为 3.473kJ/(kg·°C),根据人体体重和体表面积即可计算出机体热量(heat, H):

$$H(\text{kJ}/\text{m}^2) = (0.67T_c + 0.33T_s) \times 3.473 \times \text{体重}(\text{kg}) \div \text{体表面积}(\text{m}^2) \quad (\text{式 1-6})$$

式中  $T_c$  为体核温度,  $T_s$  为皮肤温度。

人体在冷环境中散热增加,如产热不能代偿散热,则人体体热量减少。散热超过产热造成的体热负平衡称为热债(heat debt,  $D$ ),可根据下式计算:

$$D(\text{kJ}/\text{m}^2) = H_2 - H_1 \quad (\text{式 1-7})$$

式中  $H_1$  为冷暴露前机体热量,  $H_2$  为冷暴露后机体热量。

单位时间内的热债称为热债率( $D/h$ ),单位为  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

影响体温和机体热量的因素包括冷暴露的程度和时间、人体的冷适应程度、体力活动强度、作业安排及防寒装备的使用等。

## 二、体温的概念

体温(body temperature)是指机体深部的平均温度,即心、肺、脑和腹腔脏器等处的温度。正常情况下,机体内产生的热量主要通过体表散失到周围环境中。根据物理学原理,接近机体表面部分的温度比机体中心部位的温度低。接近体表部分的温度称为体壳温度(shell temperature)或表层温度,是指人体的外周组织,即皮肤、皮下组织和肌肉等处的温度。其中最外层皮肤表面的温度为皮肤温度(skin temperature)。体壳温度不稳定,形成从里至外的温度下降,并且由于机体几何形状不规则而形成不同部位之间的复杂的温度差;体壳温度也易受环境温度等因素的影响而变动,特别是皮肤和四肢末端的温度波动更大。体核温度(机体深部温度)较体壳温度高,而且比较稳定,各部位之间的差异也小。体核温度范围和体壳温度范围的相对比例,可随环境温度变化而发生较大改变。在寒冷环境中,体核温度范围缩小至机体的深部;在炎热环境中,体核温度可扩展到四肢(图 1-2)。

## 三、机体深部(体核)温度

机体深部温度主要是指心、肺、脑和腹腔脏器等处的温度,通常称为体核温度(core temperature,  $T_c$ )。尽管活细胞组织可耐受而不致受损害的温度范围从冰点到  $45^\circ\text{C}$  左右,远比体温调节的限度要宽得多,但是通常人体内深部温度控制在  $37^\circ\text{C}$  左右这样一个比较窄的范围内(图 1-3)。当人体的体核温度相对恒定在  $37^\circ\text{C}$  左右时,它们的功能最为完善,也是机体健康的指标。若显著地偏离这种相对恒定的温度时,就会出现疾病,甚至死亡。如船舶遇难,在冰水中浸泡的人,当体温下降到  $25^\circ\text{C}$  左右时,尽管此温度对组织并无损伤,但因脑干或心脏的电活动受到严重影响,使呼吸与循环功能发生障碍而致死亡。

体核温度高于体表温度,且比较稳定,各部位之间的差异不大,但由于各器官组织的代谢水平不同,其温度略有差异。可以认为在任何内脏和组织中的温度有赖于:①这一部位的代谢活动;②通过这一部位的血流量和血液温度;③周围组织温度梯度的坡度。

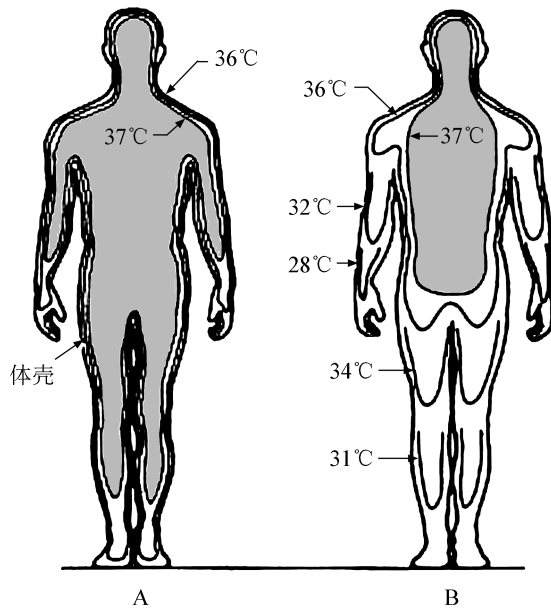


图 1-2 不同环境温度下人体体温分布

A. 环境温度 35°C; B. 环境温度 20°C; 图中阴影部位表示体核温度

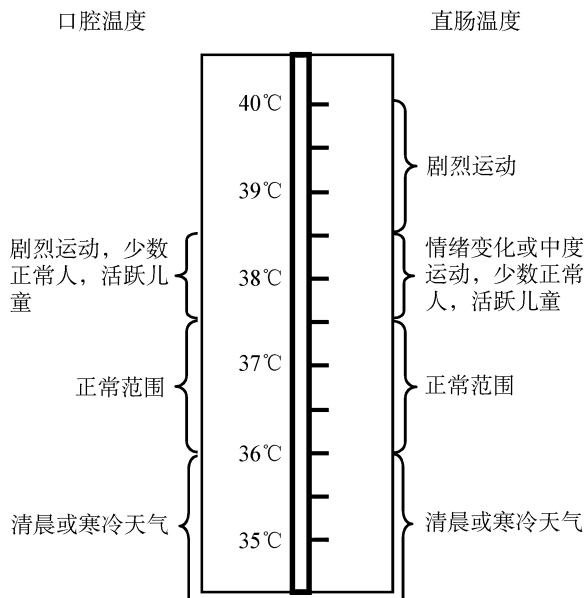


图 1-3 人的体温范围

(引自: Guyton AC, et al. Textbook of Medical Physiology. 12 th ed. Philadelphia: Elsevier Sanders, 2011.)

循环血液是体内传递热量的重要途径。由于血液不断循环,使身体各个器官的温度趋于一致。因此,血液的温度可以代表内脏器官的平均温度。但是,血管内血液的温度有相当大的变化。当环境温度处于中性时(即舒适的室温),发现肱动脉的温度为 $36\sim 37^{\circ}\text{C}$ ,而桡动脉的温度为 $35.5\sim 36.5^{\circ}\text{C}$ 。当暴露于冷环境中时,肱动脉和桡动脉内的温度分别降到 $31.1^{\circ}\text{C}$ 和 $21.5^{\circ}\text{C}$ ,然而这时受试者并没有感到不舒适的寒冷或直肠温度明显的降低,这表明在冷环境中血液离开左心室(接近 $37^{\circ}\text{C}$ )运行到手的过程中温度下降了 $15^{\circ}\text{C}$ 左右。这种流至远端冷部位的动脉血温度的降低,乃是由于热量从动脉传递到邻近更冷的静脉血流中所造成的。肢体远端部位的大量血液是经平行静脉回流的,这种平行静脉紧密贴着动脉,十分适合于动脉与静脉血流之间热量的交换。这种交换的一个明显特点是包括使较冷的静脉血变暖,使热量并不丧失到环境中去,而是经过血流媒介回到身体核心部分。

在临床或实验中,常被记录的温度是直肠、口腔和腋窝的温度。直肠温度通常较口腔或封闭严密的腋下温度高,它可以代表机体深部的温度。但是,直肠内温度也有 $0.1\sim 0.9^{\circ}\text{C}$ 的波动,这种波动除了受它邻近的静脉和动脉中的血液温度和血流量的影响,也取决于温度计放置的部位。最低的直肠温度是在最靠近臀部 and 腿部静脉血流的直肠壁部位。如果腿部比较冷,那么位于盆腔壁动脉血流的温度同样是低的,因为已经证明,当身体某一部分冷却时,动脉血流靠近冷却部位回流的静脉血时,动脉血的温度也降低了。

## 四、机体表层温度

### (一)体表温度的特点

人体各部位皮下脂肪厚度、肌肉厚度、血管密度和几何形状不同,其温度分布亦呈现较大差异。在环境温度为 $23^{\circ}\text{C}$ 时,足皮肤温度为 $27^{\circ}\text{C}$ ,手皮肤温度为 $30^{\circ}\text{C}$ ,躯干为 $32^{\circ}\text{C}$ ,额部为 $33\sim 34^{\circ}\text{C}$ 。四肢皮肤温度最低,越近躯干、头部皮肤温度越高。通常手足皮肤温度可能较头部和躯干低 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ ,而胸、背部皮肤温度可相差 $10^{\circ}\text{C}$ 以上,却无不适感觉。任何环境下,体表的皮肤温度总是低于体核温度。

图 1-2 所示室温 $35^{\circ}\text{C}$ (左侧)和 $20^{\circ}\text{C}$ (右侧)人体温度的分布等温线(iso-therm)。等温线是指相等温度的部位。在室温 $35^{\circ}\text{C}$ 时,体核温度(暗影部位)扩延到腿和手臂;在室温 $20^{\circ}\text{C}$ 时,体核温度分布区域缩小,主要集中在头部、胸部和腹部,而体壳温度梯度扩延到整个腿和手臂(图 1-2)。这就说明,身体表层温度可随环境温度和衣着情况常有较大变化。体壳温度受环境温度的影响,不像深部的体核温度那样因经常受到调节而保持稳定。体温调节反应也影响体壳温度,特别是皮肤表层的温度。在温热环境中,体壳较薄,大约 $1\text{cm}$ ;但在严寒环境中机体为保存体热,体壳厚度可深入皮下达数厘米,此时体内温度调节确保头和躯干内的重要器官。由此可见,皮肤血流在热交换中起重要作用。



皮肤的微循环对体温的调节有重要作用。当体内外温度升高时,皮肤微循环血流增加,流速加快,血管扩张,出汗增加,以散发热量;反之,体内热产生降低,外界温度较低时,皮肤血流量降低,流速变慢,血管收缩,防止从皮肤散失热量。许多人认为饮酒可以祛寒,这也是不完全正确的。饮酒后可以使皮肤微循环血管扩张、血流量增加,可以暂时起到温暖皮肤祛寒的作用,但同时也更加快了体内热量从皮肤散失。一旦乙醇作用消失,便更觉寒冷,而且过量饮酒大醉时,皮肤微循环血管调节功能麻痹,对寒冷的抵抗力大大减弱,很容易发生冻疮、冻伤,所以在冬季不提倡饮酒取暖,更要禁止喝得酩酊大醉时外出。

## (二)正常舒适的皮肤温度范围

正常人体舒适的皮肤温度在  $32\sim 34^{\circ}\text{C}$  的狭小范围。在一年中不同季节分别测定安静状态下人体贴身衣服下空气层的皮肤温度,并比较其与环境温度之间的关系(表 1-2)。从表 1-2 可见,环境温度变化对胸部、腋下、肚脐和腰部(命门)等部位的皮肤温度无明显影响,一年之中变化不超过  $2.2^{\circ}\text{C}$ ;而背部、肩部、上肢、下肢等部位则与环境温度变化有关,一年之中的变化愈靠近末梢愈大,在前腕及大腿部位为  $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ ,在手腕、小腿部位可达  $9\sim 12^{\circ}\text{C}$ 。

表 1-2 环境温度变化对躯体不同部位温度的影响

测量部位	环境温度( $\bar{x} \pm s, ^{\circ}\text{C}$ )				
	$31 \pm 2$	$25 \pm 2$	$20 \pm 2$	$13 \pm 2$	$0 \pm 2$
胸	34.9	33.9	33.2	33.0	33.2
腋下	35.5	35.7	35.7	36.1	36.5
背	34.2	32.8	32.4	31.8	31.8
肚脐	35.2	33.9	33.3	33.5	33.1
腰	34.4	33.2	32.3	32.2	32.6
肩头	34.0	32.1	31.6	31.0	31.6
前腕正面	34.1	32.6	30.6	28.6	26.3
前腕反面	31.4	32.1	29.9	27.8	25.0
大腿正面	33.9	31.4	29.5	27.3	26.7
大腿反面	34.1	31.7	29.0	29.2	29.7
小腿正面	33.4	28.7	25.9	21.6	22.8
小腿反面	33.2	29.1	26.8	25.3	23.7

根据表 1-2 所示的温度,虽然难以判断各个季节身体各部位的舒适温度的范围,但由于人们能穿着与各个季节相适应的衣服,就可以判断此温度。有报道认为,根据皮肤温度的差值来决定舒适温度,把身体各部位的皮肤温度与平均值比较,不超过  $1.5\sim 3^{\circ}\text{C}$ ,作为舒适温度。反之,如果平均皮温升至  $34.5^{\circ}\text{C}$  以上,或者与平均皮肤温度之差降低到  $4.5^{\circ}\text{C}$  以下时,感觉不舒适。

虽然身体表面的皮肤温度与体内温度相比具有很大的变动性,但平均皮肤温度和皮肤温度的分布对健康是重要的。例如手热和脚冷,它们的效应并不能结合起来产生舒适的感觉,又如面部红热往往是疾病的症状。

### (三)环境温度变化对皮肤温度的影响

人类的皮肤对它自身的温度表现特别敏感,当平均皮肤温度发生  $0.01^{\circ}\text{C}$  的变化就能感觉到。不过如果这种变化不大,温度感觉就会很快适应。如果臂部皮肤温度很高,超过  $37^{\circ}\text{C}$  时则温热感觉并不由于适应而消除。温度感觉具有空间总和的特性,因此小面积的皮肤( $1\text{cm}^2$ )比全身体表面的敏感性要低 1 000 倍。

由于皮肤温度对冷刺激的反应最灵敏,人体冷暴露时,首先是手足末梢部位皮肤降温,而后逐渐波及四肢和躯干。皮肤温度随环境温度和衣着的不同可有相当大的变化,环境温度越低、冷暴露时间越长,皮肤温度下降幅度越大。皮肤温度降低使人体体表与环境间的温差减小,经体表散失的热量大为减少,有利于保持体内温度相对稳定,具有重要的体温调节作用。但是,手足皮温降至  $23\sim 20^{\circ}\text{C}$  时会感觉寒冷,降至  $16\sim 10^{\circ}\text{C}$  时感觉疼痛,手皮温低于  $12^{\circ}\text{C}$  时手指触觉敏感性及操作的灵活性均明显降低。任何部位皮肤温度降至  $2^{\circ}\text{C}$  均为寒冷耐受的临界值,此时剧痛难忍,日常寒冷环境中常见指、趾皮温达此临界温度。皮肤血管收缩、血流量减少是皮肤温度下降的主要原因。若以常温下皮肤血流量为 100%,在环境温度  $18^{\circ}\text{C}$  (暴露 2h) 时皮肤血流量平均减少 16%,环境温度  $15^{\circ}\text{C}$ 、 $12^{\circ}\text{C}$ 、 $10^{\circ}\text{C}$  和  $7^{\circ}\text{C}$  时血流量分别平均减少 58%、64%、65% 和 66%。持续的皮肤温度下降将不可避免地导致皮下组织和肌肉温度降低,最终必然引起体温降低。

## 五、体温的测量

由于各个部位的温度都不相同,因此不可能用一个单一的数值来表示体温。但血液不停地循环,能使体内各组织器官的温度趋于一致。因此机体深部的血液温度,特别是右心血液的温度可代表机体深部的平均温度。但为了实用的目的,必须将从一个固定部位测量的温度作为体核温度的代表。临床上通常采用测量直肠温度、口腔温度、腋窝温度来反映体温。

### (一)临床常用测温部位

1. 口腔温度(口温) 口腔温度测量方便,是常用的测量部位。但是,口腔内也存在温度梯度,故测量时口腔温度计水银端放于舌下热窝,舌下热窝位于舌系带两侧,是口腔中温度最高的部位,测量时间为 5min,口腔温度易受吸入空气温度的影响。测量口腔温度对体温计的消毒有严格要求,婴儿哭闹时不能测量且不安全,新生儿不能按要求闭口用鼻呼吸,限制了临床使用。

2. 腋窝温度(腋温) 在上臂紧贴胸廓使腋窝密闭的情况下,局部吸收热量增加,体核温度范围逐渐向腋窝移动,在这种情况下,可以把腋窝温度视作体核温度。

如果上臂不紧贴胸廓,测得的只是腋窝的皮肤温度。还应注意,腋窝部位的温度上升达到接近体核温度之前,必须吸收相当多的热量,故需要一定的时间。所以,腋窝测温应保持较长时间(10min左右),才能较好地反映正确体温。如果环境温度低或血管收缩(如处于发热上升期),则测量腋窝温度所需的时间更长。

3. 肛温 直肠封闭良好,热容量大,不易受外界环境因素的影响,应优先选择测量直肠温度。但是,直肠内温度的波动也可达 $1^{\circ}\text{C}$ 。直肠静脉丛和肛门区皮下静脉丛之间的吻合能影响直肠的温度。温度计插入6cm以上测得的温度比较接近体核的温度。

由于直肠温度接近机体的中心温度,其结果能准确反映体温的实际变化,为了准确地了解新生儿的体核温度,常采用直肠测量法。测量直肠温度时,取屈膝仰卧位,充分暴露臀部,注意臀部不得离开床面,用鞣酸软膏润滑消毒后的备用肛表汞端,轻轻插入肛门2~3cm,3min后取出,用纱布擦净后检测读数并记录。但对新生儿来说,直肠较短,肛表插入的深度不易掌握,加上新生儿的直肠壁较薄,易造成直肠穿孔;同时肛表水银端所涂的润滑剂势必形成一层保护膜,降低储汞槽的受热敏感性,影响测量结果的准确性;另外测量结果也受排便次数和是否排便的影响,并可引起肠道致病菌或耐药菌群的传播。

4. 颌下温度 通常多用于新生儿和婴儿。新生儿和婴儿期棕色脂肪组织(BAT)在产热中发挥着重要的作用。人类在婴儿期BAT分布在肩部和颈部周围,胸骨背面和沿脊柱棘突深部血管的两侧,形成中心保暖系统。根据解剖特点,可用颌下温度代替腋下温度监测新生儿体温。测量方法通常采用取平卧头侧位或侧卧位,将体温计水银端放于颌下与颈部皮肤之间夹紧测量10min;或者将新生儿侧卧于婴儿床上,头部垫一小枕头,使新生儿下颌紧贴胸部,将体温计水银端置于颌下颈部皮肤皱褶处10min。测温前30min停止喂奶、喂水,注意保持患儿安静。选择颌下测量体温的优点是测量部位暴露于体表,不论任何季节都方便测量。

## (二) 其他测温部位

1. 食管温度 在研究工作中,可用弯曲的测量探头测量食管中段的温度。食管温度比直肠温度约低 $0.3^{\circ}\text{C}$ 。食管中段温度与右心温度基本相同,其温度变化过程也与体温调节反应的时间过程基本一致。

2. 鼓膜温度 鼓膜温度(tympanic temperature)的变化与下丘脑温度变化一致,实验中可选用鼓膜温度作为脑组织温度的指标。由于鼓膜和其周围有丰富的大脑动脉血的供应,提示鼓膜是测量体核温度最精确的部位。

3. 皮肤温度 由于把温度计的温敏传感器置于机体不同部位的皮肤,测得的皮温差异很大,故实验中常以某些固定的点(额、胸、上臂、大腿、小腿、腹和背部)测得的温度求其平均值,代表皮温。

## (三) 遥控测温技术在体温研究中的应用

国内研究各类药物和毒性物质对体温调节影响的常用测温方法主要是电子温

度仪测量结肠或直肠温度。这种方法在进行一次测量时是非常精确的,但人们想要评估某些药物和化学毒剂对体温长时间的影响将会引起许多问题。因为测量结肠温度的重复操作和束缚实验动物引起的应激性体温升高反应,可在测量体温后持续数小时。这种人工测温方法引起的体温过高反应不仅使药物和毒剂对体温的实际影响变得不明显,而且也影响了体温反应的敏感性,即必须给较大剂量的药物和毒剂才能引起可测量到的体温反应。

无线遥测技术的出现对体温调节和其他生理学学科的研究产生了革命性的影响(图 1-4)。腹腔温度能较精确地反映体核温度,研究者使用无线遥测技术,可以在实验前 1 周将较小的无线遥测温度探头植入动物的腹腔。这样可以连续测量动物在清醒和“自由状态下”,实验前一天和给药后数天的体温变化。无线遥测技术不仅能测量到给药前的体温和连续观察给药后动物昼夜体温的细微变化,而且也能较长时间准确地连续观察给药实验前后动物昼夜体温的细微变化。

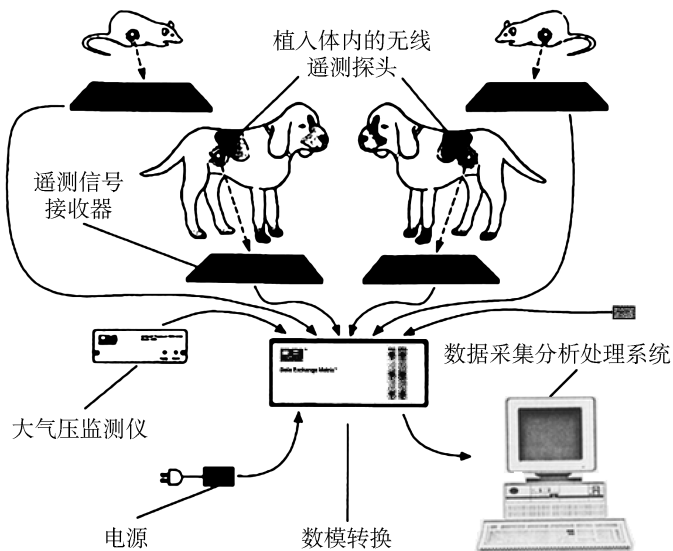


图 1-4 无线遥测系统实验装置

## 六、体温的正常值及其生理波动

### (一) 正常体温

Wunderlich 于 1868 年分析、综合了约 25 000 人、100 万个腋窝温度数据,得出 37.0℃ 为成年人正常体温均值的概念,并为大众所接受。1974 年北京朝阳医院测量了 1 030 名正常体温,腋窝温度为  $(36.8 \pm 0.4)^\circ\text{C}$ ,口腔温度为  $(37.2 \pm 0.3)^\circ\text{C}$ ,直肠温度为  $(37.5 \pm 0.3)^\circ\text{C}$ ,证明国人的测量值与之接近。在正常人群中腋下、口

腔或直肠温度总是存在个体差异,在静息时以及在不影响健康的许多生活情况下,人的体温在一定范围波动。一般认为,直肠温度的正常值为  $36.9 \sim 37.9^{\circ}\text{C}$ ,口腔(舌下)温度的平均值比直肠温度低  $0.2 \sim 0.3^{\circ}\text{C}$ ,腋窝温度比口腔温度低  $0.3 \sim 0.4^{\circ}\text{C}$ 。

人类的体温必须维持在  $35 \sim 41^{\circ}\text{C}$  这一狭小的范围内。因为只有维持内环境温度相对稳定,才能维持细胞的正常结构和功能。人的新陈代谢是一系列的酶促反应,这些酶都有其适宜的温度范围,最佳温度在  $37^{\circ}\text{C}$  左右。一般情况下,体温低于  $34^{\circ}\text{C}$  可引起意识的丧失,低于  $25^{\circ}\text{C}$  可能发生心室纤维性颤动或心跳停止,而体温高于  $42^{\circ}\text{C}$  时可引起细胞损害,高于  $45^{\circ}\text{C}$  将有生命危险。

从图 1-3 中可见,高于正常范围的温度比低于正常范围的温度具有更大的潜在危险性,并且人类能生存的温度只是比他的死亡点低几度。在强体力劳动或工作期间,直肠温度可以增加至  $41^{\circ}\text{C}$ 。应该注意即使工作是在冷环境中进行,体温也会发生这种变化,而且只要体温调节系统能够有效地调节,这种变化就仅仅依赖于活动的程度。

## (二) 平均体温

计算平均体温和身体的储热量时应该把体壳温度和体核温度结合起来考虑。所谓身体的平均温度是在一定条件下,于身体不同部位多处测量温度的平均值。这样计算出的平均温度在生理学上是相对的,没有什么重要意义。

1. 平均皮肤温度 由于皮肤温度的部位差异很大,所以需要测算平均皮肤温度(mean skin temperature, MST),即尽可能多测一些部位的皮肤温度,然后求平均值。为简便计算,可将体表划分为头、上臂、手、胸、背、大腿、小腿、足等 8 个区。在每区选一个测温点作为该区的代表点,测量该点的皮肤温度,将各区测温点的实测值分别乘以该区占总体表面积的比例,然后将这些数值相加,便得到平均皮肤温度( $T_{\text{mst}}$ )。根据选定测温点的数目,有 10 点法、8 点法、6 点法、4 点法、3 点法等。兹举 4 点法的计算式(此法的计算值与 8 点法几乎相等)如下:

$$T_{\text{mst}} = 0.2(T_{\text{小腿}} + T_{\text{大腿}}) + 0.3(T_{\text{胸}} + T_{\text{上臂}}) \quad (\text{式 1-8})$$

式中 0.2 和 0.3 分别为各区占总体表面积的比例系数, $T_{\text{小腿}}$  为小腿皮肤温度,余类推。

2. 平均体温 实践证明,以身体某个部位的温度来代表包括表层温度在内的整体温度动态是不够确切的,而要测出身体各个部位的温度,然后加权去了解机体温度的动态,也是很难行得通的。因此,提出了测算平均体温(mean body temperature, MBT)的方法,其测算公式如下:

$$T_{\text{mst}} = \alpha \cdot T_{\text{core}} + (1 - \alpha) \cdot T_{\text{mst}} \quad (\text{式 1-9})$$

式中的  $T_{\text{core}}$  为深部温度,通常用直肠温度代表, $\alpha$  为机体深部组织在机体全部组织中所占的比例, $(1 - \alpha)$  则为身体表层组织所占的比例。

随着环境温度的变化,身体深部与表层两者相对的比例可出现较大的变动。在冷环境中,深部温度分布区域缩小,主要集中在头部和胸腹内脏,而且表层与深部之间存在明显的温度梯度;在炎热环境中,深部温度可扩展到四肢(图 1-2)。因此,直肠温度易受下肢温度影响,当下肢温度较低时,由于下肢流回到髂静脉的血液温度较低,可使直肠温度降低。

### (三) 体温的生理波动

虽然体温是保持相对恒定的,但有许多因素可引起体温的生理性波动。以下是影响体温的主要因素。

1. 昼夜变化 正常人的体温呈现明显的周期性昼夜变化。清晨 2—5 时最低,午后 2—5 时最高,波动幅度一般不超过 1℃(图 1-5)。体温的这种周期性昼夜变化称为昼夜节律(circadian rhythm)。新生儿体温无昼夜节律,在体温调节功能完善时才出现昼夜节律。在消除所有外周传入信息后,仍保持体温的昼夜节律,只是时间不再恰好是 24h(详见:第三节)。

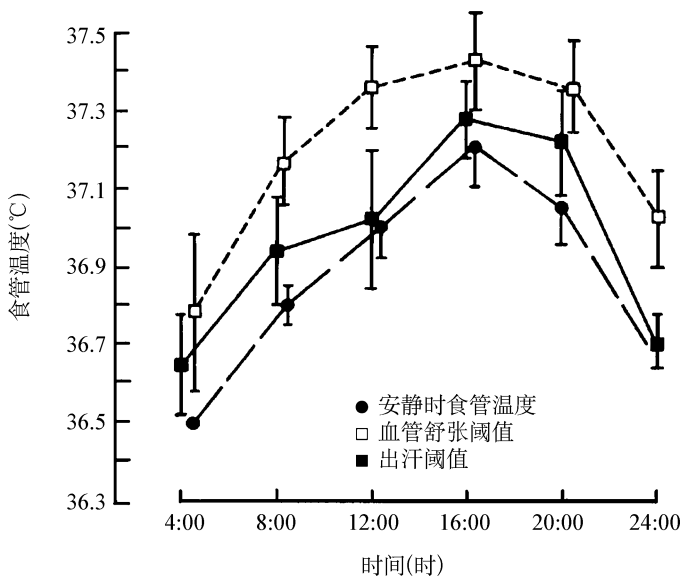


图 1-5 正常人体温昼夜变化与出汗和血管舒张的阈值变化

2. 性别 成年女性代谢率比同年龄同体表面积男性低 5%~10%。由于妇女出汗较少,体脂肪较多,散热能力比男子差,耐热能力也比男子差,所以成年女性的体温平均比男性高 0.3℃。同样,动物也是雌性的体温略高于雄性。

妇女体温在月经周期中也有规律性的波动。女子月经周期中基础体温曲线见图 1-6。所谓基础体温,是指人体在较长时间的睡眠后醒来,尚未进行任何活动之

前所测量到的体温。具有正常卵巢功能的育龄妇女基础体温呈特征性变化。在月经期及其后1周体温偏低,排卵前达到最低,排卵后上升 $0.3\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ ,维持于整个黄体期。排卵后的体温升高,一般认为是黄体分泌孕酮的生热效应,但也有人认为是下丘脑体温调节中枢的调定点(set point)发生重调定(resetting)的结果。将每天测量的基础体温连接成线,如果连线呈双相则提示有排卵;若无排卵则基础体温连线无上升改变,而呈单相曲线。

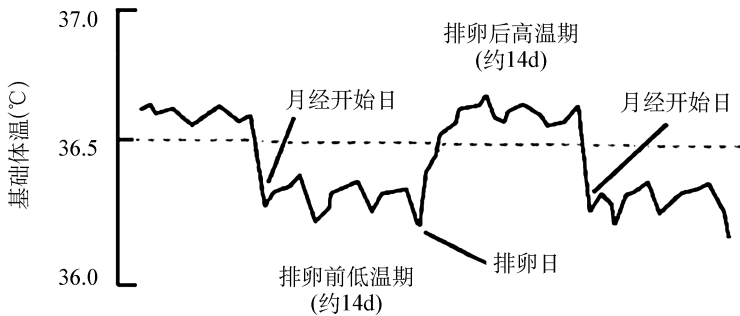


图 1-6 女子月经周期中基础体温曲线

基础体温的测量,要求睡足6h以上,清晨醒后,尚未进行任何活动之前,由自己测得的体温,起床后将所测体温记录于基础体温单上,逐日进行,画成曲线。每天测量的时间最好能固定。如遇到经期、性生活、失眠、感冒等,应在基础体温单上有所记录,以便医师参考,一般需连测3个月。

常规测量基础体温,可以了解卵巢功能,观察有无排卵以及黄体功能。在临床上还可用于协助诊断月经失调,如无排卵性功能失调性子宫出血者,基础体温为单相型。此外,根据基础体温上升持续的时间、体温的高低以及下降的方式,又可以反映黄体的功能状态。因此,基础体温可用于诊断月经失调及观察药物疗效。

妇女在月经周期中体温规律性波动的意义:①双相型体温可作为排卵的重要指标,排卵时间在双相体温转变前 $2\sim 3\text{d}$ 内,单相体温可肯定无排卵及黄体形成;②双相型体温高温阶段(黄体期)如超过16d以上,即有受孕可能,对于治疗中的不孕症患者是喜兆,对于有习惯性流产史者,此时应采取保护措施;③一般认为体温曲线高温期不应少于12d,上升幅度不宜低于 $0.3\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ ,否则即为黄体功能不足。

3. 年龄 正常人体温的变化与年龄有关,年轻人体温偏高,老年人体温偏低。随着年龄的增长,其体温有逐渐降低的倾向,大约每增加一个年龄段(10年),平均降低 $0.05^{\circ}\text{C}$ 。出现这些情况的部分原因可能与新陈代谢变化有关。正常人一日之间最高体温与最低体温的相差幅度,依年龄而渐增,1个月龄时约 $0.25^{\circ}\text{C}$ ,6个

月龄时约  $0.5^{\circ}\text{C}$ , 3 岁以后约  $1^{\circ}\text{C}$ 。

儿童由于新陈代谢率较高, 体温可较成年人略高。小儿时期中枢神经系统调节功能发育不完善, 体表面积相对大, 皮肤汗腺发育不全, 产热和散热容易发生不平衡, 所以体温容易波动。在某些因素的影响下, 例如运动、进食、哭闹等原因, 常常会使体温暂时升高; 突然进入高温环境, 室温过高或衣被过厚, 也会使体温暂时升高。相反, 运动减少、睡眠过程中、饥饿、体弱儿等, 体温也会降低。因小儿年龄越小, 中枢神经系统调节功能越差, 体表面积相对越大, 皮肤汗腺发育越不全, 所以体温调节功能亦越差; 尤其新生儿皮下脂肪薄、肌肉不发达、运动力弱, 故体温更易波动。

老年人的体温低于青年人主要是由于: ①体温调节功能下降, 对外界温度变化代偿的能力较差; ②代谢率降低, 致使机体代谢产热量减少; ③皮肤老化, 对外界气温和冷热变化的感知能力减退, 皮下血管硬化使收缩力变差, 热量散发多而导致体温较年轻人低。

一般认为, 老年人适应低温和高温环境的能力也降低, 因而维持体温能力较差些。Collins 等对两组具有相似体脂肪百分比的男性作了测试: 在环境温度  $6^{\circ}\text{C}$ , 空气流速为 0 时, 青年组(18—24 岁)和老年组(63—70 岁)静坐 2h 后, 老年组平均直肠温度下降  $0.4^{\circ}\text{C}$ , 而青年组仅下降  $0.1^{\circ}\text{C}$ 。

但在冷环境中, 老年妇女可以同年轻妇女一样较好地维持直肠温度。实验研究证明, 老年妇女与年轻受试者及老年男性受试者相比具有更高的代谢率。研究者认为, 老年妇女血中含有较多可利用的能量底物, 因为她们与年轻组相比, 血中有更高的血糖和游离脂肪酸含量, 显然冷应激的性别差异与女性含有较多体脂肪有关。

由于老年人的体温低于青年人, 因而 Thomas 等人提出, 通常把口腔温度  $> 37.5^{\circ}\text{C}$  认为是发热, 而评价老年人是否发热, 这个标准有些过高。他认为老年人发热的定义应该是: 口腔温度持续  $\geq 37.2^{\circ}\text{C}$  就应视为发热。另外, 只要温度比自己的基础体温升高  $\geq 1.1^{\circ}\text{C}$ , 也表明有发热。比如一名老年人平时早晨醒来时的基础口腔温度是  $35.6^{\circ}\text{C}$ , 那么, 当体温上升到  $36.9^{\circ}\text{C}$  时就应该视为发热。老年人患感染发热性疾病时体温反应迟缓, 甚至无发热反应。有试验表明, 老年人的内源性致热原生成减少以及对内源性致热原反应降低, 是感染后发热迟缓的原因之一。由此表明, 对待老年人的发热, 不能像对待年轻人的发热那样, 搬用通常的发热标准, 以免延误诊治时机。

4. 运动 人体运动时, 总的产热量最多可比安静时高出 10~15 倍, 骨骼肌成为主要的产热器官。进行最激烈的运动时, 骨骼肌的产热量要占总产热量的 90% 以上。由于运动时肌肉的物质代谢急剧增强, 产热量大增, 虽然通过神经系统的调节加强了散热过程, 但仍然落后于产热过程, 因此体温升高(图 1-7)。运动时体温



升高的程度,同运动强度、持续时间和运动的环境气象条件(水温、气温、风速和空气湿度)以及运动员的训练程度等有关。一般情况下,中距离赛跑后腋下温度可升到 $37.5^{\circ}\text{C}$ ,长跑后上升到 $38.5^{\circ}\text{C}$ ,激烈运动时直肠温度甚至超过 $41^{\circ}\text{C}$ ,肌肉温度可达 $42\sim 43^{\circ}\text{C}$ 。运动中体温升高的同时,由于中枢神经系统的调节,散热过程也加强了。这时血流加快,皮肤血管舒张,分配至皮肤的血量增加,并大量泌汗,直至运动停止后仍继续一定时间。要特别注意在某些特殊气候条件下(气温特高、无风、湿度大)进行长时间的激烈运动,往往会因为体热散发受到阻碍,致使体内温度过高,造成中暑现象。

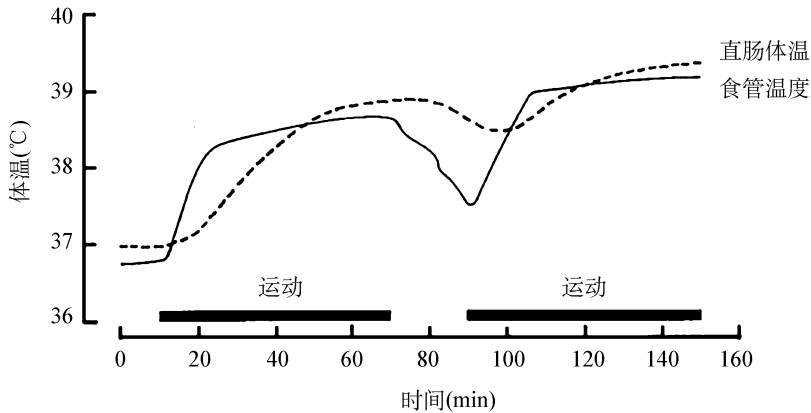


图 1-7 运动对食管和直肠温度的影响

滑雪、滑冰或游泳时,气温或水温可能比皮肤温度低得多,但由于人体运动时产热过程明显加强,运动后体温仍然会升高。例如,在气温为 $5\sim 7^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行10km滑雪,腋下温度可由 $36.3^{\circ}\text{C}$ 上升到 $36.89^{\circ}\text{C}$ ,直肠温度可由 $37.02^{\circ}\text{C}$ 上升到 $38.36^{\circ}\text{C}$ 。经过训练的运动员在运动前就可发生条件反射性的体温上升,如游泳运动员入水前口腔温度由 $36.9^{\circ}\text{C}$ 可上升到 $37.16^{\circ}\text{C}$ 。经常在低温或高温环境条件下运动,能改善人的体温调节能力。在低温条件下,运动员可以很快加强产热过程,减少散热,而在炎热环境条件下,运动员则能很快加强散热过程。经常在户外进行运动,或坚持冷水浴、冬泳的人不易得伤风感冒,这是由于体温与环境温度之间常存在着较大的差距,人体时而遇到高温,时而遇到低温,使得体温调节功能得到锻炼,提高了对高温和低温环境的适应能力,以后即使遇到体内外温度明显改变,仍然能表现出良好的运动能力。

5. 环境温度和季节的影响 虽然正常动物在体温调节中枢的调控下,能在一定的环境温度范围内维持体核温度处于恒定状态,但是如果环境温度过低或者过高都会引起体温降低或升高(图 1-8)。

一般夏季的体温较冬季体温高。在我国,对纬度相差 17°的两地区进行的调查表明,南方小儿的腋温四季都比北方小儿高,春夏季更明显,最大均值差达 0.5℃。

在冬季老年人容易发生低温反应。引起低温的原因:①老年人对寒冷的反应不明显,一般人感到冷了发生战栗,皮肤会紧缩,以减少体内热量的散失,而老人因为反应不明显,甚至没有反应,体内的热量就不断地散失,体温也就越来越低;②某些药物的作用,如吩噻嗪类药物,氯丙嗪、地西洋、卡比多巴等,这些药物可抑制下丘脑

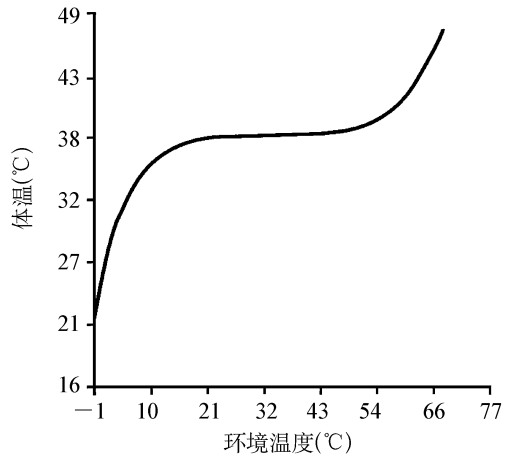


图 1-8 环境温度变化对体核温度恒定的影响

(引自: Guyton, et al. Textbook of Medical Physiology. 12th ed. Philadelphia: Elsevier Saunders, 2011.)

体温调节中枢,促进周围血管扩张,抑制血管收缩,干扰糖类的代谢,还可通

过降低患者对环境的反应,干扰老年人对寒冷的反应,致使体温降低。由于低体温的测量比较困难,又不易察觉,因此在寒冷的冬天,老年人要少用或不用这些药物,同时老年人要特别注意保暖。

通常在热中性温度区(thermal neutral temperature zone),人和动物消耗的氧气最少,新陈代谢率最低,生热量也最少。在此区内,机体不必要产生更多的热量或依赖冷却机制以保持舒适,体温也比较恒定,所以又叫作热舒适区。动物的种系不同,热中性区的温度范围也不同(表 1-3)。热中性区温度的上、下限称为上临界温度(upper critical temperature, UCT)和下临界温度(lower critical temperature, LCT),是机体产热量明显升高的临界点。在实验动物中,大多数哺乳动物在热中性温度区的正常体温为 36~39℃;在白天,人类、大鼠、仓鼠和小鼠的正常体温基本相似,其他哺乳动物,如猫、狗、兔、绵羊以及牛的体温高于人类和啮齿类的体温 2~3℃;但通常鸟类的正常体核温度高于哺乳动物的体温(表 1-3)。

人体最适的环境温度为 27~29℃,此时机体的代谢最稳定。上临界温度和下临界温度分别为 24℃和 31℃。环境温度降低时机体散热增多,并通过中枢神经系统的调节作用增加产热以维持体热含量及体温的恒定。产热增加包括基础代谢率增高和安静状态下代谢率增高(图 1-9)。但一般所讲的临界温度是指具有重要生理学意义的下临界温度。机体对环境温度适应后下临界温度会发生变化,即使生存环境相同,不同个体的下临界温度也不尽相同。人体对冷环境适应后的下临界温度一般为 10℃。极地动物的下临界温度很低,都具有隔热型的耐寒能力。人类

表 1-3 正常哺乳动物与鸟类白天在热中性温度区的 LCT 和 UCT 之间直肠温度或阴道温度

种类	温度(°C)	热中性温度区	
		LCT(°C)	UCT(°C)
人	37	24	31
大鼠	36.6~37.5	28	34
仓鼠	36.0~37.8	28	34
小鼠	36.0~37.6	26	34
豚鼠	38.1~38.6	30	31
兔	39	13	20
狗	38~39	18	25
猫	39	24	27
牛	38~39	5	16
山羊	38~39	20	26
绵羊	39	13	31
猪	37~38	0	20
小鸡	41~42	19	29
鸽子	43	20	30

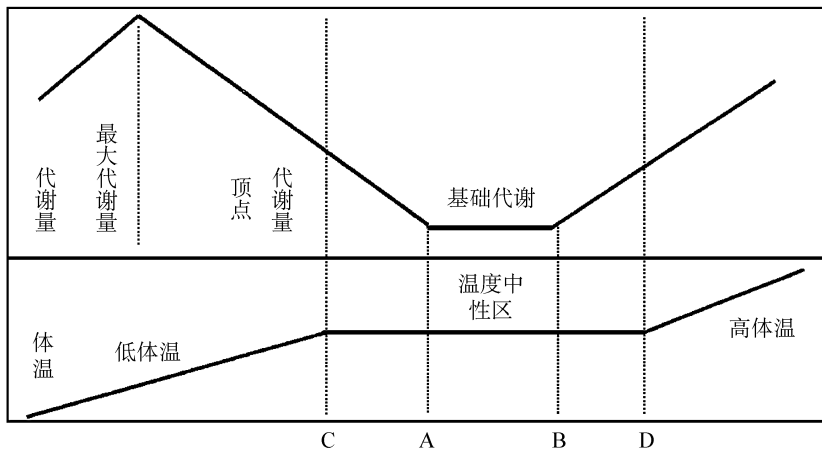


图 1-9 环境温度对代谢量和体温的影响

A. 为下临界温度;B. 为上临界温度;C. 为适应温度下限;D. 为适应温度上限  
(引自:吕永达,等. 特殊环境生理学. 北京:军事医学科学出版社,2003.)

作为热带动物在进化过程中隔热组织退化,在寒冷条件下主要通过增加产热保持体温,具有一定的产热型耐寒能力。

6. 人体温与地域有关 人类应付寒冬天气的能力,可能取决于他们的祖先住在哪里。研究人员发现,来自于热带、温带和北极地区的人在产生能量、维持体温的效率方面存在着差异。这种效率的关键在于人们的“细胞发电机”——线粒体中的遗传密码。然而,线粒体恒温器是否会发生自然选择尚无定论。

长期以来,科学家们一直用线粒体 DNA(mtDNA)来追踪人类的迁移模式。由于 mtDNA 只能从母亲传给子女,因此就留下了一条能够通过遗传学进行回溯的演化途径。尽管人类迁移的总模式相当清楚,但是,科学家仍在努力解释在 mtDNA 遗传中发生的一些地区性变异。

美国加州大学欧文分校的人类遗传学家 Douglas Wallace 猜想,这些变异可能代表了对地区性环境的适应。他的研究小组分析了 104 人的 mtDNA——这些人代表了热带(非洲撒哈拉沙漠以南地区)、温带(欧洲)及北极(西伯利亚地区和北美洲)的 18 个主要 mtDNA 家系。他们集中研究了 13 种对热量及能量产生十分关键的 mtDNA 蛋白质,发现每个人群中的地区变异模式都不同。

北极人群的 ATP6 基因的变异最多。Wallace 认为,这些变化会降低身体的代谢效率,因此能够产生更多热量,以保护身体免受严寒天气的伤害。相反,热带人群另一个 COI 基因的变异最多。基于该基因在新陈代谢中扮演的角色,Wallace 认为这些变异将提高代谢效率,减少身体产生的热量。温带人群的变异模式和他们都不同,其新陈代谢应当位于其他两种人群之间。统计分析表明,这些变异并非偶然发生的,这进一步支持了 Wallace 关于自然选择在起作用的观点。

但是美国斯坦福大学的人类遗传学家 Joanna Mountain 指出,尽管该研究“非常具有启发性,能够激发人们的思考”,但仍有许多工作要做。她说,首先尚无证据证明这些变异确实能够起到作用。劳伦斯市堪萨斯大学的人类遗传学家 Michael Crawford 补充说:“我们还需要证明这些变异提高了存活率和繁殖率。”此外,他还指出:“我们不能在这 104 个人的基础上就确定全人类的特征。”

7. 药物对体温的影响 体温除了受发热性疾病等因素的影响外,还须注意药物对它的影响。如解热镇痛药能使发热病人的体温趋向正常,但不能降低正常人的体温。此类药物的解热作用,主要是通过增加散热过程实现的,表现为皮肤血管扩张和出汗增多,因而增加热的散失,最后使升高的体温下降。解热镇痛药对产热过程没有什么作用。但有人通过动物实验,认为解热镇痛药物有解热作用,除了由于对下丘脑的体温调节中枢直接作用外,还可能由于抑制了白细胞释放内源性致热原,或阻断了致热物质进入脑组织,因而减少了致热物质对下丘脑体温调节中枢的病理性刺激,通过这种对体温调节中枢的间接作用方式,发挥其解热作用。临床上也常发现肾上腺皮质激素有迅速解热作用,其机制可能为抑制致热原的释放,并

且直接作用于下丘脑的体温调节中枢,使热度下降或防止体温升高。但因感染性发热是由致病微生物引起的,如大叶性肺炎、菌痢、肠伤寒、败血症等,因此当发热原因未明时不应随便滥用皮质激素类药物,以免掩盖症状,延误疾病的诊断。

### 第三节 体温昼夜节律

体温昼夜节律是一个比较复杂的过程,受到很多因素的影响。本节主要讨论体温昼夜节律的特点、种系差异、影响体温昼夜节律的因素以及体温昼夜节律形成机制。

#### 一、体温昼夜节律的特点与种系之间的差异

体温呈现昼夜周期性波动。人和昼行动物体温昼夜波动的特点是白天体温高于夜间(图 1-5);而大鼠和其他夜行动物的体温是夜间高于白天(图 1-10)。

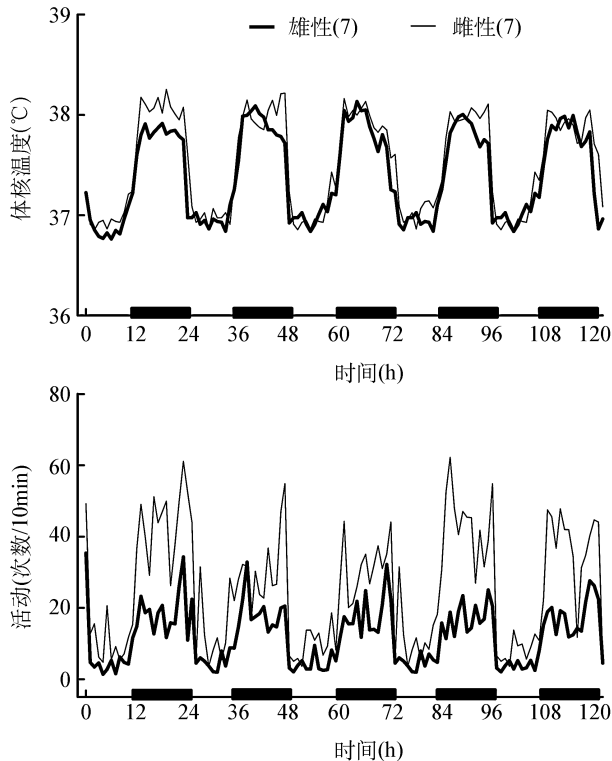


图 1-10 无线遥测连续 120h 测量雄性和雌性大鼠体核温度和活动的昼夜节律变化时间曲线

图中的曲线是 7 只大鼠实验记录数据的平均值,括号中的数字是样本数,横坐标上的粗线条表示在暗光期的时间(夜间)

(引自:杨永录,等.成都医学院学报,2011.)

体温昼夜节律已经在人体以及大鼠、家鼠、金仓鼠、地松鼠进行了大量的研究,也有许多学者在狗、猫、山羊、绵羊、马、牛以及鸟类中进行了研究。夜行动物大鼠和沙鼠夜间体温最高,昼行动物树鼩白天体温最高;不同动物体温昼夜震荡的波形也有差异,大鼠的波形类似方波,沙鼠类似矩形波,树鼩的波形呈现双峰;振幅也不同,大鼠昼夜体温变化小于 $2^{\circ}\text{C}$ ,树鼩却超过 $4^{\circ}\text{C}$ 。

## 二、影响体温昼夜节律的主要因素

### (一)光照

光照周期对体温昼夜节律有明显的影响。每日 24h 规律的明-暗周期(light-dark cycle, LD),如 12h 昼光期和 12h 暗光期能使不同动物的体温出现不同的昼夜变化,这种影响使昼行动物白天体温升高,夜间体温降低;而夜行动物则相反。此外,如果动物的明-暗周期受到干扰,如将正常明-暗周期的光照时间提前或者延后能够使动物的体温出现新的昼夜节律,并逐渐与新的明-暗周期同步。这就说明,明-暗周期的改变能够使体温昼夜节律的时相发生变化,即周期性光照的变化参与了体温昼夜节律的形成,在这种过程中涉及神经和体液因素,其中视交叉上核发挥了重要的作用。

### (二)环境温度

目前人们广泛使用温度梯度仪(thermal gradient apparatus)对体温昼夜节律进行观察,这种实验条件可以同时观测动物体温的昼夜节律和动物优选环境温度的变化。当环境温度持续低于或高于中性温度环境时,并没有发现对体温昼夜节律产生影响。这是因为体温昼夜节律时相的变化具有温度补偿性(temperature compensated)。但是,将某些动物置于 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 的环境中时,发现冷环境能增大体温节律振荡的幅度,幅度增大的原因主要是体温节律最低点降低所致。

### (三)进食

进食会引起体温升高,大部分动物每天进食的时间是固定的。那么每天规律性进食是否影响体温昼夜节律性的变化?实验证明,人和哺乳动物体温昼夜节律性变化与每天规律的进食有关,但动物在禁食情况下,其体温同样出现昼夜节律性变化。这说明规律的进食或者禁食不能改变体温昼夜节律,但并不意味着扰乱规律的进食时间不会对体温昼夜节律造成影响。适当的限制进食能引起许多动物代谢率和体温的降低,这种体温降低反应并不是在 24h 的任何时间都会出现,而是发生在动物的非活动期。所以,给动物限制进食后,虽然能引起低温反应,但体温的昼夜节律仍然存在。

### (四)体型

动物体重在体温恒定中具有一定的作用。大动物体温昼夜节律变化的幅度较小,这种现象可能是体型较大的大动物对昼夜节律性产热和散热的振荡幅度具有

一定缓冲作用,而且体型较大的动物有利于体热的保存,其平均体温也高于小动物。但不同品系狗的体温与体重呈负相关,为什么不同种系的动物之间体温与体重呈正相关,而同种系的个体之间呈负相关?目前仍然不清楚。

这里需要指出的是人体在不同环境温度下,人体温度等温线(isotherm,相等温度的部位)的分布部位会发生变化。在高温环境下,体核温度扩延到腿和臂部,使体壳层变薄(1cm左右),能促进机体散热;而在寒冷环境中机体为了保存体热,体壳厚度可深入皮下达数厘米,确保头和躯干内的重要器官的温度恒定。由此可见,动物体型较大有利于机体热量的保存和维持体温的恒定。

### (五)活动度

在不同种系的动物实验中,许多研究者使用无线遥测技术连续同步观测体温和活动后发现,动物活动的变化与体温昼夜节律的变化具有一定的相似性。昼行动物白天活动增加同时体温也升高,而夜间活动降低体温也降低,夜行动物刚好相反。人类以及啮齿类动物,睡醒之前的体温增加缓慢,往往需要几个小时,一旦醒来体温迅速上升,这种现象啮齿类比人类更为明显。由于活动度的昼夜节律与体温昼夜节律非常相似,以至于体温升高好像是活动度增加所致。

让人持续卧床休息,在不活动的状态下测量体温时发现,体温昼夜节律的振幅降低,但体温仍然表现出稳定的昼夜节律性。虽然夜行动物夜间的活动大于白天,即使不考虑夜间活动,其夜间的体温也比白天高;而昼行动物白天的体温总是高于夜间。因此,尽管活动度能够影响体温昼夜节律的幅度,但体温昼夜节律形成并非由活动的节律所引起。

### (六)发育

大鼠出生后的第一天,其体温波动范围为 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ ,但在大鼠出生后 $15\sim 20\text{d}$ 时,这种波动则消失;当大鼠的日龄到 $25\text{d}$ 后体温重新出现弱的昼夜节律,生长到 $45\text{d}$ 后体温昼夜节律变化与成年大鼠相似。刚出生的小牛仔也缺乏体温的昼夜节律,只有生长到2个月后才具有与成年牛相似的节律。此外,体温波动也依赖于环境温度的变化,保持环境温度不变的情况下,出生 $10\text{d}$ 的小牛仔无论早晨还是傍晚体温变化几乎没有差别,只有动物生长到 $50\sim 60\text{d}$ 之后才具有较稳定的昼夜差别。对3个不同品种的狗进行研究后发现,小狗在出生不久后并没有明显的体温昼夜节律,只有生长到6周以后体温才具有明显的昼夜节律。对人类来说,虽然新生儿的体温具有昼夜节律性,但和成人相比其稳定性差异明显,只有长到一定阶段后才趋于稳定。

事实上,大多数刚出生的动物普遍无体温昼夜节律,推测可能是幼仔的昼夜节律系统还未完全发育完善,或者是产热和散热机制尚未发育完善,或者与这两种因素都有关。

### (七)性别

通常雄性哺乳动物的基础体温低于雌性动物,人类也是这样。男性体温低于

女性,这种差别在出生时就有。人类中影响女性体温变化的因素主要是月经周期。动物处于发情期时体温也明显受到影响,呈现一定的节律性变化。虽然性别对体温幅度和振幅中值无明显影响,但有些雌性动物体温昼夜节律峰值出现的时间明显延迟。因此人们在进行的各项动物实验时往往选择雄性动物,尤其是研究体温昼夜节律。

### 三、体温昼夜节律形成的机制

目前普遍认为下丘脑视交叉上核是动物生物钟调控的主器官,对动物的生理性和行为性昼夜节律有重要作用。

#### (一)视交叉上核

1. 视交叉上核的解剖结构 大鼠的视交叉上核是大约为  $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m} \times 700\mu\text{m}$  的神经核团,视交叉上核内含多种神经细胞,包括小神经细胞、胶质细胞以及星状细胞等,总数为  $16\ 000 \sim 20\ 000$ 。大多数视交叉上核神经元是  $\gamma$ -氨基丁酸能神经元,与分泌血管活性肠肽、促胃液素释放肽以及精氨酸加压素的神经元共存。一方面视交叉上核大部分接受了大量来自视网膜的投射(主要是通过视网膜-下丘脑束),它包含来自视网膜神经节细胞的成分。与传统的视锥或视杆细胞不同,该通路中含有一种称为黑素蛋白(melanoprotein)的物质,这种物质在视网膜未受损的盲人中发挥重要作用,故盲人仍然可以感受昼夜变化。此外,视交叉上核也接受中缝核、下丘脑室旁核前部、外侧膝状体等神经核团的投射,几乎一半以上来自中缝核的 5-羟色胺能神经元。另一方面视交叉上核也投射到内侧视前区、下丘脑室旁核,并且通过视前内侧核间接投射到腹侧被盖区,参与睡眠-觉醒的调控。

2. 视交叉上核与体温昼夜节律的关系 视交叉上核是生物昼夜节律的起搏器。实验证明,损毁视交叉上核能使体温的昼夜节律完全丧失,甚至在视交叉上核损毁 2.5 年后体温昼夜节律仍然不明显。显然,体温昼夜节律的形成依赖视交叉上核的完整性。

在稳定的 LD 条件下,发现完全损毁大鼠视交叉上核数月后,其体温昼夜节律逐渐恢复,随着时间的推移体温节律更明显。因此认为,LD 能使体温昼夜节律重新恢复的原因是视交叉上核发挥了光照信号主要中继站的作用;当中继站一旦损毁,大脑的其他区域可能起到接替或代偿的作用。比如视前区与大脑其他区域联系紧密,通过影响棕色脂肪组织的产热发挥调节作用。其次是室旁核背侧下区,此区域通过向内侧视前区和下丘脑背内侧发出投射纤维并且接受视网膜-下丘脑束信号的输入,从而在体温调节过程中发挥重要作用。第三个可能发挥作用的是动眼神经副核,动眼神经副核接受来自光照信号并调节瞳孔对光反应。

#### (二)调定点在体温昼夜节律与体温恒定中的作用

体温的恒定是受体温调定点的调控,视前区热敏神经元和温度不敏感神经元



是调控与维持体温调定点恒定的神经元基础,这些神经元群以突触联系的方式控制着分散的效应神经元群,产生各种不同的体温调节反应。按照这种观点体温昼夜节律的产生是体温调定点发生振荡的结果,即低温期调定点降低,引起自主散热增加;高温期调定点上移,增加机体的产热和减少散热,这种假设认为产热的增加是调定点升高的结果。但是人们使用温度梯度仪对动物的行为性体温调节进行研究后发现,动物选择环境温度的行为正好与体温昼夜节律中高温期和低温期的时相相反。夜行动物夜间体温高,但它们选择较低的环境温度,动物白天体温低而选择较高的环境温度;昼行动物的选择与夜行动物正好相反。基于这些现象,我们推测体温调定点可能不参与体温昼夜节律的形成。

人或昼行动物的体温节律是白天升高夜间降低,而夜行动物的体温昼夜节律则与昼行动物相反。另外,多种因素可以影响体温的昼夜节律,但它们均不参与体温昼夜节律的形成;调定点在体温昼夜节律过程中可能没有发生振荡,并不是体温昼夜节律形成的直接因素。体温昼夜节律主要受下丘脑视交叉上核生物钟的控制,因为损毁视交叉上核后,体温的昼夜节律消失。虽然目前对体温昼夜节律进行了大量研究,但仍有许多问题需要进一步研究。

(杨永录)

### 参 考 文 献

- [1] 耿青青, 石鸿儒. 衰老与冷应激研究进展[J]. 天津体育学院学报, 2005, 20(4): 55-57.
- [2] 刘延友, 王正荣. 生物节律系统的研究进展[J]. 西部医学, 2007, 19(2): 161-162.
- [3] 鲁生业, 鲁文彤, 官志文. 衣服物理性能对人体温热感觉和健康的影响[J]. 环境与健康杂志, 2004, 2(4): 255-258.
- [4] 吕永达, 霍仲厚. 特殊环境生理学[M]. 北京: 军事医学科学出版社, 2003: 65-104.
- [5] 石 路. 光源色温对人体生物节律和体温调节的影响[J]. 人类工效学, 2006, 12(3): 53-55.
- [6] 童 建, 秦立强, 王道锦. 松果体和视交叉上核对大鼠体温昼夜节律的调节机制[J]. 航天医学与医学工程, 2000, 13(2): 101-104.
- [7] 王 凌, 崔允文. 国外时间生物学进展[J]. 生物医学工程学杂志, 2005, 22(1): 185-188.
- [8] 许士凯, 陈再智. 老年生理学与病理学研究进展(之一)[J]. 现代中西医结合杂志, 2005, 14(2): 146-147.
- [9] 杨胜钊, 吴明玮. 生物节律周期探测方法的研究进展[J]. 国际生物医学工程杂志, 2008, 31(3): 141-144.
- [10] 杨永录, 刘亚国. 体温生理学—基础与临床[M]. 北京: 人民军医出版社, 2007.
- [11] Barger LK, Hoban-Higgins TM, Fuller CA. Gender differences in the circadian rhythms of rhesus monkeys[J]. *Physiol Behav*, 2010, 101(5): 595-600.
- [12] Gordon CJ. Principles of temperature regulation[A]. In: *Temperature and toxicology*[M]. New York: CRC Press, 2005: 13-106.

- [13] Guyton AC, Hall JE. Textbook of medical physiology[M]. 12<sup>th</sup> ed. Philadelphia: Elsevier Saunders, 2011: 867-877.
- [14] Luo AH, Aston-Jones G. Circuit projection from suprachiasmatic nucleus to ventral tegmental area: a novel circadian output pathway[J]. *Eur J Neurosci*, 2009, 29(4): 748-760.
- [15] Morrison SF, Nakamura K. Central neural pathways for thermoregulation[J]. *Front Biosci*, 2011, 16(1):74-104.
- [16] Piccione G, Fazio F, Giudice E, et al. Body size and the daily rhythm of body temperature in dogs[J]. *J Therm Biol*, 2009, 34(4): 171-175.
- [17] Refinetti R. The circadian rhythm of body temperature[J]. *Front Biosci*, 2010, 15(2): 564-594.
- [18] Weinert D, Waterhouse J. The circadian rhythm of core temperature: effects of physical activity and aging[J]. *Physiol Behav*, 2007, 90(2-3): 246-256.
- [19] Yamakawa GR, Antle MC. Phenotype and function of raphe projections to the suprachiasmatic nucleus[J]. *Eur J Neurosci*, 2010, 31(11):1974-1983.