

# 生物化学讲义

中国人民解放军第四军医大学

一九七三年十月

# 前 言

生物化学是从化学方面研究生命过程的科学。

生物化学（简称生化学）因其研究对象不同，可分为动物生化学、植物生化学、微生物生化学等。在医学中的生物化学是以人体为主要研究对象的。它的主要研究内容是人体的化学组成、体内所进行的化学变化以及这些化学变化与生理机能的联系。

生物化学是一门医学基础理论课程。它与生理学、微生物学、药理学及病理学等课程有密切关系。

机体的化学组成和化学变化具有严格的规律性。此种规律性一旦破坏必然引起机体内物质代谢的失常，进而表现为疾病；而疾病的发生和发展反过来又影响物质代谢。其结果，组织细胞和体液的化学成分和化学变化亦必发生相应的改变。因此，学习生物化学对疾病的预防、诊断和治疗都非常重要。

# 第一章 物质代谢概說

伟大领袖毛主席教导我们：“新陈代谢是宇宙间普遍的永远不可抵抗的规律。依事物本身的性质和条件，经过不同的飞跃形式，一事物转化为他事物，就是新陈代谢的过程。”毛主席的这一教导，含意是极其深刻而广泛的，既包括了社会科学领域中的各种事物，也包括了自然科学领域中的各种事物；既指精神而言，又指物质而言；生物界是这样，非生物界也是这样。

一般把营养物质在机体内的新陈代谢叫做物质代谢。本课程所要讨论的物质代谢就是指营养物质（主要是蛋白质、糖、脂类等）在人体组织细胞内所进行的新陈代谢。毛主席指出：“任何事物的内部都有其新旧两个方面的矛盾，形成为一系列的曲折的斗争。”人体组织细胞内组成成分，也必然存在着新旧两个方面的矛盾和斗争。人体在生命活动过程中，一方面，不断从外界摄取营养物质将其转变为组织细胞的组成成分（称为同化）；另一方面，原有组织细胞成分又不断地氧化分解，生成 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 和尿素等排出体外（称为异化）。同化和异化是一对矛盾中的两个方面，它们互相依赖和互相斗争，贯串于物质代谢的始终，推动了物质代谢的进行。

在机体生长的一定阶段或一定条件下，同化与异化必定有一方面是主要的，而另一方面是次要的。例如，在机体生长期或疾病恢复期，同化为矛盾的主要方面，异化居于次要地位，结果是细胞增多，体重增加；但在衰老期或患消耗性疾病时，矛盾的主要方面则由同化转为异化，其结果，细胞大量破坏，体重减少。

蛋白质、糖、脂类等组织细胞内的代谢，它们之间既有共同规律，又有各自的特殊规律。但是机体内各种物质代谢并不是彼此孤立存在毫无联系的，而是互相联系和互相制约的，当其中某一物质代谢发生改变时，必然对其他物质代谢产生深刻的影响。

机体是一个由许多部分组成的极为复杂的个体。机体内各部分之间不但有着密切的联系，并且还作为一个统一的整体借助物质代谢与周围环境发生联系。在此联系中，食物起着重要的作用，也就是通过食物中各种营养成分在机体内的代谢能够体现机体和环境的统一。例如，长期食肉的狗，其唾液中是不含有淀粉酶的，但是，如果长期用含淀粉多的食物喂狗，则其唾液中就会出现消化淀粉的淀粉酶。由于受外界影响而发生的物质代谢的改变过程，同时又是机体与外界环境相适应的过程，它不仅出现于受影响的机体本身，而且还有遗传给后代的可能性。

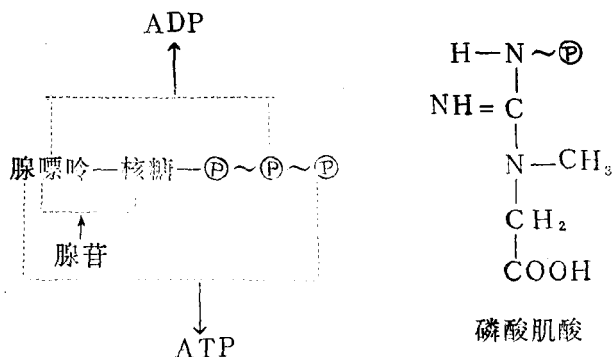
物质代谢是机体内物质的更高运动形式。辩证唯物主义是把运动和能等同看待的，因此，在物质代谢过程中必然伴随着能量的变化。一般说来，在同化过程（主要是合成过程）中常需要供给能量。相反，在异化过程（主要是分解过程）中常释放能量。

人体内能量的变化与非生物界不同，它的主要特点是：（1）能量的释放不象木材燃烧那样一次大量放出，而是逐步地分多次较少量地释放。例如1克分子葡萄糖（180克）在人体内完全氧化分解可放出720千卡的热（能的一种形式）。实际上，这样大量的能并非一次放出，而是分多次逐步地释放，直到完全氧化分解生成 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 为止；（2）所放出的

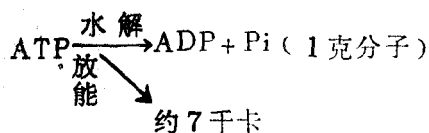
能量主要是以高能化合物的形式贮存起来备用。

机体内的高能化合物主要有高能磷酸化合物、酰基辅酶A等。

机体内主要的高能磷酸化合物有三磷酸腺苷(ATP)、二磷酸腺苷(ADP)、磷酸肌酸(CP)等。在这类化合物中含有高能量的磷酸键,一般称之高能磷酸键,用 $\sim\text{P}$ 表示之。



高能磷酸化合物水解时高能磷酸键断裂,同时释放出较多的能量,例如ATP水解,每产生1克分子无机磷酸便可释放出约7千卡的能量。



Pi, 无机磷酸 ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )

一般的磷酸酯如磷酸葡萄糖、磷酸甘油等水解时释放能量较少,约2—4千卡。

酰基辅酶A是由辅酶A ( $\text{HS}-\text{CoA}$ ) 与酰基 ( $\text{R}-\text{CO}-$ ) 结合生成的化合物。机体内酰基辅酶A的主要代表者是乙酰辅酶A ( $\text{CH}_3-\text{CO} \sim \text{S}-\text{CoA}$ )。

现代科学资料证明,人体内的物质代谢过程都是在神经体液因素(主要为激素)的调节下进行的。这种调节主要是通过影响酶的作用来实现的。酶是在组织细胞内合成的一类蛋白质,它决定着体内化学反应能否进行、反应方向以及反应速度的强弱。

## 第二章 酶

### 第一节 酶的基本概念

人体内的物质代谢过程包括一系列复杂而又有规律的化学变化，这些化学变化与体外有很大差别。例如，体外要使蛋白质、糖或脂肪等物质水解或氧化，必须使用强酸、强碱等试剂，采取高温或长时间的处理；在体内，PH接近中性，既无强烈的试剂，又无高温高压等条件，但却时刻都在迅速地进行着各种复杂的化学反应，且其中许多反应是目前在实验室中无法做到的。其原因就是由于体内含有许多催化剂，能促使化学反应的顺利进行。大量实验的结果充分证明：这些催化剂就是生活细胞所产生的一类蛋白质，称为酶。

酶的作用与一般催化剂比较，有它的许多特点。例如：

(1) 酶的催化效率很高：一个过氧化氢酶分子在1分钟内就能促使500万个过氧化氢分子的分解，蔗糖酶催化蔗糖水解的速度要比酸所催化的速度大 $2.5 \times 10^{12}$ 倍。

(2) 酶的作用特异性很高：即对所作用的物质(称为基质或底物)和所催化的反应有严格的选择性。例如氢离子可以催化淀粉、蛋白质等许多物质的水解，蛋白酶只能催化蛋白质的水解，又如氨基酸脱羧酶只能催化氨基酸的脱羧反应，氨基酸脱氨酶只能催化氨基酸的脱氨反应。

酶类在体内的分布，不是均匀的，也不是杂乱无章的，各种酶在各器官组织和细胞内存在的部位和含量都是极有规则的，各种酶各自作用于特定的基质，催化特定的反应，又有着很高的催化能力，这样才能使机体复杂的物质代谢，有条不紊地、顺利进行。机体一切生命活动都是以物质代谢为基础的，而代谢过程所包含的绝大多数化学反应，需要酶的催化，所以酶是进行物质代谢、维持生命活动的主要条件。不同器官组织所含酶类在质与量上有所不同，因此其代谢的类型和强度各不相同，也就是具有不同的生理功能。

酶本身是蛋白质，是体内的组成成分。和体内其他物质一样，酶也是处在不断合成、分解的代谢变动之中的。酶的数量和催化效能(活性)发生改变时，就影响到物质代谢过程。机体可以通过神经和激素，在一定限度内影响各组织所合成酶的数量和活性，以调节物质代谢使之统一协调，并适应外界环境变动和身体活动的需要。疾病时则往往可以观察到某些组织器官或血、尿中酶的异常。许多药物的作用也是通过影响酶的质与量，以达到治疗的目的。因此，酶在正常生命活动中是必不可少的，在疾病的发生，临床对疾病的诊断和治疗中也都有重要的意义。

酶的命名在习惯上有以下原则：

(1) 按酶作用的基质名称命名，如淀粉酶、蛋白酶等；

(2) 根据酶所催化的化学反应性质命名，如转氨酶能催化氨基由一个化合物转移到另一个化合物上的反应。也可以结合上述两点命名，如乳酸脱氢酶是催化乳酸脱氢反应的酶。

(3) 有时在上述命名基础上，还加上酶的来源或酶的其他特点，如胃蛋白酶及胰蛋白酶分别是来自胃和胰的蛋白酶，碱性磷酸酶及酸性磷酸酶则指出这两种磷酸酶作用所要求的酸硷度。

## 第二节 酶的化学本质

如上所述,酶是本质为蛋白质的生物催化剂。

酶有的是单纯蛋白质,有的是结合蛋白质。催化水解作用的酶类,许多是单纯蛋白质,如淀粉酶、胃蛋白酶等;催化氧化还原反应的酶类大都是结合蛋白质,即在此类分子中,除蛋白质部分外,还有非蛋白质部分。

属于结合蛋白质的酶类,其蛋白质部分称为酶蛋白,非蛋白质部分称为辅基。辅基有的与酶蛋白结合较紧,有的与酶蛋白结合较松,容易分开,习惯上将容易与酶蛋白分离的辅基称为辅酶。酶蛋白与辅基(或辅酶)结合而成全酶。酶蛋白或辅基(辅酶)单独存在时都没有催化活性,只有结合成为全酶才具有催化活性。

各种酶蛋白必须与其特异的辅酶相配合才能成为有活性的全酶,即一种酶蛋白只能与一定的辅酶相配合,但同一种辅酶则常可与不同的酶蛋白配合组成不同的全酶。例如乳酸脱氢酶的酶蛋白必须与辅酶 I 结合才具有催化活性,而不能与其他辅酶相配合,但辅酶 I 则可作为许多催化脱氢反应的脱氢酶的辅酶。

已知的辅基或辅酶,有的是含金属的有机物,如铁卟啉、维生素 $B_{12}$ 等;有的是不含金属的有机物,如核苷酸等。值得注意的是:大多数维生素是体内辅酶的组成成分,这些维生素通过构成酶的重要辅酶,起到维持人体正常生命活动的重要作用。某些酶的辅基或辅酶见表 2—1。

表 2—1 某些酶的辅基或辅酶

| 酶            | 辅 基 或 辅 酶                   |
|--------------|-----------------------------|
| 细胞色素、细胞色素氧化酶 | 铁卟啉                         |
| 各种脱氢酶        | 辅酶 I 或辅酶 II—含尼克酰胺(维生素 P.P.) |
| 各种黄酶         | 磷酸核黄素 } 含核黄素(维生素 $B_2$ )    |
|              | 或黄素腺嘌呤二核苷酸                  |
| 转氨酶、氨基酸脱羧酶   | 磷酸吡哆醛—含吡哆醛(维生素 $B_6$ )      |
| 乙酰化酶         | 辅酶 A—含遍多酸(泛酸)               |
| 丙酮酸脱氢酶       | 焦磷酸硫胺素—含硫胺素(维生素 $B_1$ )     |

酶的催化活性取决于其分子结构的完整性(酶蛋白的空间构型和分子中各基团的完整)。但实验证明:酶分子中有的部分对酶活性影响不大,有的部分则为酶发挥其作用所必需的。酶分子中直接与基质结合,并催化基质变化的部分称为活性中心。活性中心是酶具有催化能力的主要部分。酶的作用所以具有高度的特异性,原因就在于各种酶各自具有特异结构的活性中心,只能与特定的基质结合,催化特定的反应,可模式如图 2—1。

某些酶催化功能虽然相同,但其蛋白质分子结构和性质有差别。这类结构有所不同,而催化功能相同的酶,称为同功酶。例如血清中的乳酸脱氢酶,用电泳法可分为 5 种,都能催化乳酸的脱氢反应,这 5 种分别主要来自不同的器官组织。临床上测定各种同功酶的活性,可帮助疾病的鉴别诊断。

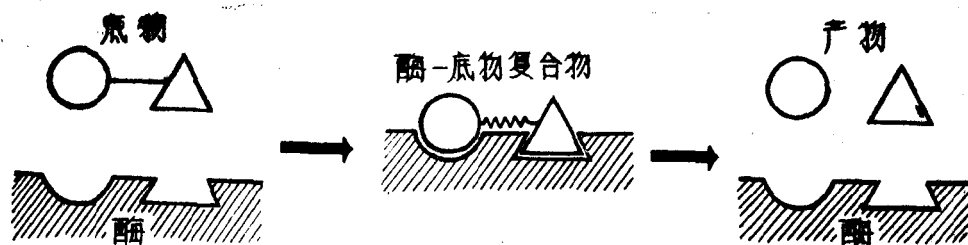


图2—1 酶 的 作 用

### 第三节 影响酶作用的主要因素

由于酶的化学本质是蛋白质，所以它的作用还与一般催化剂有许多不同之处，受到许多因素的影响。了解这些影响因素，对理解酶在体内的作用、分析酶实验的结果以及合理应用酶类药物等都是必要的。某些影响酶作用的主要因素如下。

#### 一、温 度

温度对酶促反应（即酶所催化的反应）有两种相反的影响：一种是对化学反应速度的影响，另一种是对酶本身的影响。一般温度升高时，化学反应速度加快，酶促反应也不例外，但酶是蛋白质，容易受热破坏，温度升高时酶被破坏的速度也加快，反而使酶促反应速度降低。这两种作用的结果，使酶在一定温度下，催化的反应速度最快，这温度称为酶作用的最适温度。人体内大多数酶的最适温度为40℃左右。

由于酶蛋白分子容易受热变性失活，所以临床上作酶活性测定，样品（血、尿等）不宜在高温下久置，酶类药品亦应冷冻保存，以防失效。

#### 二、pH

pH对酶促反应有明显影响。pH不同，酶蛋白分子中各种化学基团的解离情况不同，基质分子的基团解离也可不同，过酸、过碱的环境还可以破坏酶分子本身，这些都影响到酶促反应速度。各种酶的结构不同，基质不同，受pH的影响也不同。在一定的pH下，酶促反应速度最高，这pH称为酶作用的最适pH。几种酶的最适pH见表2—2。

表2—2 某些酶的最适pH

| 酶 的 名 称   | 最 适 pH   | 酶 的 名 称  | 最 适 pH  |
|-----------|----------|----------|---------|
| 唾 液 淀 粉 酶 | 6.8      | 肝精氨酸酶    | 9.5—9.9 |
| 胃 蛋 白 酶   | 1.5—2.5  | 肝脂肪酶     | 8.3     |
| 胰 蛋 白 酶   | 8.0—10.0 | 肌肉琥珀酸脱氢酶 | 9.0     |
| 胃 脂 肪 酶   | 5.5—7.9  | 组织蛋白酶    | 4—5     |
| 胰 脂 肪 酶   | 7.0—8.5  | 血浆碱性磷酸酶  | 8.8—9.2 |

由于 pH 对酶促反应的影响很大，当体内代谢过程中产生的酸，如不能及时处理，以致体液 pH 发生变动时，就会影响到细胞内酶的活性，导致代谢紊乱，使病情恶化。在使用酶类药物时，也要注意配合相应的 pH，如胃蛋白酶常和稀盐酸一起制成合剂，用于胃液分泌不足和消化不良的患者。

### 三、激 活 剂

某些酶刚从细胞内产生出来时并无活性，必须经适当的物质作用后才变成有活性的酶，这些酶的无活性前身物称为酶元。如从胃腺细胞分泌出来的胃蛋白酶元是没有活性的，只有受  $H^+$  的影响转变成胃蛋白酶后才能催化蛋白质的水解。

凡能增强酶的活性或能使无活性的酶转变为有活性的酶的物质称为酶的激活剂。激活剂可以是简单的无机离子，也可以是有机化合物。例如  $H^+$  是胃蛋白酶元的激活剂， $Cl^-$  是唾液淀粉酶的激活剂， $Mg^{2+}$  是许多磷酸激酶的激活剂，胆汁酸盐是胰脂肪酶的激活剂等。若激活剂本身就是一种酶，则称为激酶。例如肠液中的肠激酶是使胰蛋白酶元转变为胰蛋白酶的一种激酶，而胰蛋白酶除能催化蛋白质水解外，又有促使糜蛋白酶元转变为糜蛋白酶的激酶作用（“激酶”这名称还有另一用法，即催化某些磷酸化反应的酶，也常称为激酶。例如催化葡萄糖变为 6-磷酸葡萄糖的酶，称为葡萄糖激酶）。

### 四、抑 制 剂

与激活剂相反，凡能使酶活性降低或丧失的物质，称为酶的抑制剂，依其作用原理可分为下列三类：

（一）能使蛋白质变性的物质：如强酸、强碱、乙醇、重金属盐等均能使酶丧失活性。

（二）与酶分子中的活性基团或辅基结合的物质：如许多酶的活性基为  $-SH$ ，一些氧化剂能氧化  $-SH$  生成  $-S-S-$ ，使酶失活；又如  $CN^-$ 、 $CO$ 、 $H_2S$  等易与呼吸酶辅基铁卟啉中的  $Fe^{2+}$  结合，而使呼吸酶失去活性。

（三）竞争性抑制物：某些化合物与酶的基质结构相似，能和基质竞争与酶的活性中心相结合，而使酶的活性降低，这种抑制作用称为竞争性抑制。如丙二酸的结构与琥珀酸（丁二酸）相似，是琥珀酸脱氢酶的竞争性抑制物，某些药物（如新斯的明）以及某些有机磷毒剂结构与乙酰胆碱相似，为胆碱酯酶的竞争性抑制物。

实验证明，不少毒物的毒性在于抑制身体的重要酶类，而一些药物则是通过抑制酶的活性或解除对酶的抑制而发挥作用的。

## 第四节 酶活性测定的基本原则

血液和组织中含有许多酶类，但每一种酶的含量却甚微，且常与其他蛋白质混合存在，难以提纯，所以临床上酶的定量一般都不是测定酶蛋白的绝对量，而是根据酶的催化特性来测定酶含量的。在一定的条件下，酶的活性（即酶促反应速度）与酶的浓度成正比，所以测酶活性就可以代表酶的相对含量。



酶活性测定实际上就是测定酶促反应速度，通常有两类方法：

(一) 测定一定时间内基质变化的量：例如过氧化氢酶促使过氧化氢分解，其反应速度可用一定时间内 $H_2O_2$ 减少的量来表示。

(二) 测定一定量的基质变化完成所需要的时间：如血浆中含有凝血酶元，在一定条件下可转变为凝血酶，促使血液凝固，如其含量多，则血凝时间短，反之含量少，则血凝时间长，故血凝时间就能反映凝血酶元的含量。

酶活性测定的结果常用活性单位表示。例如临床上测定血清中胆碱酯酶（催化乙酰胆碱的水解），一般规定以每毫升血清在一定实验条件下， $37^{\circ}C$ 作用60分钟，能水解乙酰胆碱1微克分子为1个单位。由于酶的活性单位是在一定实验条件下规定的，所以不同的酶或同一酶用不同实验方法所获得的单位之间，不能任意按其数值大小来比较酶的活性高低。

酶活性测定具有重要实际意义。例如，某些器官组织病变时，其酶的产生或释放的情况常发生异常，临床上可测定血、尿或组织中酶的活性来帮助诊断。同一种疾病常可见不同种酶活性的变化，不同种疾病也可以引起同一种酶活性的改变；此外，如服用的药物，异常的代谢产物等在血、尿中也能作为抑制剂或激活剂影响酶的活性，这些都是临床上分析酶活性测定的结果时，应当考虑到的。

## 第三章 糖代謝

糖的生理功能主要有两个方面：一是供给机体所需要的能量，二是组成细胞结构的物质。

人体所需能量约70%来源于糖，主要是葡萄糖和糖元。一克葡萄糖在体内完全氧化分解，可以放出约4千卡热能。糖元是人体内贮存的糖，它经过分解能生成许多的葡萄糖，再进行氧化分解放出能量。但是人体内糖的含量较少，约占1%左右，所以每天需要摄入一定量的食物如淀粉等，来维持生理和劳动工作的需要。临床上对于不能进食的病人，常由静脉注射葡萄糖，就是这个道理。

组成细胞结构物质的糖的种类很多，其中重要的有核糖、脱氧核糖和粘多糖等。核糖与脱氧核糖是构成核酸的组成物质。重要的粘多糖有透明质酸、硫酸软骨素和肝素等。

### 第一节 糖代謝基本规律

毛主席指出：“和形而上学的宇宙观相反，唯物辩证法的宇宙观主张从事物的内部、从一事物对他事物的关系去研究事物的发展，即把事物的发展看做是事物内部的必然的自己的运动，而每一事物的运动都和它的周围其它事物互相联系着和互相影响着。”糖、脂和蛋白质等物质代谢之间是互相联系和相互之间影响着的。脂和蛋白质代谢将在以后章节中叙述。

组织细胞中的糖元是糖的贮存形式。人体内贮存的糖元约400克，在许多组织中都有，其中以肝脏（肝糖元）与肌肉（肌糖元）中贮存最多，肝糖元约为100克、肌糖元约为250—350克。血液中的葡萄糖是糖的运输形式，正常人空腹时，每百毫升血液中含有80—120毫克。

葡萄糖合成糖元的过程主要在肝细胞和肌肉细胞中进行，分别生成肝糖元和肌糖元。肝糖元可分解为葡萄糖，而肌糖元只能分解为乳酸，经血液运输至肝脏再转变为葡萄糖或糖元。

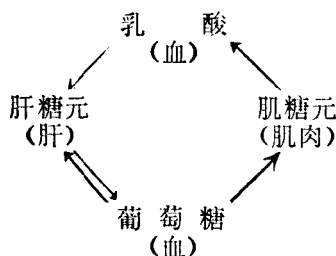


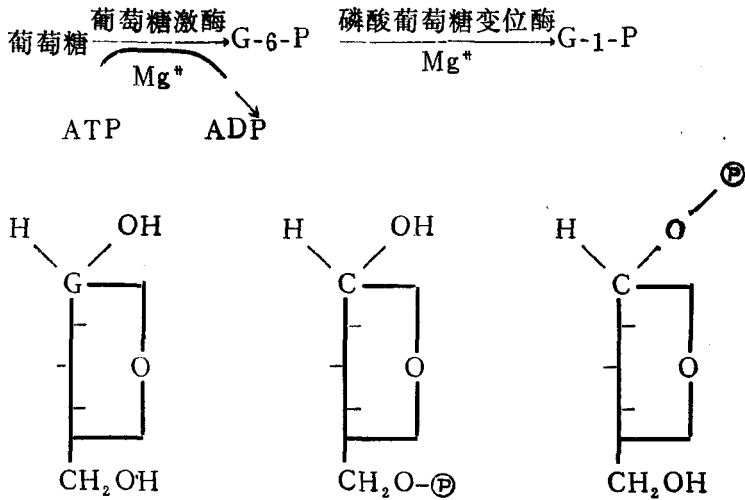
图3—1 肝糖元与肌糖元的关系

#### 一、糖元合成作用

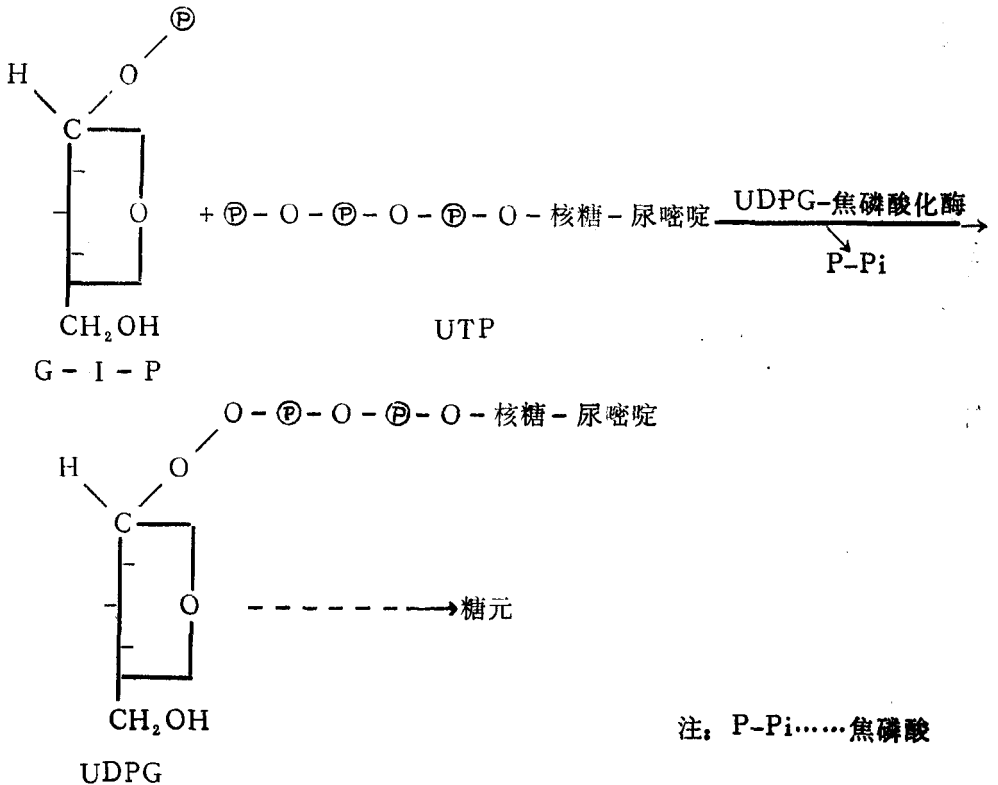
糖元是由许多分子葡萄糖所组成的多糖。正常人血糖浓度升高时，肝细胞（肌细胞）能加速合成糖元，以便将血中过多的葡萄糖贮存起来。葡萄糖在肝细胞中合成肝糖元的途径与

在肌细胞中合成肌糖元的途径是完全一样的。

葡萄糖在细胞内首先在ATP及Mg<sup>2+</sup>的参加下、经葡萄糖激酶的作用,生成〔6〕-磷酸葡萄糖(G-6-P),〔6〕-磷酸葡萄糖再受磷酸葡萄糖变位酶的作用,转变成〔1〕-磷酸葡萄糖(G-1-P)。



〔1〕-磷酸葡萄糖(G-1-P)在尿二磷酸葡萄糖—焦磷酸化酶催化下,与尿三磷(UTP)作用生成尿二磷酸葡萄糖(UDPG)、最后生成糖元。



UDPG是一个十分活泼的化合物,它不仅在糖元生成上,而且在后述的糖羧酸的代谢上也起

着重要的作用。

以上是由葡萄糖合成糖元的主要途径。现将其全部过程综合如下：

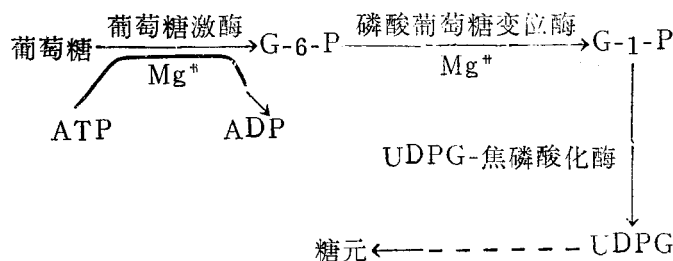


图 3—2 糖元合成的主要途径

当细胞合成糖元时，同样伴有 $\text{K}^+$ 由细胞外进入细胞内，使血中 $\text{K}^+$ 的浓度降低。在临床上长期大量注入葡萄糖时，常同时补给钾盐，以防止血钾浓度过低。

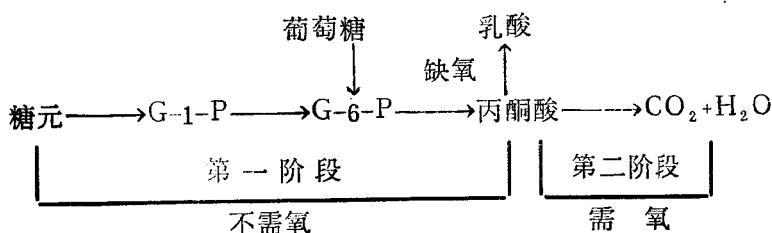
在肝脏内生成糖元的物质除了葡萄糖外，还有果糖、半乳糖等单糖和脂肪、蛋白质分解产物及乳酸等一些非糖物质。由单糖生成糖元的过程叫做糖生成作用，由非糖物质生成糖元或葡萄糖的过程叫糖异生作用。在正常生理情况下，葡萄糖是合成糖元的主要原料，但当葡萄糖来源不足或不能被完全利用时，糖异生作用则加强。例如经常饥饿，身体就会逐渐消瘦，就是因为体内的脂肪和蛋白质分解加强，氧化释放能量维持生理和工作的需要。相反，当食物中糖的来源过剩时，糖也可以转变为脂肪和某些氨基酸，身体往往会逐渐肥胖。由此可见糖、脂肪和蛋白质代谢是相互联系和互相影响的，而不是孤立进行的。

## 二、糖的氧化分解

糖分解代谢与合成代谢是两个对立统一的过程，但矛盾的两方面其发展是不平衡的。在正常情况下，由于人体所需能量约70%是通过糖的分解来供给的，因此了解糖的氧化分解过程是很重要的，糖的氧化分解可分为需氧分解和无氧分解两种情况。

### （一）需氧分解

这是体内糖氧化分解供能的主要方式。全过程相当复杂，每个反应都是在酶的催化作用下进行的。一般将糖元和葡萄糖需氧分解过程分为两个互相衔接的阶段。



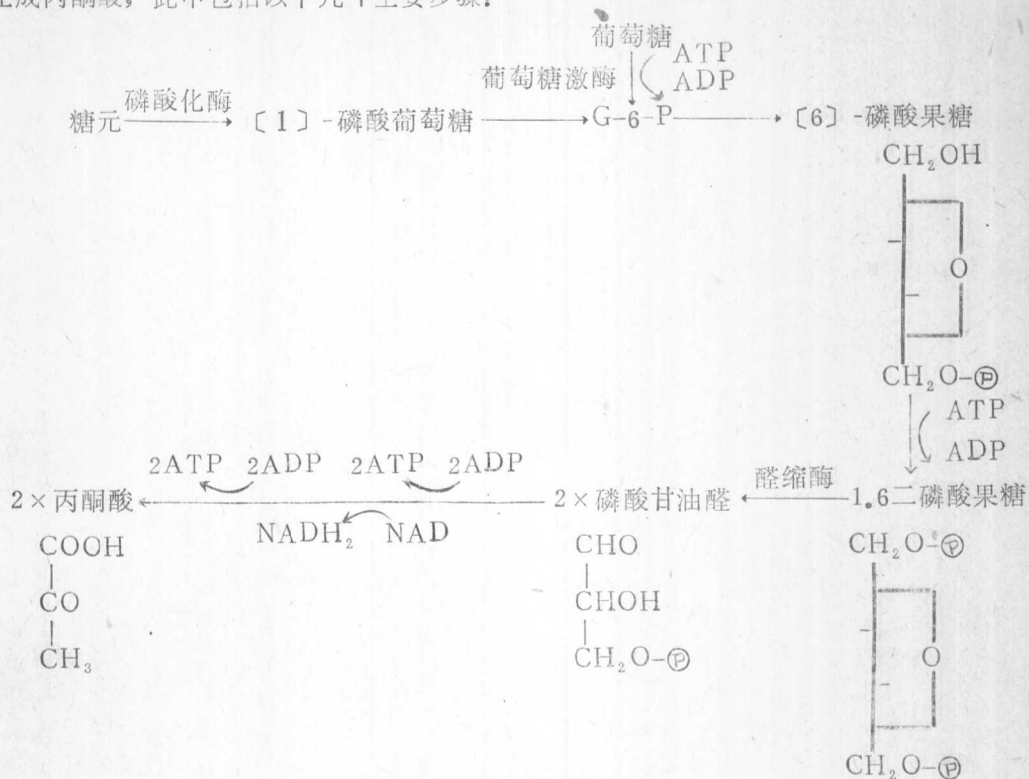
第一阶段是从糖元或葡萄糖开始，经过许多反应生成丙酮酸。特点是①氧不直接参加反应（不需氧氧化）；②能量释出较少。第二阶段是丙酮酸继续氧化分解最后生成 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 的过程。特点是：①氧直接参加反应；②释出大量能量以供机体需要。

两个阶段虽然有所区别，但又有联系。丙酮酸是两个阶段的衔接点。由丙酮酸氧化生成

$\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ ，或者生成乳酸，决定于机体的生理状态，在氧气供给充分情况下丙酮酸以氧化生成 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 为主、在缺氧情况下以生成乳酸为主。

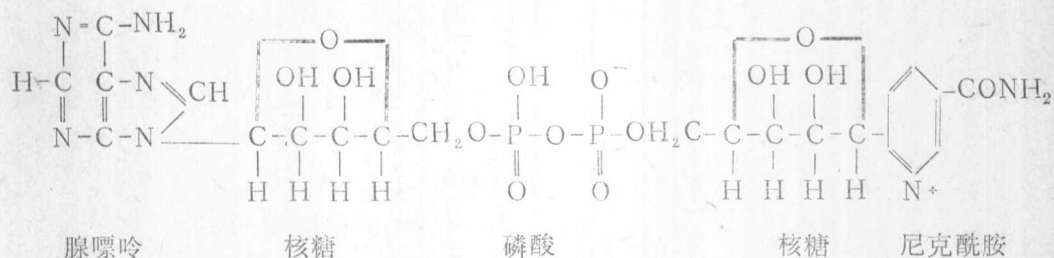
### 1. 第一阶段 糖元或葡萄糖 $\rightarrow$ 丙酮酸

糖元或葡萄糖氧化分解时，首先要转变为〔6〕-磷酸葡萄糖，再经过一系列分解作用最后生成丙酮酸，其中包括以下几个主要步骤：



在反应开始阶段是消耗能量的（共消耗2分子的ATP），但是为什么说这一阶段中还有少量能量释出呢？这是因为由磷酸甘油醛变为丙酮酸的过程中（不需氧化）释放2次能量，共生成4分子ATP，去掉反应开始阶段消耗的2分子ATP，还剩余2分子ATP。

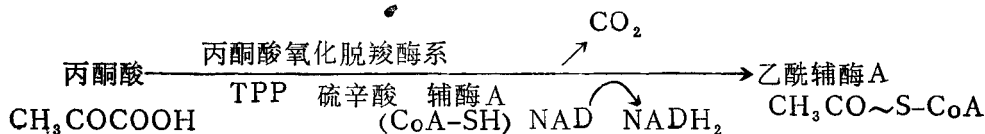
在上述分解过程中，有脱氢作用发生，脱氢作用也是一种氧化方式，不过是不需要氧参加的一种氧化反应。脱下的氢由辅酶I（NAD）接受，生成还原辅酶I（ $\text{NADH}_2$ ）。辅酶I的组成中含有尼克酰胺（维生素PP）、腺嘌呤、核糖与磷酸。其结构式如下：



由于辅酶I分子中的尼克酰胺可接受氢而还原，亦可脱氢而氧化，所以它在后述的生物

2. 第二阶段 丙酮酸 $\longrightarrow$ 乙酰辅酶A $\longrightarrow$ CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O

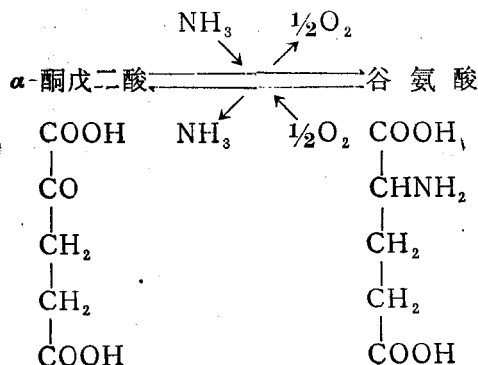
(1) 丙酮酸 $\longrightarrow$ 乙酰辅酶A 在此过程中, 不仅参加的酶很多, 而且生成的乙酰辅酶A 又是代谢上极为活泼的化合物, 因此被认为是糖有氧分解过程中的一个重要步骤。



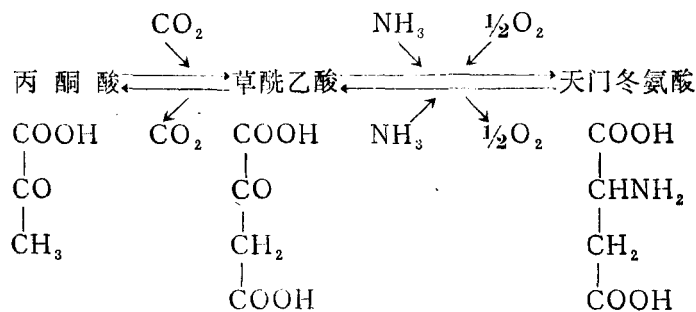
(2) 乙酰辅酶A  $\xrightarrow{\text{三羧酸循环}}$   $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

三羧酸循环(又名柠檬酸循环)是以三羧基酸的柠檬酸为起点,以草酰乙酸为终点的在细胞的线粒体进行的一种循环。当乙酰辅酶A与草酰乙酸缩合成柠檬酸时,则循环便开始进行,最后以生成草酰乙酸告终,其结果在每次循环中将1分子的乙酰辅酶A完全氧化为 $\text{CO}_2$ 与 $\text{H}_2\text{O}$ 。从表面上看来,在循环中草酰乙酸似乎没有变化,受氧化分解者仅是乙酰辅酶A。但循环后的草酰乙酸在质上已与循环前有很大不同,其分子中的元素组成(C和H)已有所改变。

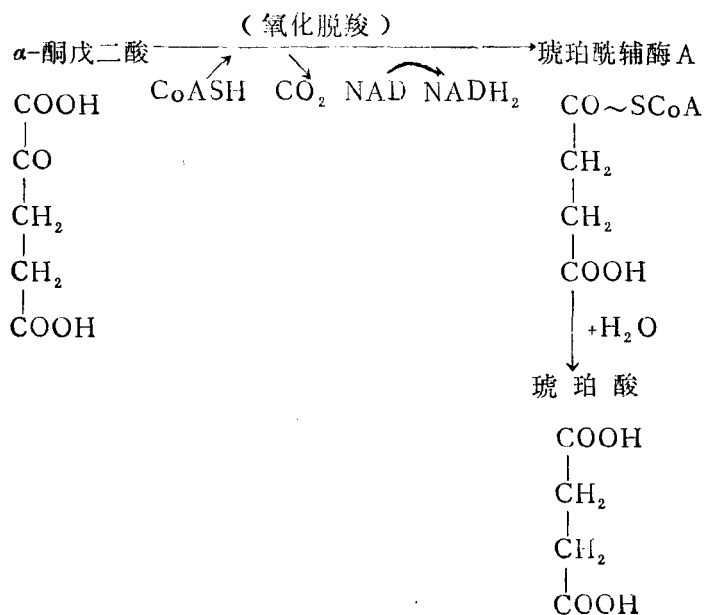
三羧酸循环包括以下几个步骤,即柠檬酸 $\longrightarrow$ 顺-乌头酸 $\longrightarrow$ 异柠檬酸 $\longrightarrow\alpha$ -酮戊二酸 $\longrightarrow$ 琥珀酰辅酶A $\longrightarrow$ 琥珀酸 $\longrightarrow$ 延胡索酸 $\longrightarrow$ 苹果酸 $\longrightarrow$ 草酰乙酸。在这些化合物中,最重要的是柠檬酸、 $\alpha$ -酮戊二酸及草酰乙酸等三种化合物。柠檬酸是循环的开始化合物, $\alpha$ -酮戊二酸是循环的重要中间产物,它又与氨基酸中的谷氨酸可以互相转变。



草酰乙酸是循环的最终产物，也是循环开始的必要化合物。草酰乙酸的含量多少，可影响循环的速度，在组织中是通过与丙酮酸互相转变以及与天门冬氨酸相互转变来调节它的含量的。



在三羧酸循环过程中有脱氢和 $\text{CO}_2$ 放出，例如：



现将三羧酸循环主要过程表示如下：

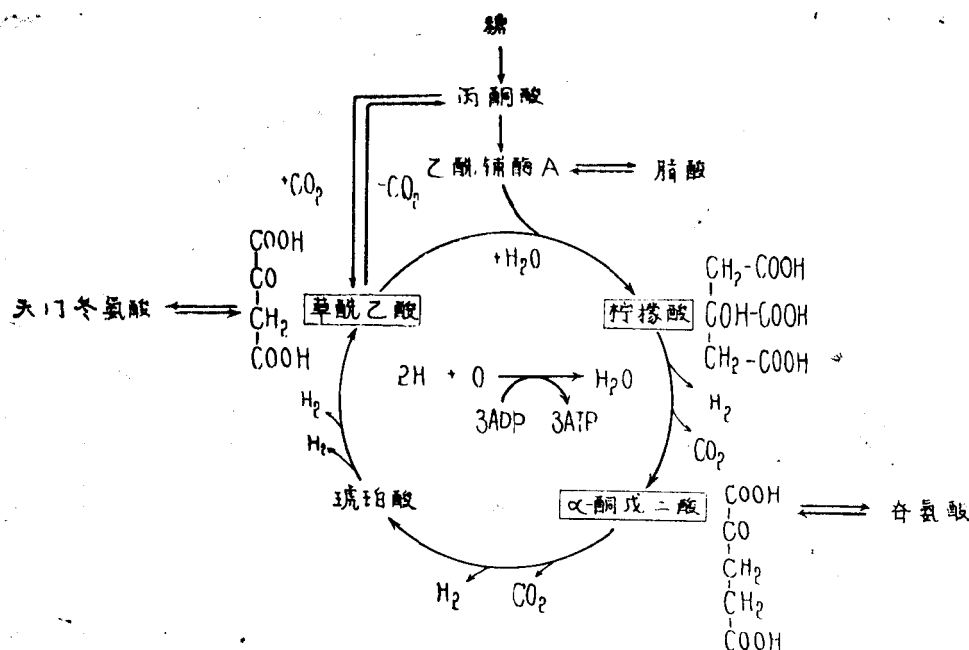


图 3—3 糖需氧分解的主要途径

从上述过程中可以看出：

① 三羧酸循环是耗氧最多，释能最多的代谢过程，在每次循环中共脱出 8 个氢，这 8 个氢在与氧结合生成水的过程中，根据实验证明，在体内每消耗  $\frac{1}{2} \text{O}_2$ ，平均生成 3 分子 ATP。

因此，在一次循环中共生成 12 分子 ATP，每分子葡萄糖氧化分解至  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  时共生成 38 分子 ATP（每分子葡萄糖生成 2 分子丙酮酸，由磷酸甘油醛至丙酮酸及由丙酮酸至乙酰辅酶 A 过程中共脱氢氧化两次，每次生成 3 分子 ATP、前后相加，共生成 38 分子 ATP）。

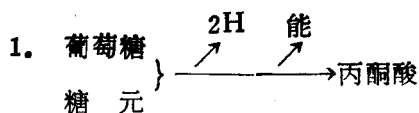
② 三羧酸循环不仅是糖代谢的主要环节，而且也是脂类和蛋白质代谢的主要途径。循环中的  $\alpha$ -酮戊二酸和草酰乙酸可分别与谷氨酸和天门冬氨酸相互转变，而且这两种氨基酸又是蛋白质代谢中比较活泼的成分，许多其它氨基酸与它们均有密切关系，因此，三羧酸循环在氨基酸的合成和分解上都起着重要的作用。此外，从乙酰辅酶 A 的来源来看，由于脂类中重要成分的脂肪酸的氧化分解可生成较糖代谢更多的乙酰辅酶 A，这些乙酰辅酶 A 进一步氧化分解为  $\text{CO}_2$  与  $\text{H}_2\text{O}$ ，也必须经过三羧酸循环才能完成。

## （二）无氧分解（酵解作用）

在氧供给充足条件下，糖的需氧分解不断使糖氧化分解为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ，释出大量能量供机体需要。另一方面机体也不断的进行着无氧分解。正常时人体内有氧分解和无氧分解都在进行，不过平时有氧分解占主要位置，无氧分解较为次要。当机体处于缺氧状态时，例如呼吸障碍、极度贫血、血液循环障碍、一氧化碳中毒、激烈运动和强行军等情况时，糖的无氧分解加强，乳酸生成增多。

酵解作用可分为两个阶段。

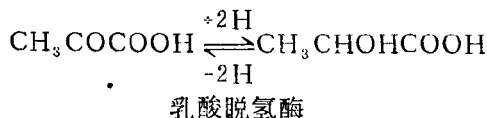




这个阶段与糖的需氧分解的第一阶段完全相同，仅有少量能量释出。

## 2. 丙酮酸 $\rightarrow$ 乳酸

在缺氧状态时，丙酮酸在乳酸脱氢酶的作用下，接受酵解过程中脱下的氢而生成乳酸。这一过程是可逆的，在氧供给充足时乳酸又可脱氢再生成丙酮酸，继续氧化进入三羧酸循环氧化为 $\text{CO}_2$ 与 $\text{H}_2\text{O}$ 。



所以当糖分解为丙酮酸以后，是继续氧化为 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ ，还是生成乳酸，在这里氧的供给充足与否是重要的条件。因为在有氧条件下，磷酸甘油醛脱下的氢通过 $\text{NADH}_2$ 与氧作用可以生成 $\text{H}_2\text{O}$ ，而不交予丙酮酸生成乳酸。

现将酵解（由糖元开始）整个过程表示如下：

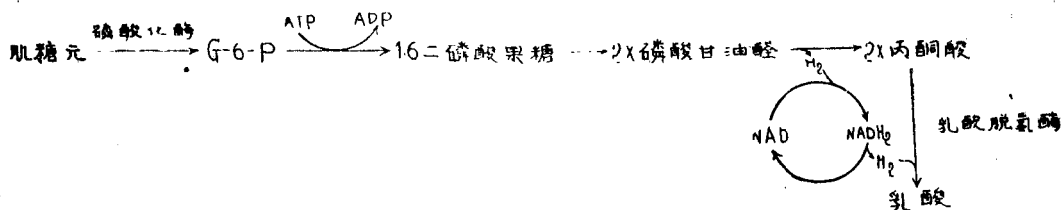


图 3—4 糖酵解的主要过程

糖酵解过程中生成的乳酸经血液送到肝脏，在还原辅酶 II（ $\text{NADPH}_2$ ， $\text{NADP}$ 较 $\text{NAD}$ 组成中多一个磷酸）的存在下，经糖酵解的逆行途径合成肝糖元。

酵解过程中释出能量虽然不多，但在缺氧时却是能量的主要来源。因为当机体缺氧时，组织细胞中的需氧分解过程减弱，以致能量供应不足，影响各种生理机能，特别是大脑对能量不足反应比较敏感。另外，我们应注意到乳酸是一个酸性物质，在特殊情况下，生成过多对机体也是不利的。正常组织在氧供给充足的情况下，一般不进行酵解，但肿瘤组织在氧供给充足时也进行酵解，这称为有氧酵解。

## 三、糖代谢其它途径

糖需氧分解和糖酵解过程虽然是人体内许多组织（特别是肌肉组织）中氧化分解的主要方式，但这不是糖唯一的代谢途径，另外还有其它代谢途径，其中主要的有磷酸戊糖循环和糖羧酸代谢两种方式。

### （一）磷酸戊糖循环（HMS）

磷酸戊糖循环在动物组织中以肝、脾、肾上腺皮质、脂肪组织以及授乳期中的乳腺较为显著，肌肉组织中不存在。循环过程相当复杂，是由糖生成戊糖和由戊糖转变为己糖的主要途