

17746

75797

現代医用化学講義

下 册

59、60級用



湖南医学院現代医用化学編写組編

1960年8月

項

參



04123167

第三篇 新陳代謝各論

第一章 醣的代謝	(1)
一、醣的消化和吸收.....	(1)
二、醣的中間代謝.....	(2)
三、醣代謝的調節.....	(14)
第二章 脂類的代謝	(18)
一、脂類的生理作用和營養功能.....	(18)
二、脂類的消化和吸收.....	(19)
三、脂類的運輸和儲存.....	(20)
四、脂肪的分解代謝.....	(21)
五、中樞神經系對脂肪代謝的調節.....	(28)
第三章 蛋白質代謝	(30)
一、蛋白質代謝在機體生活機能上與營養上的意義.....	(30)
1. 氮平衡.....	(31)
2. 蛋白質營養標準.....	(31)
3. 蛋白質的生理價值.....	(32)
4. 蛋白質的貯存.....	(33)
二、單純蛋白質的代謝.....	(33)
1. 蛋白質在胃中的消化.....	(34)
2. 蛋白質在腸內的消化.....	(34)
3. 蛋白質在腸內的腐敗作用及腐敗產物的解毒.....	(35)
4. 蛋白質的中間代謝.....	(37)
三、結合蛋白質代謝.....	(47)
1. 血紅蛋白消化與吸收.....	(48)
2. 血紅蛋白和組織內的变化.....	(48)
四、中樞神經系統對蛋白質代謝的調節.....	(49)
第四章 核酸的代謝	(51)
一、核酸的生物學意義.....	(51)
二、核酸的消化和吸收.....	(53)
三、核酸的合成代謝.....	(53)
四、核酸的分解代謝.....	(56)
五、核酸代謝的調節.....	(59)

第五章 水与无机盐的代謝	(60)
一、水的代謝.....	(60)
二、无机盐代謝.....	(64)
第六章 各种物質代謝間的相互关系	(75)
一、物質代謝是相互矛盾的統一过程.....	(75)
二、各种物質在体内代謝过程中的相互关系.....	(76)
1. 消化吸收过程中的相互关系.....	(76)
2. 各种物質代謝数量上的相互关系.....	(77)
3. 中間代謝过程中各种物質相互轉变的关系.....	(77)
三、蛋白質与核酸的代謝是一切代謝的中心.....	(80)
四、内外环境与机体物質代謝的关系.....	(81)
五、中樞神經系統在人类机体代謝中的主导作用.....	(82)

第三篇 新陳代謝各論

第一章 醣的代謝

醣是人类食物中供給能量的主要来源。它在人类膳食中約占60—70%，一个成年人每日約需醣400—500克(蛋白質70—80克，脂肪更少些)。一般草食动物每日所需的醣更多。由于魚类、肉类等动物性食物中醣量甚少，我們必須自植物性食物中取得大部分的醣。尤以富于淀粉的大米、小麦、大麦、小米、玉米、高粱等谷类和紅薯、馬鈴薯等根莖类食物，为人类所需醣的主要来源。植物纖維素不能为人的消化液所分解，因此，它不能算作人类食物中的供能成分。

从生理角度来看，葡萄糖是机体内最重要的单糖，肝脏和肌肉中的糖元也很重要，葡萄糖和糖元的氧化是供給机体所需能量的主要来源。

下面敘述进入体内后糖的代謝过程：

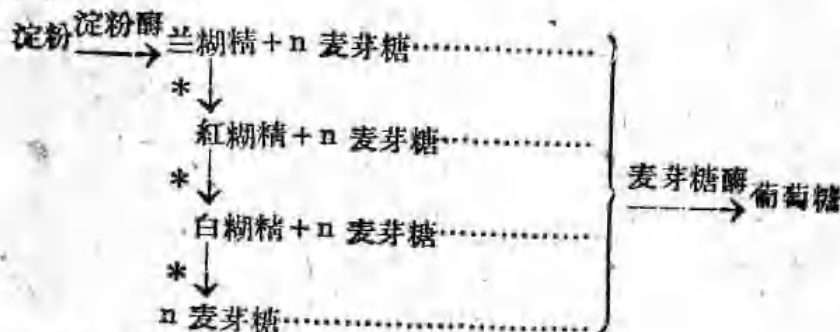
一、醣的消化和吸收

食物的消化和吸收都是在高级神經活动的支配之下进行的，其中最明显的如消化腺的分泌机能，消化液的性质和酶的活性等，都将依当时的情绪，食物的性质(特别是它的色香味)的差别而有所不同。例如糖的甜味就能引起富于淀粉酶的唾液的分泌，但只要当人们想到吃糖时，也会分泌唾液，所谓“望梅止渴”，虽没有从根本上解决问题，确也能引起一时唾液的分泌。高级神經活动对食物消化和吸收的支配作用，于此可见一般。

(一)醣的消化：只有简单的易溶于水的单糖才能被小腸所吸收，糖虽也极易溶于水，但必須經過水解变成单糖后，才被吸收。至于淀粉、糖元等多醣类更是如此。若从靜脈注射任何一种二糖，都不被机体利用，將仍旧不变的从尿中排出体外。可见二糖与多糖皆必須經過消化变成单糖，然后才能由小腸吸收进入体内。

(一)醣在口腔内的变化

多醣在口腔内遇到唾液(腮腺、颌下腺和舌下腺所分泌)中的淀粉酶，即可被分解成糊精与麦芽糖。唾液中也极少量的麦芽糖酶，能进一步水解麦芽糖生成葡萄糖，这种变化可以下图表示：



[注]*代表淀粉酶

自然界有 α 、 β 两种不同的淀粉酶。 α -型的可称为“内断酶”，能分裂一个淀粉分子成几个糊精。 β -淀粉酶则可称为“端解酶”，能使枝端的氧苷分解，产生许多麦芽糖分子。动物组织中的淀粉酶是 α -淀粉酶。唾液淀粉酶的最适宜 P^H 约为6.8。它的优良的激动剂是 Cl^- 离子。不过生食品中的淀粉，几乎不受此酶的作用。如果长久咀嚼煮熟的富于淀粉的食物，会感到甜味，这就是淀粉变成糖的结果。

(二) 糖在胃肠道中的消化

唾液和食物迅速自口腔进入胃中，由于胃液具有强烈的酸性反应($P^H=1.5-2.5$)，使进入胃中的淀粉酶的作用中止。不过胃液从食团外部逐渐浸入内部，故在一定时间内，胃中多醣仍继续分解，成为糊精与麦芽糖。

当然多醣消化的最重要阶段是在十二指肠内，受胰液淀粉酶的作用而分解。从胃中进来的盐酸，被胰液和肠液中的重碳酸盐所中和，造成适合于淀粉酶分解多醣的酸硷度。

此外，肠液也参加糖的消化。肠液中含有淀粉酶、麦芽糖酶、蔗糖酶、乳糖酶等。它们分别水解各种相对应的二醣类，依次产生各种不同的单糖(主要是葡萄糖、果糖、半乳糖等)再被吸收。

在消化过程中，各种消化液的分泌不是独立自主，而是完全受中枢神经系统控制的。

(三) 糖的吸收

各种单糖的吸收速度不同：其中以半乳糖为最快(110)，葡萄糖次之(100)*，果糖又次之(48)，戊糖最小(阿拉伯糖为9)。可见糖要吸收过程，并非一种单纯的渗透现象。吸收速度的大小，很可能与不同糖类在肠膜上磷酸化过程速度有关。

在吸收过程中有部分果糖或半乳糖变成了d-葡萄糖。但这并非是说它们必须先变成葡萄糖而后才能被吸收。

[注]*以葡萄糖为标准，假定其吸收率为100。

二、糖的中間代謝

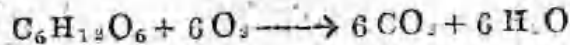
(一) 糖的中間代謝的概念

单糖被吸收后，在机体内缩合成为糖元或分解放出能量，产生 CO_2 和水，或形成其他物质再氧化成 CO_2 等废物排出体外。从吸收到排泄其间所进行的一切变化统称之为糖的中間代謝。它是有机物质代謝中一个环节，与整个机体生理机能相适应的；糖的分解代謝是人体能量主要来源。祖国医学认为糖是“温性”，能补虚弱，或与此亦有关系。一个普通劳动力每日约需能2500—3000仟卡。其中大部分(70—80%)是由糖供给的。足见人体内糖代謝数量最大，供能的意义非常重要。

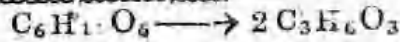
各种单糖被吸收后进入肝脏，或已变成葡萄糖，或进入肝中后转化。故葡萄糖成为血液中唯一重要的单糖。血中葡萄糖能在肝中变为肝糖元，也能在肌肉或其他组织中变成糖元(如肌糖元)，作为糖储存的一种重要形式。

葡萄糖或糖元在体内皆能通过两种不同方式氧化产生能量。

(一) 在有充分氧气供给的情况下；通过有氧氧化产生 CO_2 与 H_2O ，放出巨大能量，可以下式表示($C_6H_{12}O_6$ 代表一个葡萄糖分子或相当于糖元分子的一部分)：

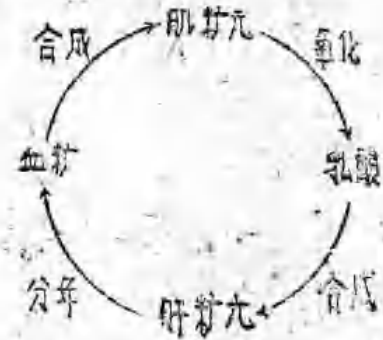


(二) 同时早已发现,当肌肉在氧供给不足的情况下进行活动时,糖的消耗引起乳酸的积存,称为糖的无氧氧化(酵解作用)。可以下式表示之:

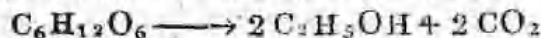


葡萄糖 乳酸

当然,无氧氧化过程中所产生的能量,必将少于有氧氧化过程。但这一种氧化方式,在人类与动物的生命活动中,也起着非常重要的作用。因为它能证明机体在氧供给不足的环境下产生能量,完成各种生理机能。而糖的无氧分解中所产生的乳酸,又可以在有氧供给时继续氧化,放出更多的能量;或在肝脏中合成肝糖元,这一系列变化形成一个循环。



还远在四千余年以前,我们的祖先就早已知道运用生醇发酵的过程制出酒来。但对这一过程实验性研究,仅在190余年前才开始。开始时,曾确定用复杂的多糖(淀粉)作原料,发酵时先分解淀粉成葡萄糖。然后葡萄糖受酵母中酶的作用,产生乙醇,放出CO₂。可以下式表示之:



后来又知道还有许多不同的酵母或细菌,能使糖类发生不同类型的发酵过程,产生各种有机化合物(丙酮、丁醇、乳酸等)。其中特别是乳酸发酵过程,其化学变化与人类及动物体内糖酵解产生乳酸的过程极为相似。近数十年来,这一方面的研究进展很快。现在对人体内糖的氧化过程,几乎已经全部明白了,这将在本章讨论。

(二) 血糖的水平

在中枢神经活动的支配下,通过神经体液调节机制,适应人体生理机能的需要,血糖水平间有起伏。但正常人的血糖经常保持在80—120毫克%的水平上,正当糖吸收的时候,血糖上升很快。但高血糖通过反射性机制立即引起胰岛素的分泌,促进糖元的合成,与糖的氧化等反应,使血糖下降。迅速趋于正常水平。在这个时候若由于吸收速度太快,或其他原因,使血糖水平超过170—180毫克%时,则将有一部分血糖从尿中排出体外,称为饮食性糖尿。而170毫克%这个数值,即称为肾阈值。自然各个人的肾阈值不相同。有的病人肾阈值甚至低于80毫克%,因而虽在平时,他的尿中也常有葡萄糖出现,称为肾性糖尿病。这种病人的特征是其血糖并不高(甚至低于正常),而尿中有糖出现。我们祖先说“消渴症”中有由于“肾虚而引起的”,当与此症有关。若血糖过低时,低血糖流经间脑糖中枢,引起兴奋,通过大脑皮质冲动反射到肾上腺及肝脏,导致肝糖元分解,使血糖升高迅速达到正常水平。这种调节机制将在本章末详细讨论。

(三) 肝糖元的合成和分解

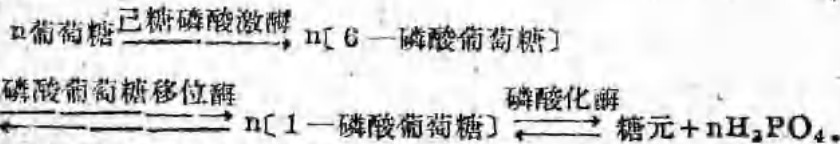
用倫敦氏血管造口法,检查动物门静脉与肝静脉的血糖含量。若比较其在空腹时与正在饭后吸收时的数值(见表),即会立即发现吸收时血糖原来很高,血液流经肝脏后,血糖却变低了。说明肝能自血中抽出部分血糖贮存于肝内。许多实验证明,血糖在肝内变成了糖元微

粒，在肝細胞內，还可以用显微镜观察。这种现象称为糖元合成作用。反之，在空腹时血液流经肝脏，血糖由低变高，说明肝糖元分解放出血糖，称为肝糖元分解作用。肝糖元合成与其分解是互相矛盾的对立面；通过这一矛盾的统一，使体内血糖能保持一定水平。

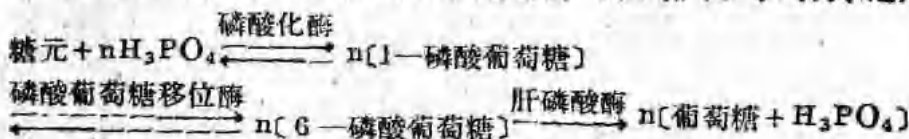
門靜脈，肝靜脈，血糖含量比較表

	門 靜 脈	肝 靜 脈	变 異
空 腹 时	70毫克%	108毫克%	+29毫克%
吸 收 时	235毫克%	194毫克%	-41毫克%

虽然人类与动物都能利用非糖物质合成糖元（称为糖元的異生作用），但毕竟单糖是糖元合成的主要原料。若人类食物中较长时富于糖类，则肝糖元可达150克左右。在糖元合成过程中，葡萄糖首先经过磷酸化变成6-磷酸葡萄糖，許多磷酸葡萄糖分子再縮合成糖元，可以下式表示之：

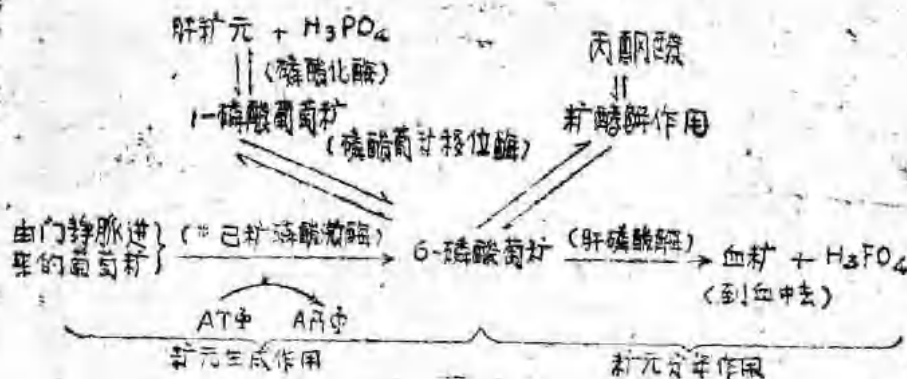


糖元分解作用并非完全是糖元合成的逆过程。其步骤可以下式表示之：



由此可见，除最后一步与糖元合成根本不同外，糖元分解的各步骤及有关酶系基本上与合成作用相同，在糖元分解的最后一步中，肝磷酸酶所促进的脱磷酸反应，是一个不可逆的过程。而且只有肝中有此磷酸酶。肌糖元与肝糖元本来没有很大的区别，只因肌肉中没有磷酸酶，肌糖元不能成为血糖的来源，这点十分重要。

肝糖元的合成与分解既是矛盾的对立面，究竟什么时候糖元合成占优势，什么时候分解占优势呢？这完全是与当时机体的生理情况相适应的，实际上它们两者之间经常保持着动态平衡（见图）。



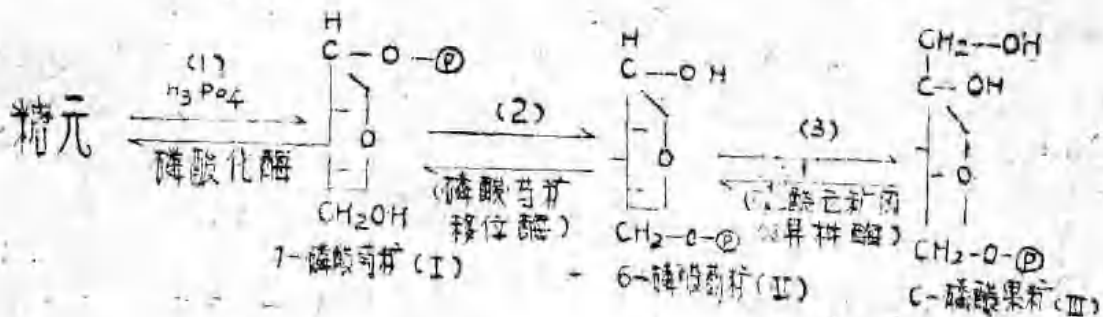
而这种平衡又是通过中枢神经系统来控制的。例如肌肉活动的时候，肌糖元分解产生能量，血糖随着肌肉合成肌糖元，因而血糖下降。此时肝糖元即依照上图所示分解途径产生血糖以补充之。在另一种情况中，例如饭后2—3小时后血糖很高，在肝脏中就不断地有大量肝糖元的合成，使血糖逐渐下降恢复正常。由此可见肝糖元的合成及分解与当时血糖水平的高低有着直接的关系。或者说通过这个可逆过程，机体在中枢神经的主导作用下，适应当时生理情况，控制了血糖的水平。

(四)糖的分解代谢

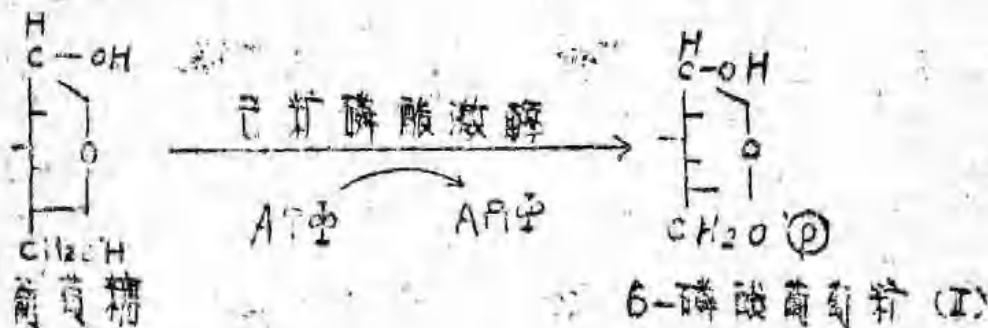
(一)糖的无氧分解——糖酵解作用：人类机体中主要由糖氧化过程以供给能量，例如：肌肉利用肌糖元，脑组织利用血糖作为能量的主要来源。许多实验证明，在氧供给不足的情况下，肌肉组织激烈运动时，常产生大量的乳酸，称为糖元的酵解作用。其变化步骤与生酵发酵过程基本相同，因不需要氧的参加，故又可称为糖的无氧氧化。

糖的酵解过程虽十分复杂，但现在已完全明白，我们在下面将列举这个过程的许多步骤。

如果酵解作用从糖元开始，首先受磷酸化酶的作用，糖元经过磷酸解变成1-磷酸葡萄糖(I)，后者由葡萄糖磷酸移位酶催化，又转变成6-磷酸葡萄糖(II)，然后，磷酸己糖同分异构酶促使它(II)继续变成6-磷酸果糖(III)。

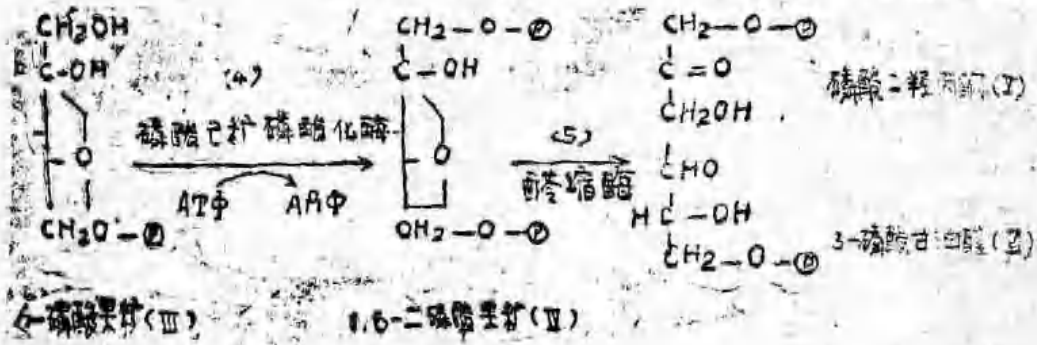


若酵解作用是从葡萄糖开始的，则葡萄糖在磷酸己糖激酶的影响下，与 ATP 作用变成 6-磷酸葡萄糖(II)。

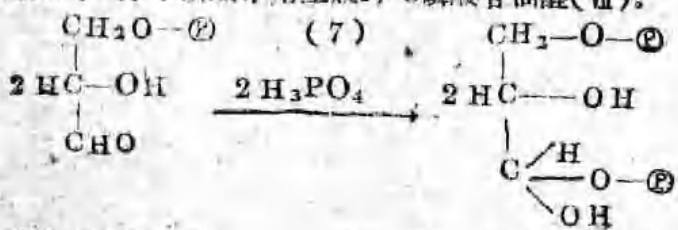


然后，6-磷酸葡萄糖也同样变成6-磷酸果糖(III)，继续向前变化。6-磷酸果糖在磷酸己糖磷酸化酶影响下，与 ATP 作用生成1,6二磷酸果糖(IV)，它是俄国学者伊万诺夫首先发现的。英国科学界却无耻地称为哈登杨格氏酯。这也充分暴露资产阶级学者们，盗名

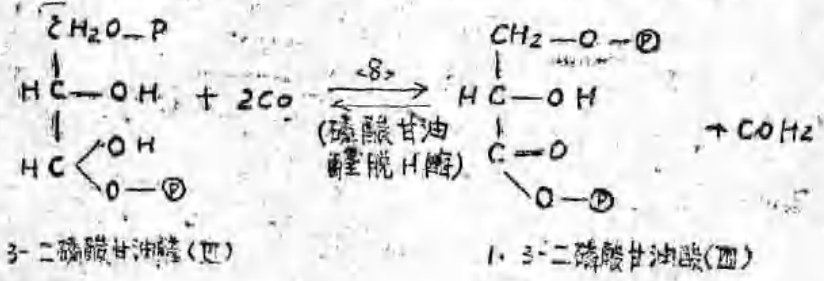
葡萄糖所不至。这个高度磷酸化的糖醇受醛缩酶的作用，起了十分剧烈的变化，分子发生分裂，产生磷酸二羟丙酮 (V)，和 3-磷酸甘油醛 (VI) 两种磷酸丙糖。它们之间又可以互相转化，故将这一个分子的 1,6-二磷酸果糖，分裂产生二个分子的 3-磷酸甘油醛。



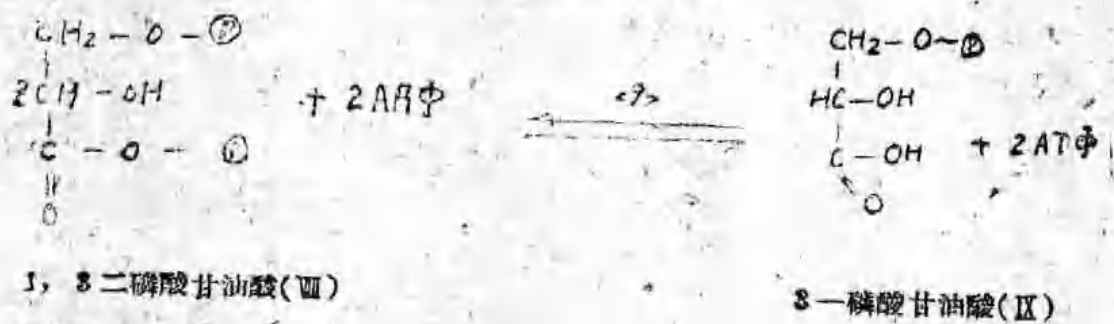
定 (VI) 又与一分子磷酸作用生成 1,3-二磷酸甘油醛 (VII)。



这时重要的产生能量的氧化作用开始了。这个高度磷酸化了的甘油醛，在磷酸甘油醛脱氢酶的影响下，有 C_0 存在的条件下，脱去了氢而成为 1,3-二磷酸甘油酸 (VIII)。

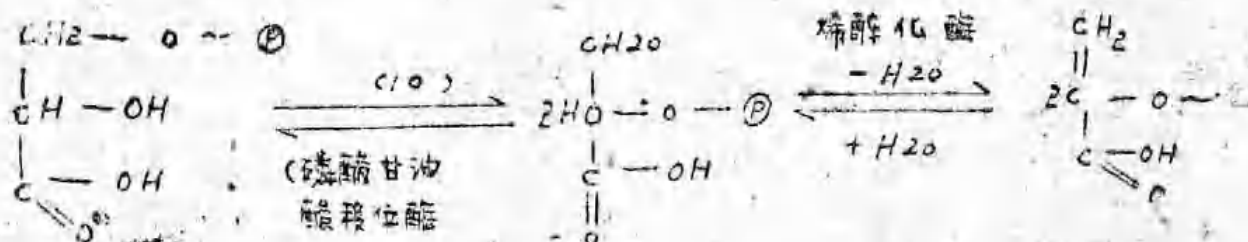


这时氧化所产生的能量，并未释放出来，而是蕴藏在其 (IX) 分子中高能磷酸键内。必须时此能量又可以高能磷酸键的形式，由一个化合物转移到另一个化合物。正如 1,3-二磷酸甘油酸，能与 ΔP 作用生成 ATP 及 3-磷酸甘油酸 (X) 一样。



这时氧化所产生的能量，就不至于散失，而且最后可以转移到ATP分子上。ATP是能量转移、能量供应和暂时储存的一种最好形式。

3-磷酸甘油酸又经过一系列的变化转化成为烯醇式磷酸丙酮酸(II)。

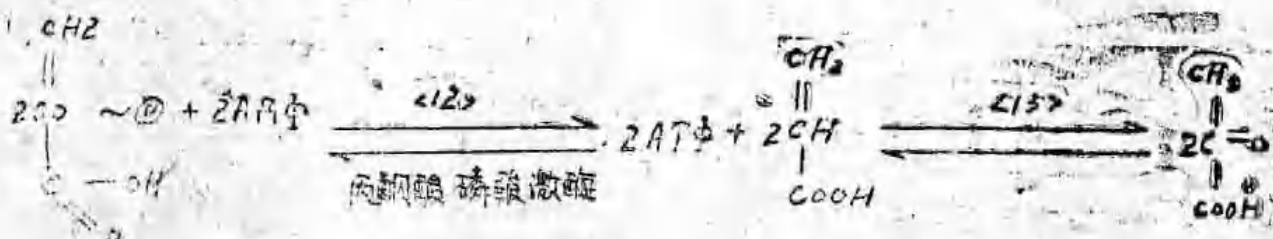


3-磷酸甘油酸(X)

2-磷酸甘油酸(X)

烯醇式磷酸丙酮酸(II)

它(II)是一个具有高能磷酸键的化合物，这里没有氧化过程，在分子结构重新排列的时候，有一部分蕴藏的化学能被“动员”，并集中到烯醇式磷酸酯键上来，形成一个新的高能磷酸键。最后也会转移给ATP。



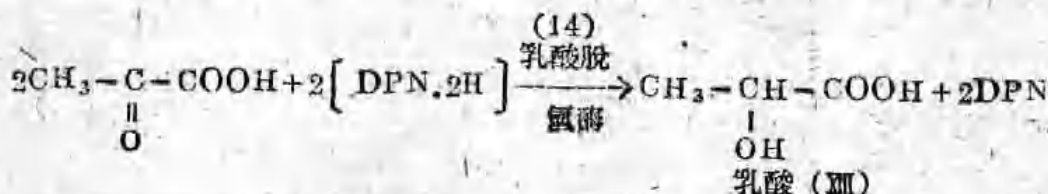
烯醇式磷酸丙酮酸(II)

烯醇式丙酮酸(IIIa)

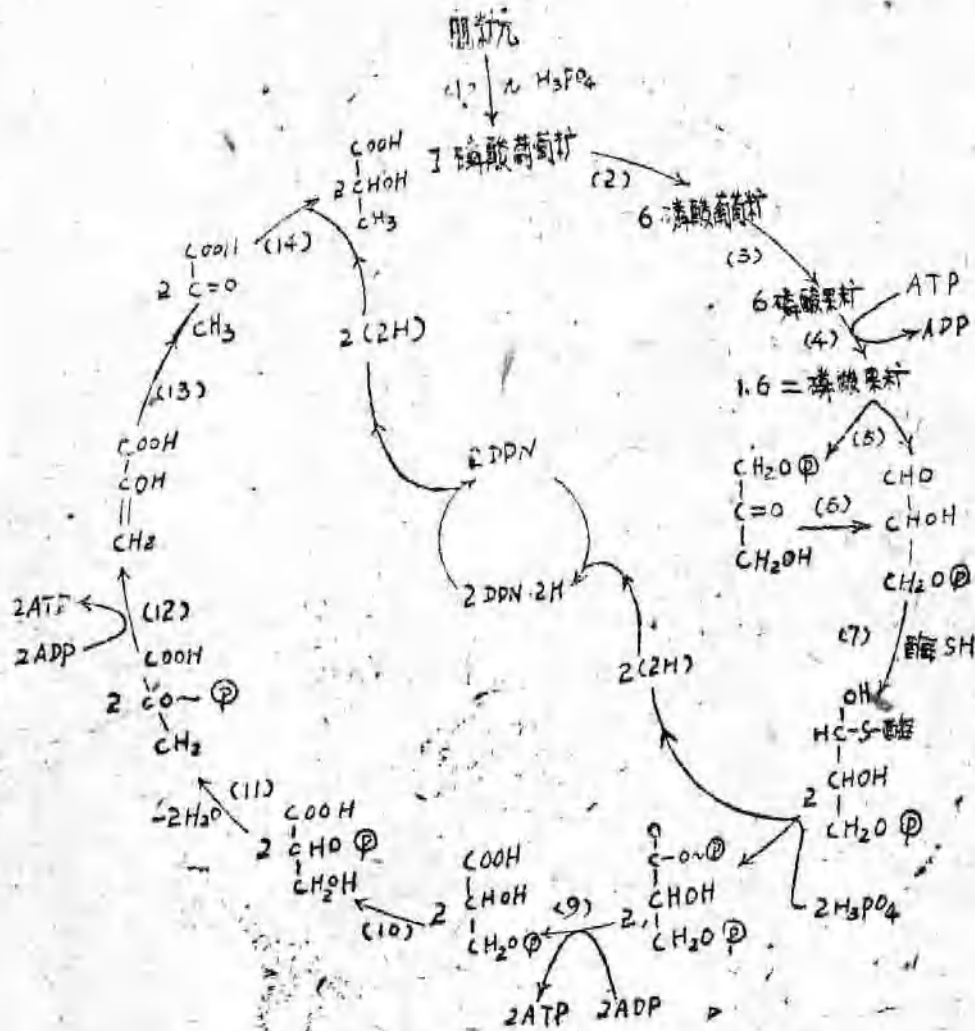
丙酮酸(IIIb)

烯醇式丙酮酸(IIIa)，则自发地迅速变成丙酮酸(IIIb)。

丙酮酸是糖代谢的一个非常重要的中间产物，在不同的生理条件下，能变成各种不同的化合物。当机体氧的供给充足时，它就继续被氧化成为CO₂和H₂O，这个过程称为糖的有氧氧化（下面会另外讨论）。若机体氧的供给不足，则1,3-二磷酸甘油醛氧化时（反应8）所脱下的氢，不能氧化成水，而将由辅酶I带给丙酮酸，使后者还原成为乳酸(III)。



乳酸是酵解作用的最終产物。从糖的磷酸化开始到乳酸为止，共14个步骤，统称为糖的酵解作用，可以一个环状图表示之：



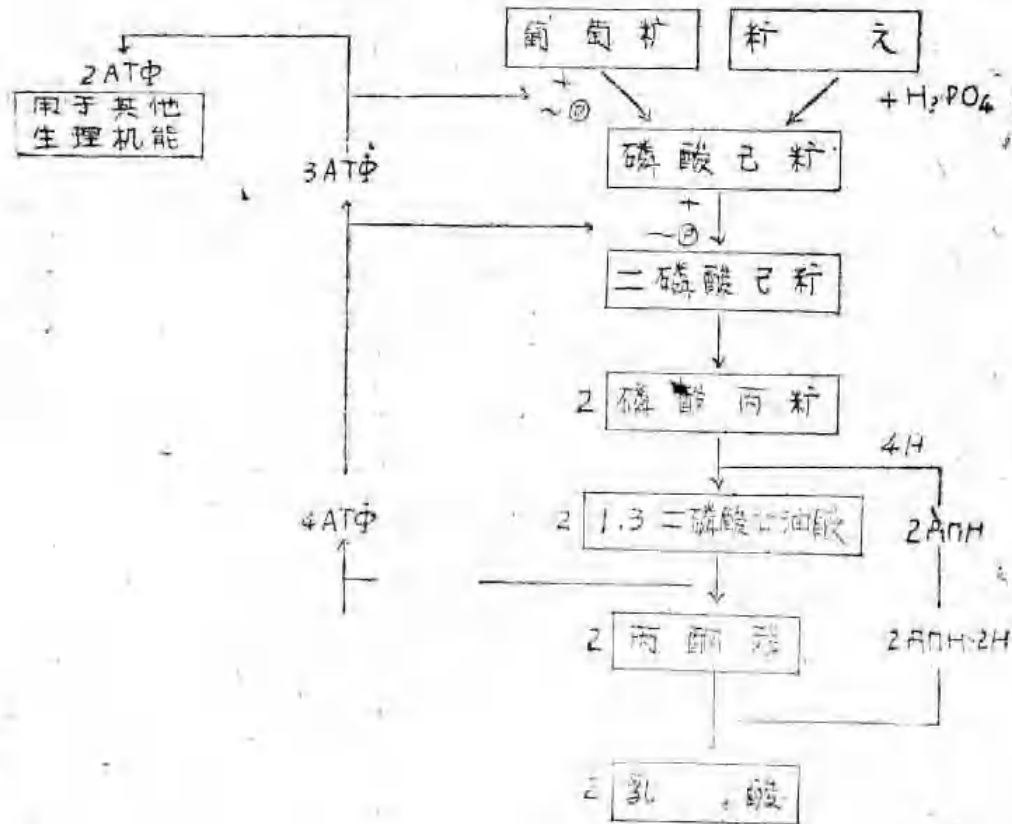
肌糖元的酵解作用
 图中Ⓞ代表 $-PO_3H_2$
 括弧中的数字代表课文中所列反应步骤的次序

从这个图上我们不难看出：酵解作用的开始四个步骤，不过是逐渐磷酸化过程。到了第（5）反应，分子分裂是一个飞跃的质变。此后第（8）反应非常重要，因为它是酵解过程产生能量的氧化步骤。无氧而能氧化的秘密，正由于反应（8）中脱下氢，在反应（14）中为丙酮酸所接受，使整个氧化过程能顺利完成。从这两个反应中，我们也可看出氧化还原是一个矛盾的对立面。第（8）氧化反应正是依靠有第（14）还原反应来完成的，一个地方有氧化，另一个地方就一定有还原，这就是矛盾的统一。反应（11）虽然不是氧化作用，但供给了能量，因而也很重要。

酵解作用的生理意义，首先在于它是在无氧条件下，机体获得能量的主要方式。肌肉运动时，部分肌糖元酵解产生许多分子的磷酸葡萄糖（为了方便起见，上述环形图只写出一个分子式为代表）。它们继续分解变成乳酸。相当于一克分子的磷酸己糖，经过变化生成二克

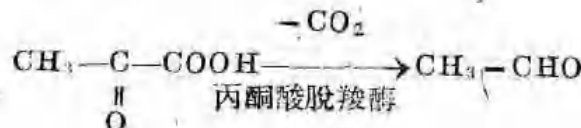
分子乳酸，共产生四克分子ATP，消耗一克分子ATP。故实际对机体提供了相当于合成三克分子ATP所需的能量，（由每一个克分子ATP合成一克分子ATP时，消耗约12仟卡，相当于一个高能磷酸键），约共36仟卡。据估计这一串反应产生能57仟卡。可见还有21仟卡（57-36=21）已变成热能散失了。亦即说明酵解过程中产生的能量，只有60%被利用以完成不同生理机能。这种能量供给的关系，可以简图表之：

酵解作用中能量转变图



自图中可进一步看出，酵解若自葡萄糖开始则多消耗了一个克分子的ATP，肌肉在缺氧条件下收缩所产生的乳酸，当氧的供给充足时，即有1/4被氧化成CO₂和H₂O放出很多能量，足以供给其余的3/4的乳酸，经过酵解过程再合成肝糖元。（高等动物肌肉中无此过程，故只能在肝中合成糖元。）

生醇发酵是制造酒精作为液体燃料和有机溶剂的重要化学工业。其化学过程为酵母中酵使葡萄糖先变成丙酮酸，所有步骤完全与肌肉酵解作用相同。不过在酵母细胞中，丙酮酸受一种脱羧酶的影响，首先脱去羧基变成乙醛。然后乙醛接受辅酶I带来的氢（从反应8来）形成乙醇。

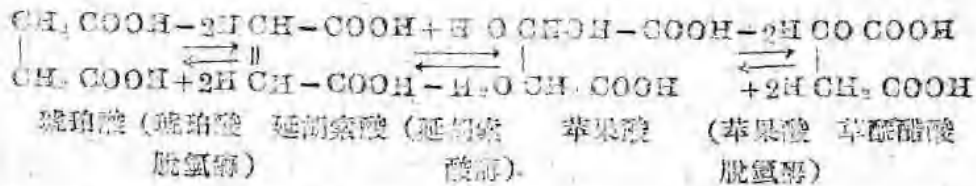




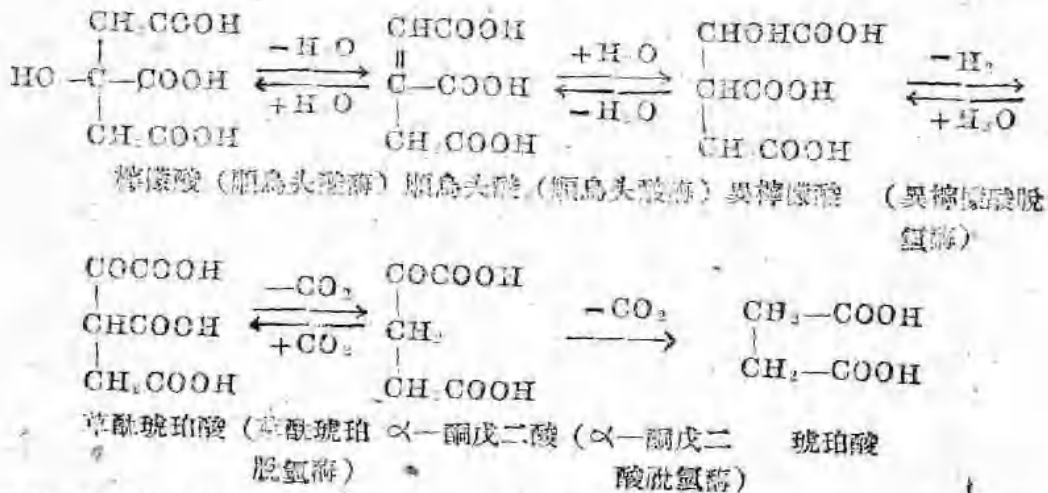
在发酵工业中，我们可以利用各种酵母或细菌所引起的不同发酵作用，获得许多种有机化学工业上的重要原料，因此发酵工业已成为当前化学工业中非常重要的部门。

(二) 糖的有氧氧化：糖代谢从磷酸化开始直到丙酮酸的形成，共13个步骤，不论是在有氧或无氧的条件下，这些步骤都完全相同。这两种氧化过程在丙酮酸以后的步骤里，才开始分歧。上面已经说过，无氧时丙酮酸还原变成乳酸，称为酵解。若是有氧的供给，则上述第(8)反应脱下的氢，通过辅酶I传给黄酶细胞色素，最后与氧结合成水。没有这个氢，丙酮酸就不能变成乳酸，而是进一步氧化成CO₂和H₂O，称为糖的有氧氧化。究竟丙酮酸如何变成CO₂和水的呢？下面讨论这个问题。

首先是有人发现糖在动物组织中氧化时，与几个四碳二羧酸（琥珀酸，延胡索酸，苹果酸，草酰醋酸）有密切关系。后来逐渐发现了这些二羧酸之间，也有着如下的相互关系：



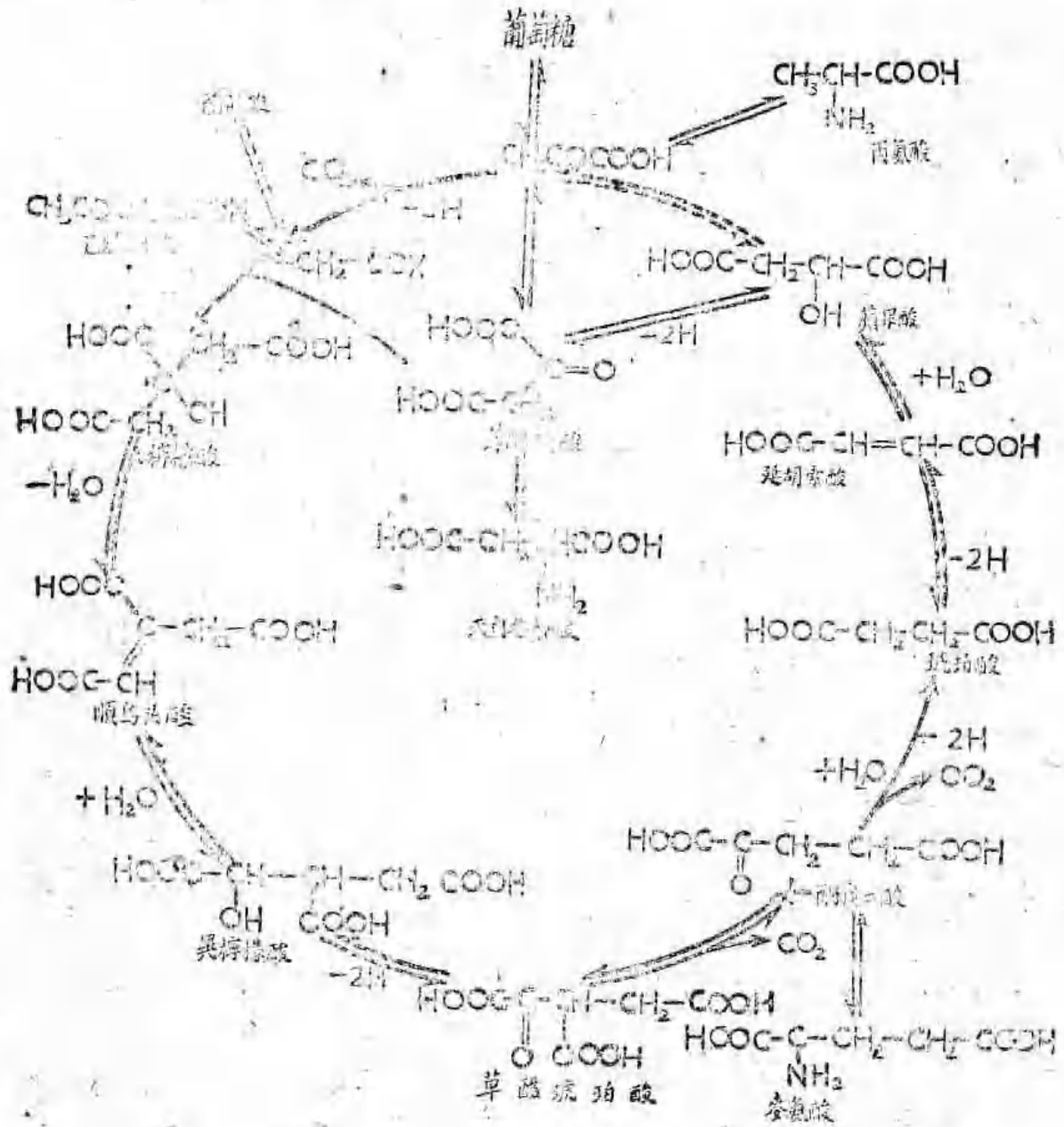
不久以后另有一些人发现丙酮酸在体内氧化时与柠檬酸，α-酮戊二酸等有关，因而这些酸与上述四碳二羧酸之间也有紧密的关系如：



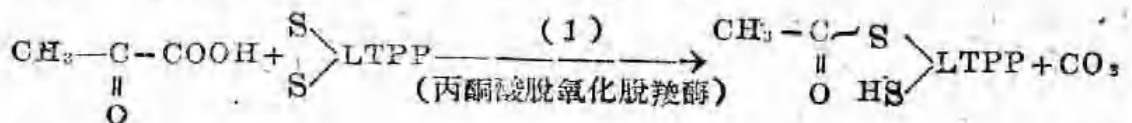
上面提到的二羧酸和三羧酸与丙酮酸的氧化问题如何联系？丙酮酸如何能转化成柠檬酸呢？近年来已经找到了答案。原来丙酮酸经过氧化脱羧以后，就与草酰醋酸相结合成柠檬酸。它然后循着上述途径变成琥珀酸。琥珀酸又经一系列反应，仍旧变成草酰醋酸。周而复始，可成一个循环。称为“三羧循环”。它是丙酮酸氧化的主要途径。可以环状的图表示之：

三羧循环图

CH₂COOH + ...



丙酮酸氧化脱羧后，与草酰乙酸缩合成柠檬酸，是一个非常复杂的过程。不论是在生理上或临床上，这一过程都很重要，兹将方程式表示如下：

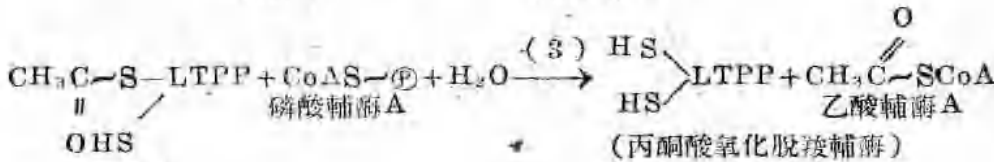
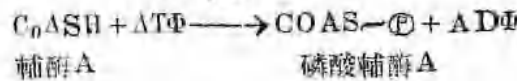


丙酮酸

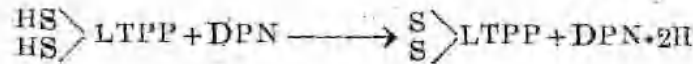
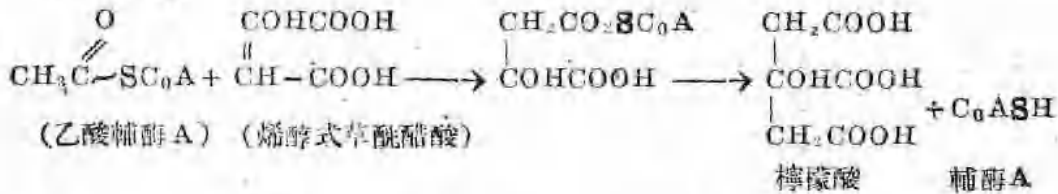
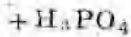
(丙酮酸氧化脱羧辅酶)

复合物

(2)



复合物



維生素中已經講过： $\begin{matrix} S \\ S \end{matrix} \text{LTPP}$ 是維生素B₁焦磷酸脂与硫辛酸結合而成的，称为丙

酮酸氧化脱羧辅酶。人类若缺乏維生素B₁，则影响組織内这个辅酶的含量，因而丙酮酸不易氧化。故脚气病人血中乳酸和丙酮酸含量特别高，可作为诊断脚气病的一种根据。烟酰胺 (DPN) 与泛酸 (C₀ASH) 也参加这一过程，可見許多維生素与糖代谢有紧密的关系。

三羧循环的特点及其生理意义：

三羧循环不仅是丙酮酸氧化的途径，也是所有存在于这环上一切化合物（包括与这些化合物有关联的物质在内）的氧化途径。这个环形链状反应的特点，是在正常情况下，环上的所有化合物都能沿着环依次变化。因此任何时候，它們都将以完全相同的克分子浓度存在，即环上某一物质的浓度增加或减少，一定引起其他物质同样的增加或减少。故当体内丙酮酸完全被氧化时，循环即告熄灭。而且应易看出，当前面一个新化合物的出现（如順烏头酸）就意味着后面一个化合物的消失（如檸檬酸）。平时环的存在，是因为后面不断有新的物质参加反应。正象长江的水虽不断流向东海，但任何时候所见到的水，已经不是前一刹那所见到的了。正说明环的存在是物质运动的形式。若这种运动停止，则环就不存在了。

上面提到每一个克分子葡萄糖完全氧化成CO₂和H₂O时，估計应产生能量686仟卡。无氧分解中放出的能量（57仟卡）相当于此数的8.3%。糖既是人体能量的主要来源，可見三羧循环在供給能量上有非常重大的意义。据估計一克分子葡萄糖完全氧化，生成CO₂和H₂O，可产生38个高能磷酸键，相当于456仟卡，約为总能量（686仟卡）的64%。其余36%成为热能散失，維持了体温。

从三羧循环的图上不难看出：脂肪代谢产生的乙酰辅酶A，各种氨基酸代谢产生的酮酸，也都通过此环氧化产生CO₂和H₂O，放出能量。說明糖、脂肪、蛋白质代谢的最后阶段都要通过三羧循环。它是各种物质代谢最后阶段的共同途径，也是产生能量的主要枢纽，生成CO₂的最主要机构。而且通过循环也将三种物质代谢紧密地联系在一起。

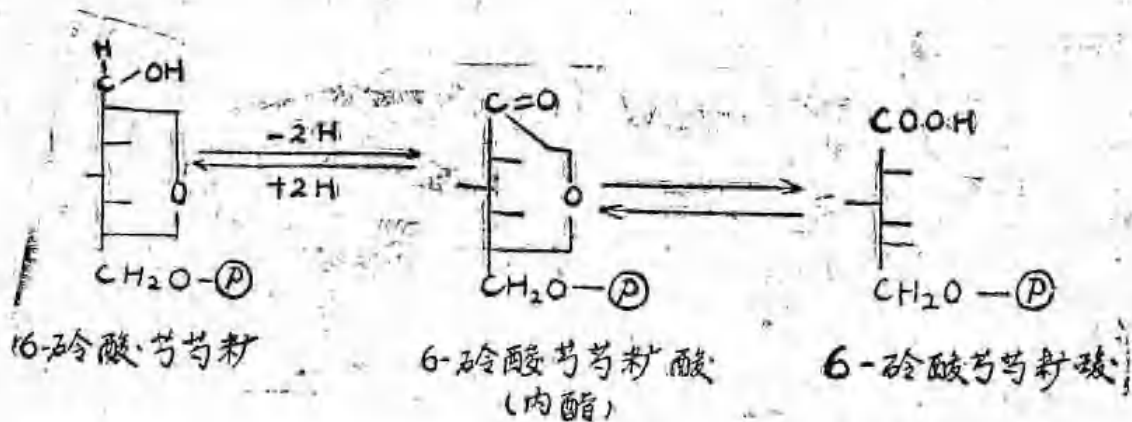
有氧氧化中每克分子己糖所生高能磷酸鍵的統計

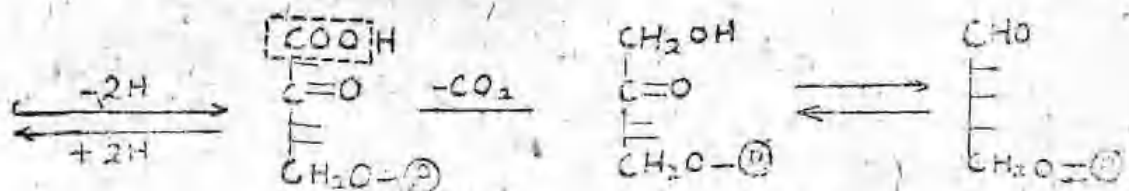
作用步驟	高能磷酸鍵的消耗与生成				統計
	消耗	生成		氧化	
		非氧化	不需氧		
己糖磷酸化	-1				-1
磷酸己糖磷酸化	-1				-1
磷酸甘油醛 → 磷酸甘油酸			1 × 2	3 × 2	+8
磷酸甘油酸烯醇化		1 × 2			+2
丙酮酸 → 乙酰輔酶A			1 × 2	3 × 2	+8
乙酰輔酶A → 檸檬酸	-1 × 2				-2
異檸檬酸 → 草酰琥珀酸				3 × 2	+6
α-酮戊二酸 → 琥珀酰輔酶A			1 × 2	3 × 2	+8
琥珀酸 → 延胡索酸				2 × 2	+4
蘋果酸 → 草酰醋酸				3 × 2	+6
共 計					38

注：每一对氢原子，傳遞于氧时产生3个高能磷酸鍵就有琥珀酸氧化成延胡索酸时，α-H不經過DPN而直接傳至FAD故少生一个~②。

(三) 新发现的醣代謝途徑：

早已經知道动植物和微生物除了上述醣酵解和三羧循环这一醣代謝的主要方式而外，还有其他代謝途徑：只不过其詳細步驟最近才逐渐明白。运用同位素追踪方法，使葡萄糖整个分子都帶上放射性碳原子，发现哺乳动物某些組織（乳腺、睪丸），或大腸杆菌，枯草杆菌等，能使6-磷酸葡萄糖，脱氢变成6-磷酸葡萄糖酸。催化此反应的酶，称为6-磷酸葡萄糖脱氢酶。然后6-磷酸葡萄糖酸，又借另一种特殊脱氢酶作用，变为3-酮6-磷酸葡萄糖酸。最后脱羧变成5-磷酸核糖，它与5-磷酸核糖保持平衡。





3-酮-6-磷酸葡萄糖酸 5-磷酸核酮酸 5-磷酸核糖

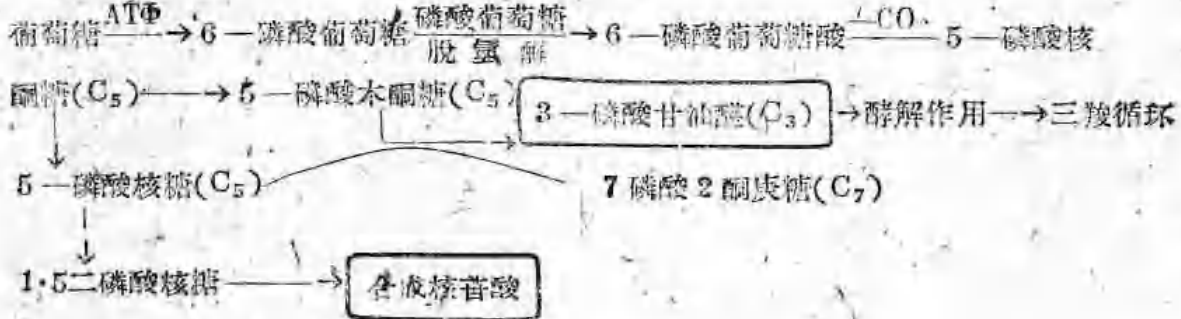
这一反应不仅是动物机体制造核糖的途径，而且在酵解作用发生障碍时（如用药物抑制某一步骤），它也可能是糖代谢供给能量的另一方式。若用同位素追踪方法来测定磷酸戊糖分路在动物组织代谢中的意义时发现肌肉组织中几乎全部糖都是通过酵解和三羧循环的途径氧化的。肝脏中90%以上的糖也如此。但是在有些动物组织中如乳腺，白血球和肾上腺皮质中，磷酸戊糖分路有着比较重要的意义。植物组织中特别是叶片中这一分路十分重要。苏联学者恩格哈特认为，葡萄糖究竟是经什么途径氧化还取决于磷酸己糖阶段，如进一步磷酸化成为1,6-二磷酸果糖，则必走酵解的道路，否则就走磷酸戊糖分路。

在不同植物和微生物体内糖代谢途径很多，不能一一尽举，即在动物组织中也有其他途径。例如，许多动物能利用血糖作原料制造维生素C。

（四）糖代谢几种途径的联系：上述酵解作用，三羧循环和磷酸戊糖分路几种途径间有密切关系。三羧循环是糖酵解作用的继续，在有氧供给时丙酮酸直接氧化脱羧进入循环，无氧酵解产生的乳酸，也将在有氧供给时经乳酸脱氢酶的作用，先氧化成丙酮酸，再进入三羧循环。而且这两个过程构成平时动物体内糖代谢的最主要的途径。前面的酵解过程就是后面三羧循环的基础，后面是前面的继续。

磷酸戊糖分路，则从6-磷酸葡萄糖起与酵解作用分歧先变成葡萄糖酸及磷酸戊糖，然后戊糖分解也产生3-磷酸甘油醛，后者的氧化基本上与糖在酵解中的过程完全相同。

如图：



三、糖代谢的调节

前面已经说过虽然人们在饱食后不久血糖逐渐升高，而饥饿时血糖又有下降的趋势，但一般来说，正常的血糖水平80—120毫克%是保持得很稳定的。这里肝脏起着直接作用，如果切除肝脏，就会产生严重的血糖降低，神经机能失常的情况。不过肝脏这种调节作用不是独立自主而是在中枢神经系统的严格控制下发挥作用的。神经能直接影响血糖水平也能通过内分泌腺所产生的激素来起调节作用，前者称为神经调节，后者称为神经体液调节。

当人类由于情感激动而引起大脑中枢兴奋时，血糖浓度迅速增高，甚至出现情感性糖尿。说明中枢神经系统在糖代谢中的主导作用。如用动物作实验，以针刺刺激延脑第四脑室底部，