

# 第五章 糖代谢



糖的概述



糖的分解代谢



糖原的合成与分解



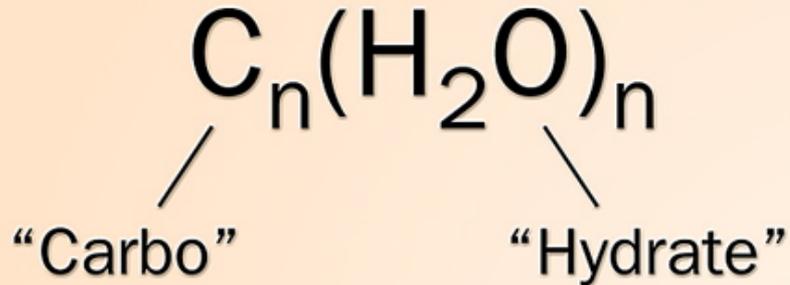
血糖水平的调节

# 第一节 糖的概述

## 一、糖的概念

**糖(carbohydrates)**即碳水化合物，其化学本质为多羟醛或多羟酮类及其衍生物或多聚物。

Monosaccharides all  
have a formula of:



## 二、糖的分类及其结构

根据其**水解产物**的情况，糖主要可分为以下四大类。

**单糖** (monosacchr~~ide~~)

**寡糖** (oligosacchr~~ide~~)

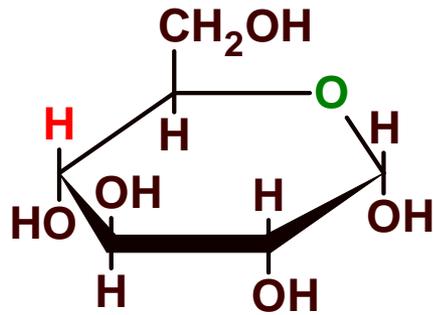
**多糖** (polysacchr~~ide~~)

**结合糖** (glycoconjugate)

# 1. 单糖 不能再水解的糖。

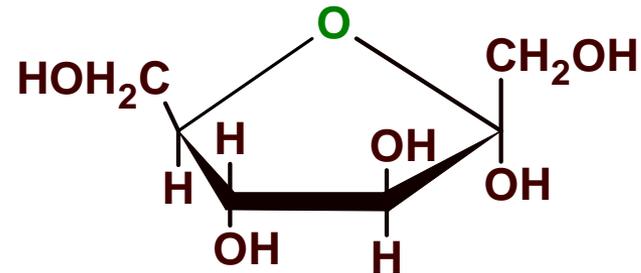
## 葡萄糖(glucose)

——已醛糖



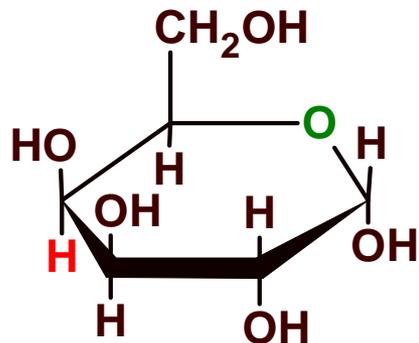
## 果糖(fructose)

——已酮糖



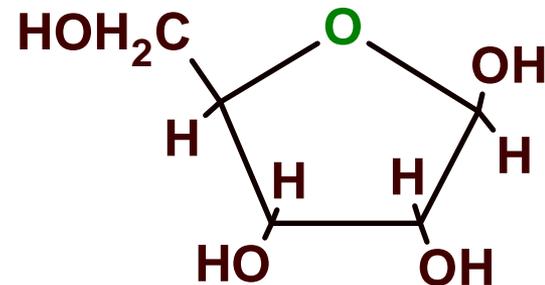
## 半乳糖(galactose)

——已醛糖



## 核糖(ribose)

——戊醛糖



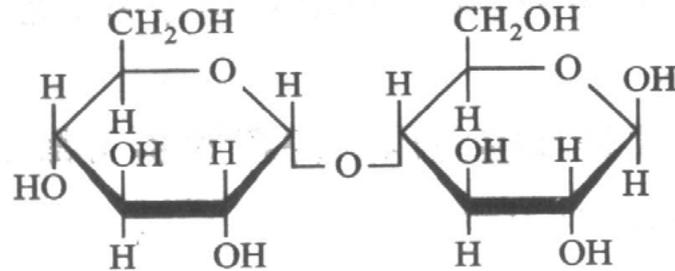
## 2. 寡糖

能水解生成几分子单糖的糖，各单糖之间借脱水缩合的**糖苷键**相连。

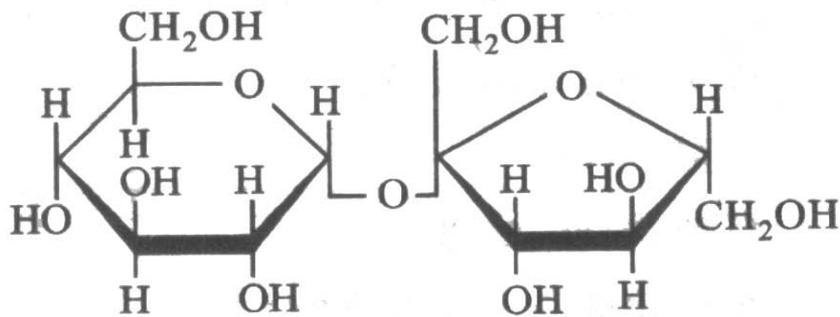
常见的几种二糖有

}	<b>麦芽糖 (maltose)</b>	葡萄糖	葡萄糖
	<b>蔗糖 (sucrose)</b>	葡萄糖	果糖
	<b>乳糖 (lactose)</b>	葡萄糖	半乳糖

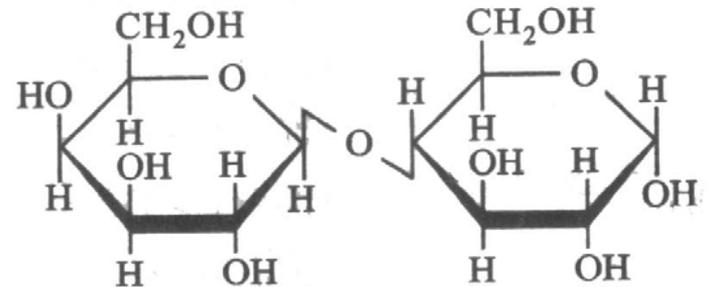
# 重要的二糖



D-麦芽糖



蔗糖



乳糖

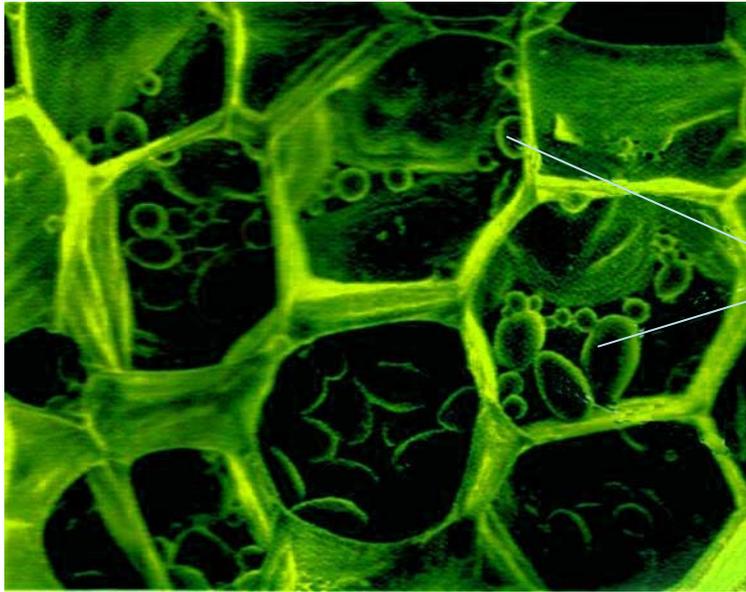
### 3. 多糖

能水解生成20个以上分子单糖的糖。

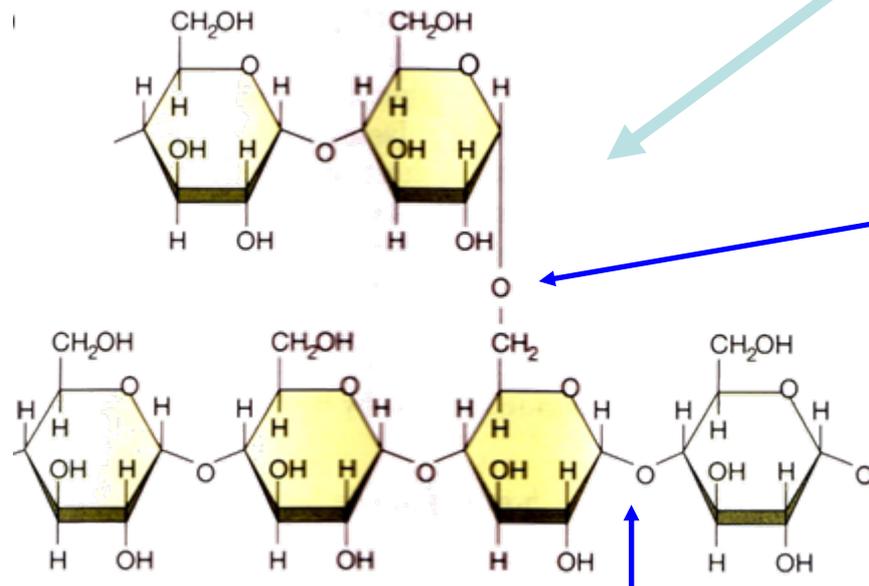
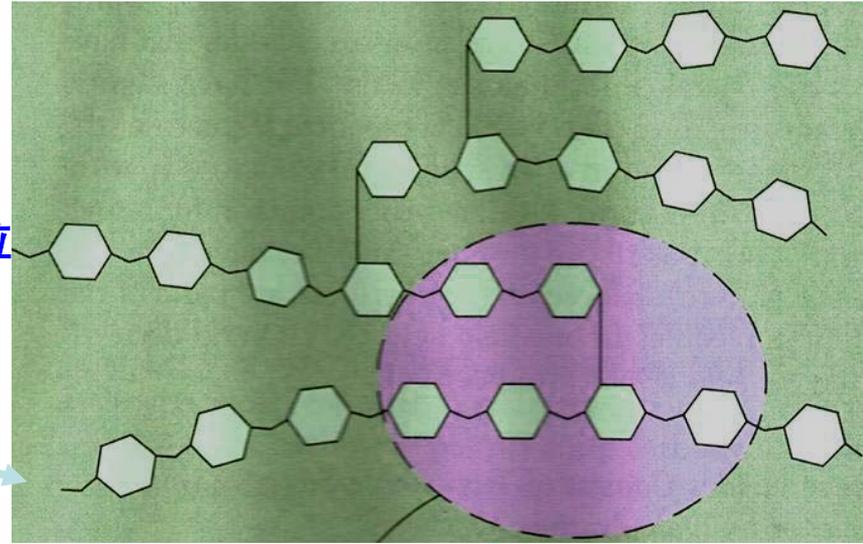
常见的多糖有

- 淀粉 (starch)
- 糖原 (glycogen)
- 纤维素 (cellulose)

# 淀粉的分子结构



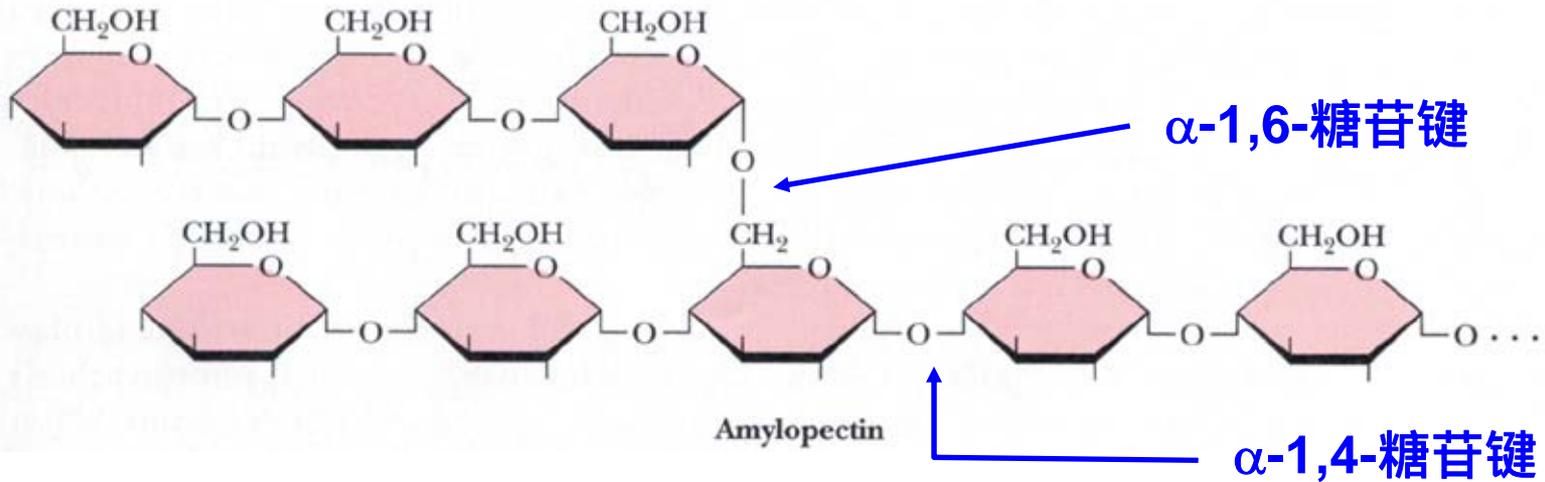
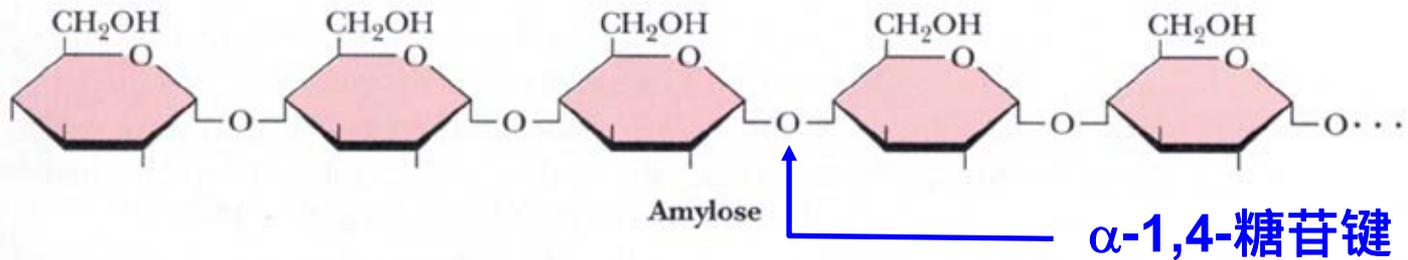
淀粉颗粒



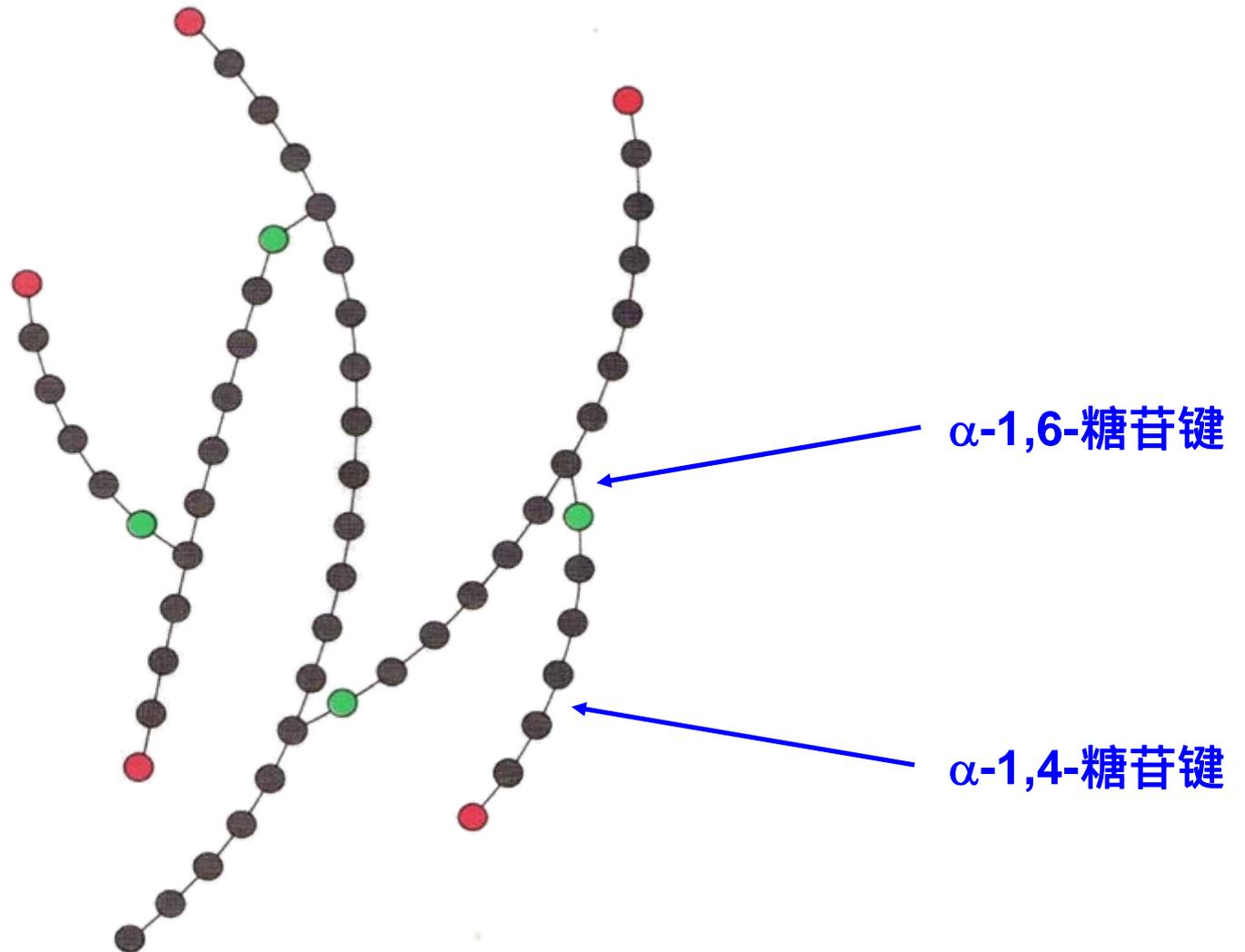
$\alpha$ -1,6-糖苷键

$\alpha$ -1,4-糖苷键

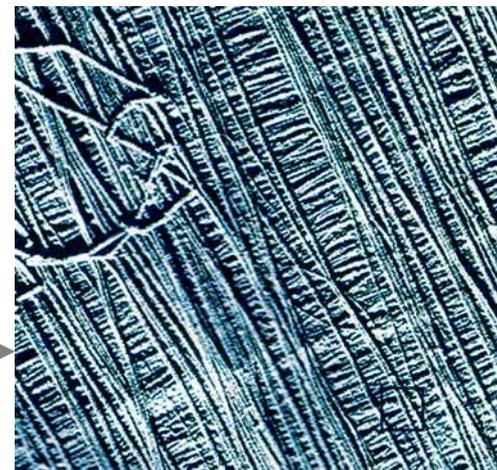
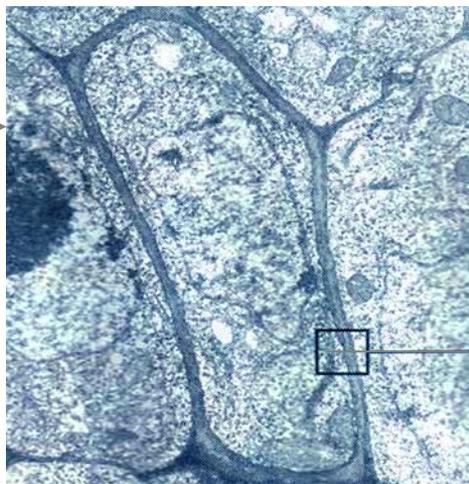
# 直链淀粉和支链淀粉



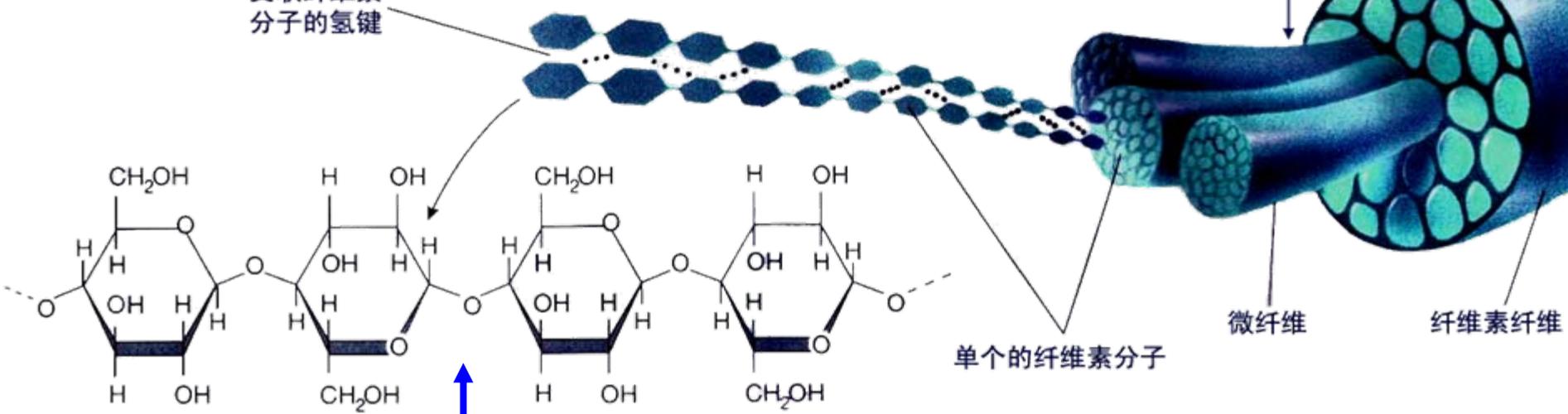
# 糖原的分子结构



# 纤维素的分子结构



交联纤维素分子的氢键



**-1,4-糖苷键**

单个的纤维素分子

微纤维

纤维素纤维



## 4、结合糖

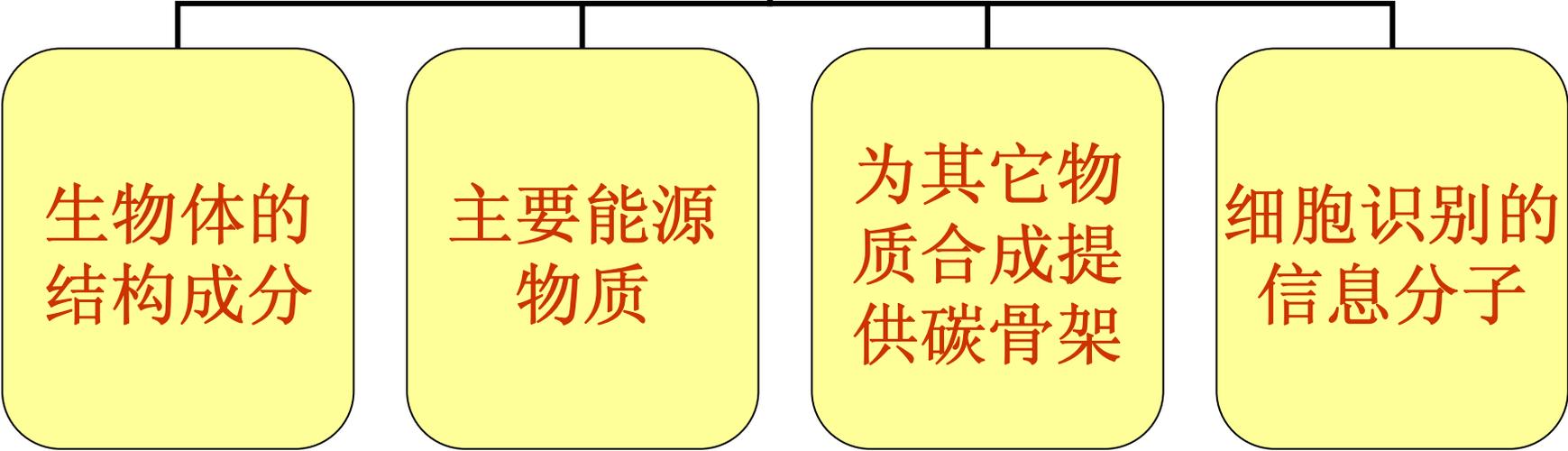
糖与非糖物质的结合物。

- 糖脂 (glycolipid): 是糖与脂类的结合物。
- 糖蛋白 (glycoprotein): 是糖与蛋白质的结合物。



# 三、糖的生物学作用

生物学作用



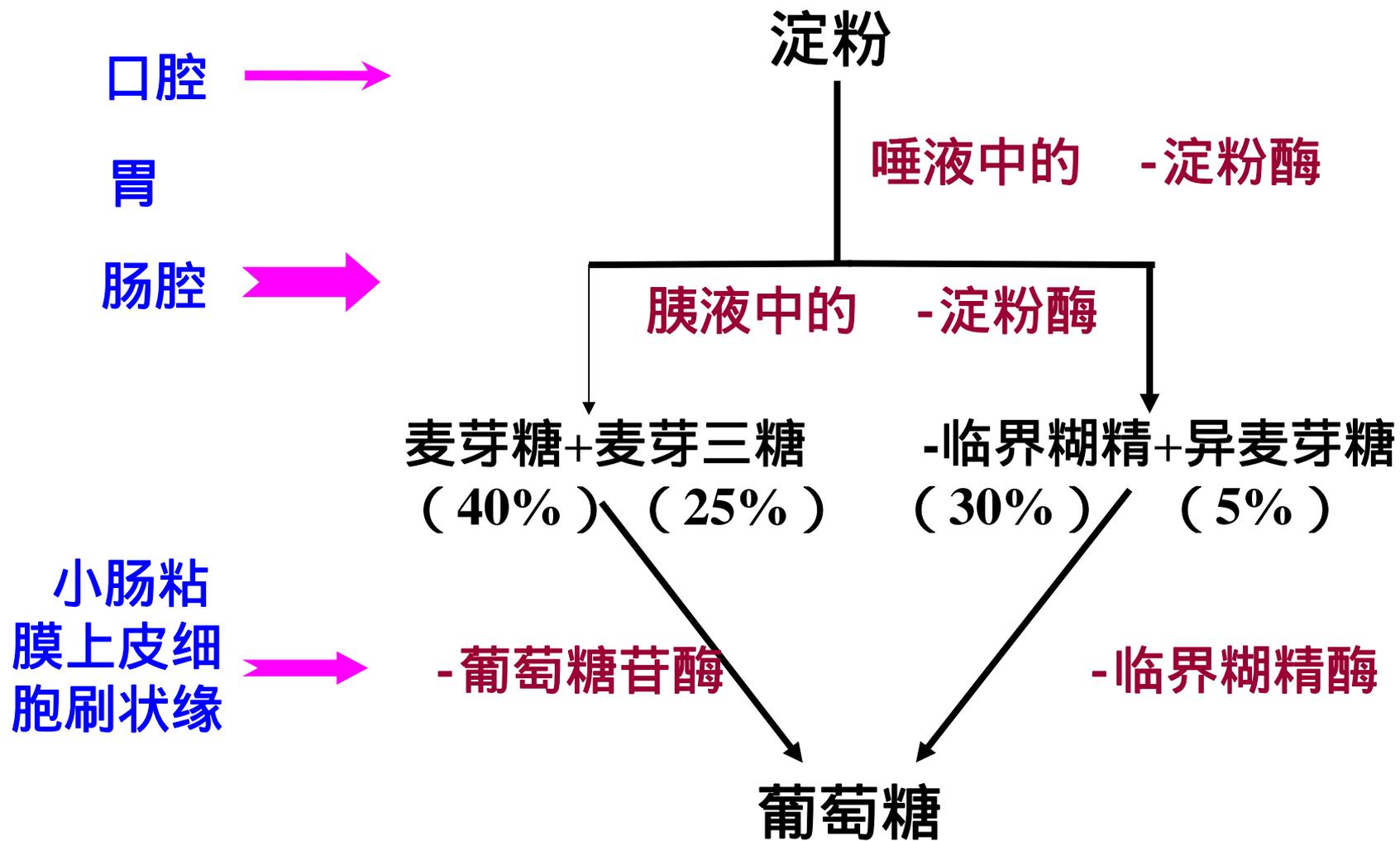


## 四、糖的消化吸收

### (一) 糖的消化

- 人类食物中的糖主要有植物淀粉、动物糖原以及麦芽糖、蔗糖、乳糖、葡萄糖等，以淀粉为主。
- 消化过程实质上就是在各种酶的作用下把多糖或寡糖降解为各种单糖其中主要是葡萄糖，消化的部位主要在小肠，少量在口腔。

# 淀粉的消化过程



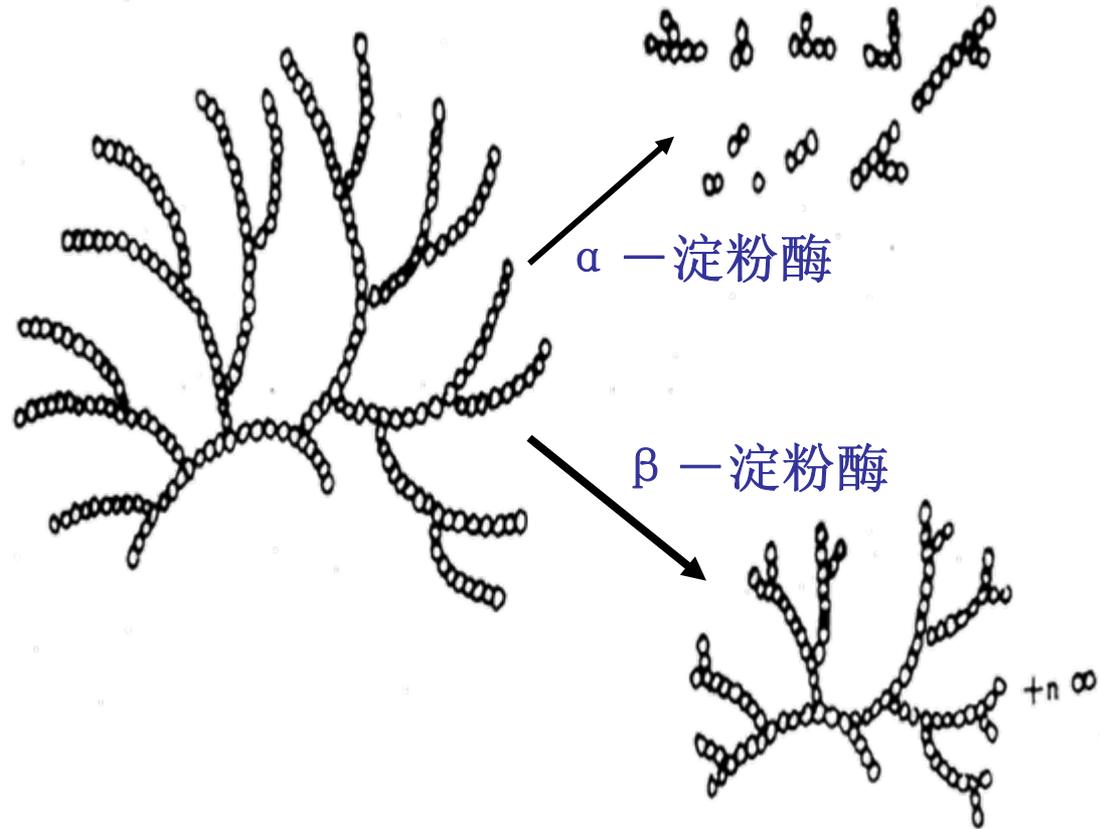
# 淀粉的分解

## ◆ 淀粉的酶促水解

**$\alpha$  - 淀粉酶:** 在淀粉分子内部任意水解  $\alpha$ -1,4糖苷键。(内切酶)

**$\beta$  - 淀粉酶:** 从非还原端开始, 水解  $\alpha$ -1,4糖苷键, 依次水解下一个  $\beta$ -麦芽糖单位(外切酶)

**脱支酶 (R酶):** 水解  $\alpha$ -淀粉酶和  $\beta$ -淀粉酶作用后留下的极限糊精中的1,6-糖苷键。



## ◆ 淀粉的磷酸解



## (二) 糖的吸收

1. 吸收部位:小肠上段

2. 吸收形式:单 糖

### 3、吸收途径

小肠肠腔  $\xrightarrow{\text{SGLT}}$  肠粘膜上皮细胞

↓  
门静脉

**SGLT** :  $\text{Na}^+$ 依赖型葡萄糖转运体

**GLUT** : 葡萄糖转运体

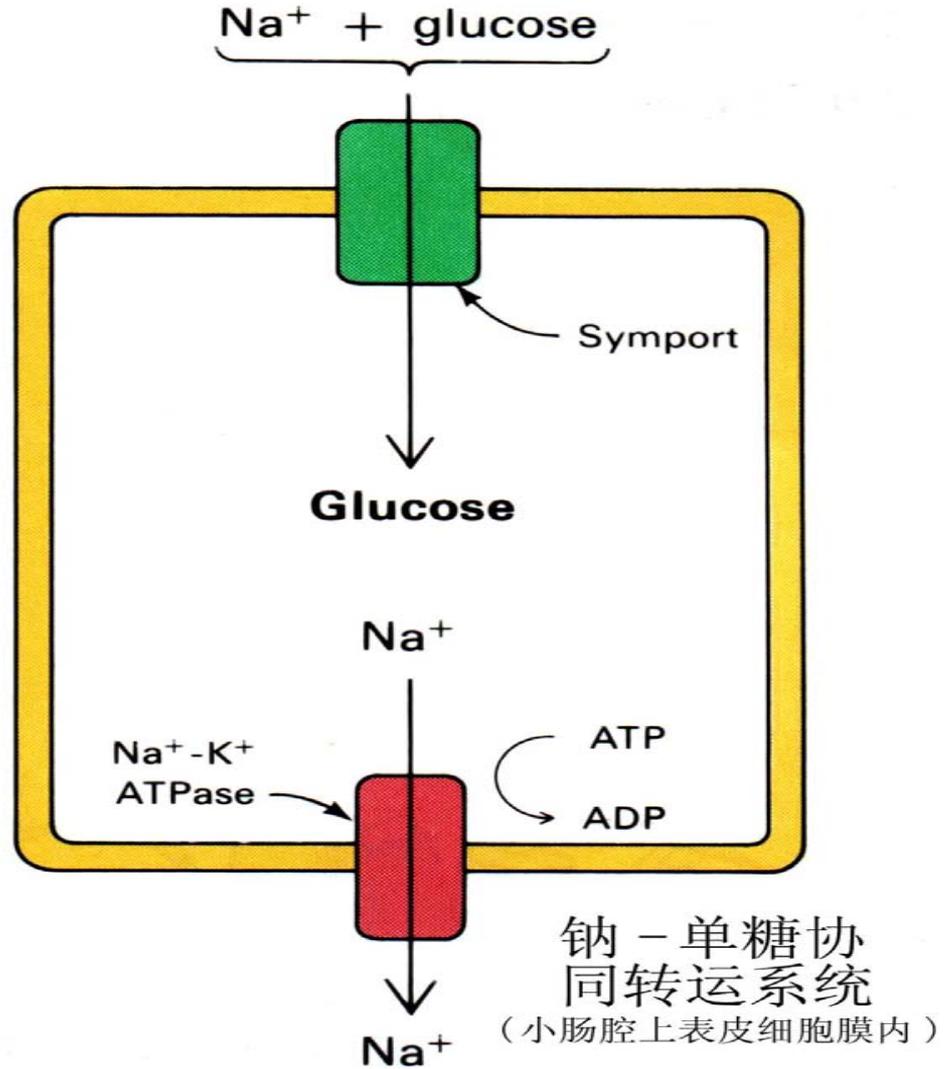
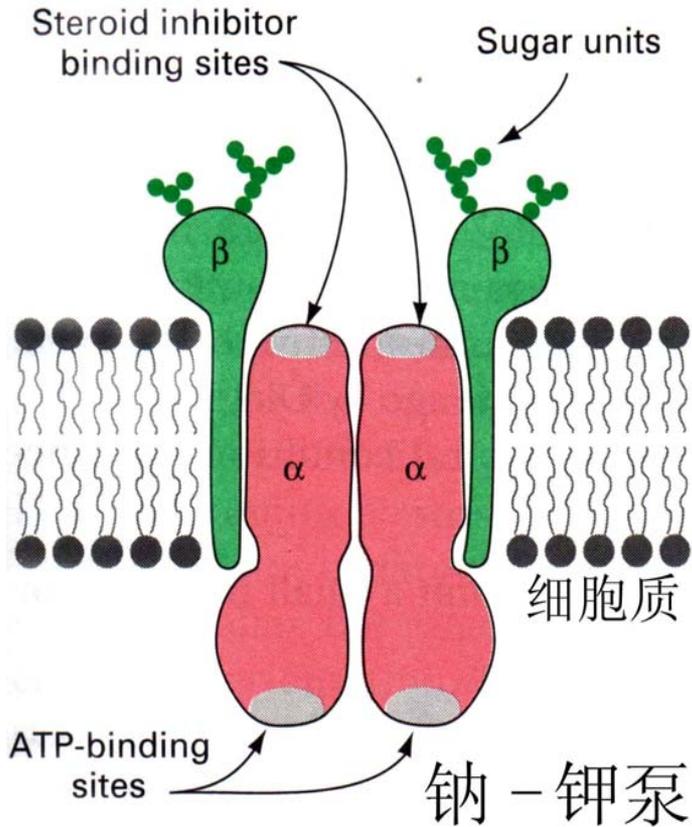
↓  
肝脏

↓  
体循环  
← **GLUT** 各种组织细胞



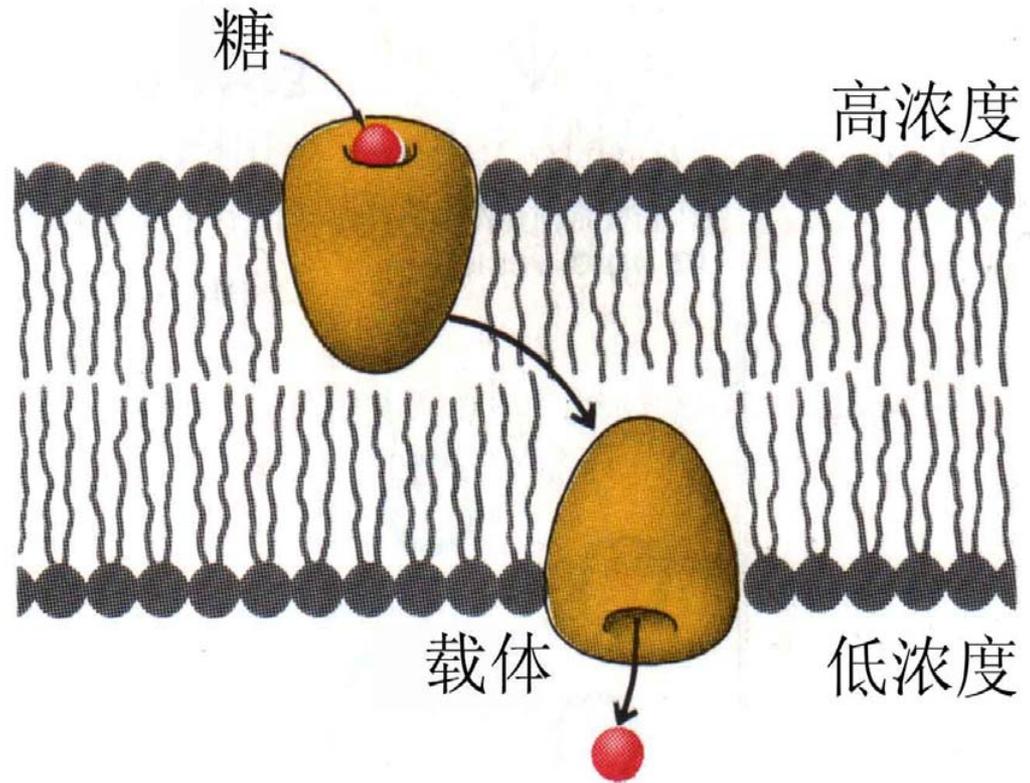
# 主动转运

## 小肠中葡萄糖吸收示意图

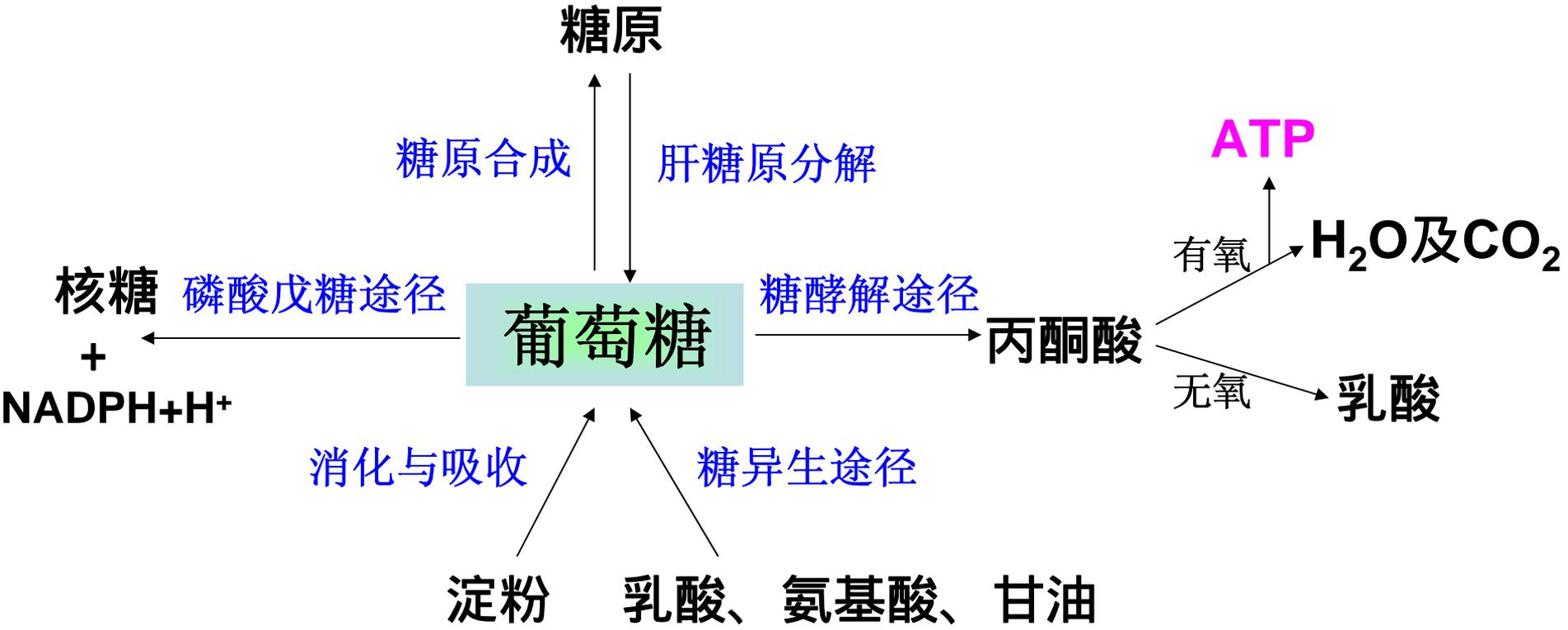


# 被动转运

- ◆ 载体蛋白运转  
方向：高糖浓度  
→ 低糖浓度
- ◆ 不需耗能

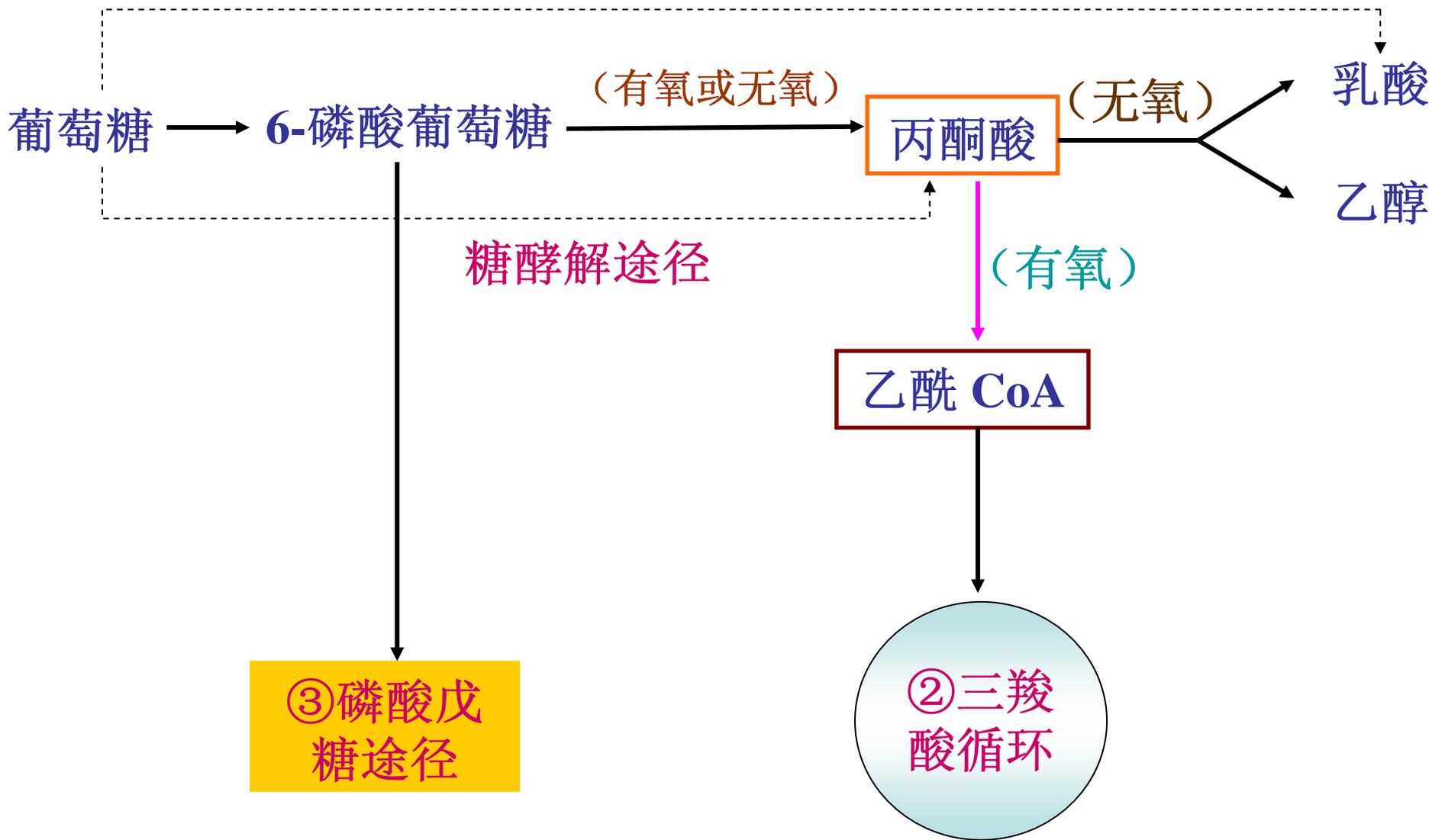


# 五、糖代谢的概况



# 第二节 葡萄糖的分解代谢

## ①糖酵解



# 一、糖的无氧分解—糖酵解 (glycolysis)

糖酵解是在细胞质中将葡萄糖降解为丙酮酸, 在缺氧情况下转变为乳酸并伴随ATP生成的一系列反应。

## 糖酵解分为两个阶段

### ➤ 第一阶段

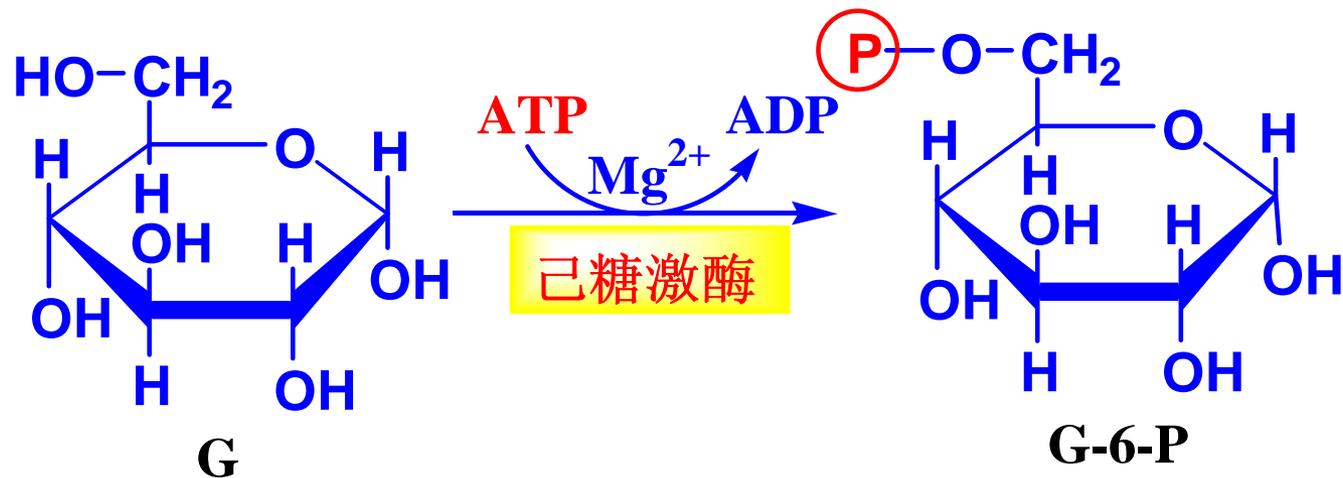
由葡萄糖分解成丙酮酸, 称之为糖酵解途径  
该途径也称作Embden-Meyethof-Parnas途径,  
简称EMP途径。

### ➤ 第二阶段

由丙酮酸转变成乳酸。

# (一) 葡萄糖分解成丙酮酸

## 1. 葡萄糖磷酸化为6-磷酸葡萄糖 (G-6-P)



- ◆ 磷酸化使葡萄糖不能自由逸出细胞;
- ◆ 需要激酶, 己糖激酶 (HK) 分四型, 肝中为葡萄糖激酶 (GK);
- ◆ 反应不可逆, 酶是**关键酶**(限速酶)
- ◆ 耗一个**ATP**

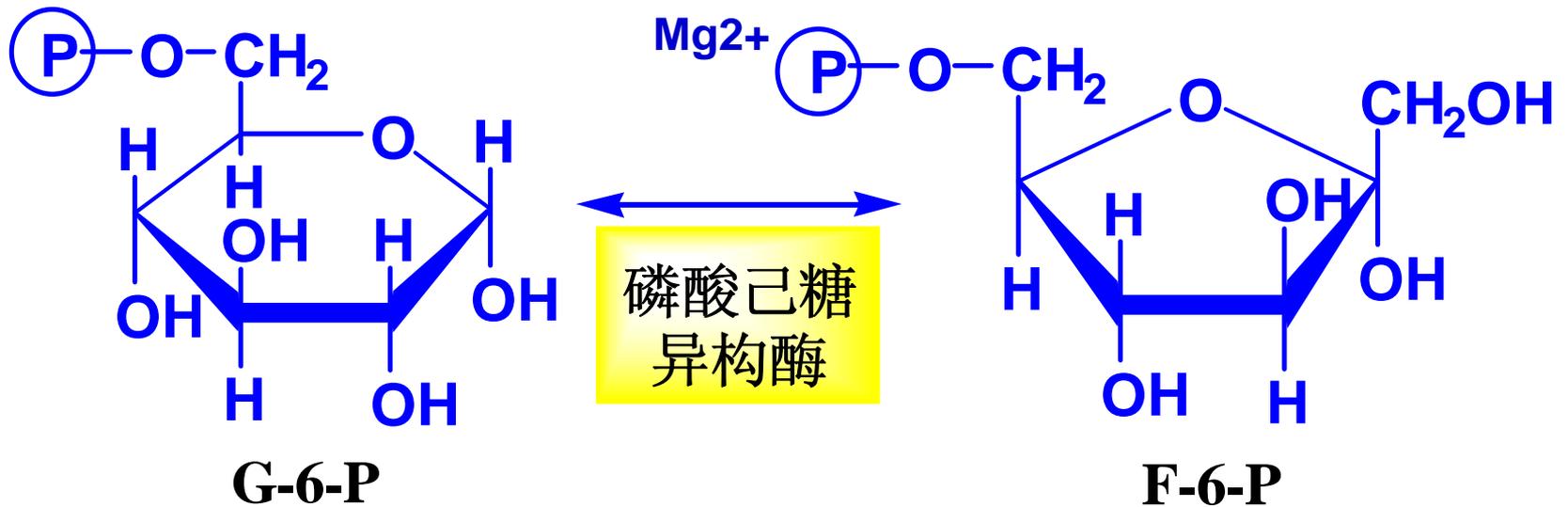
# 己糖激酶和葡萄糖激酶的比较

---

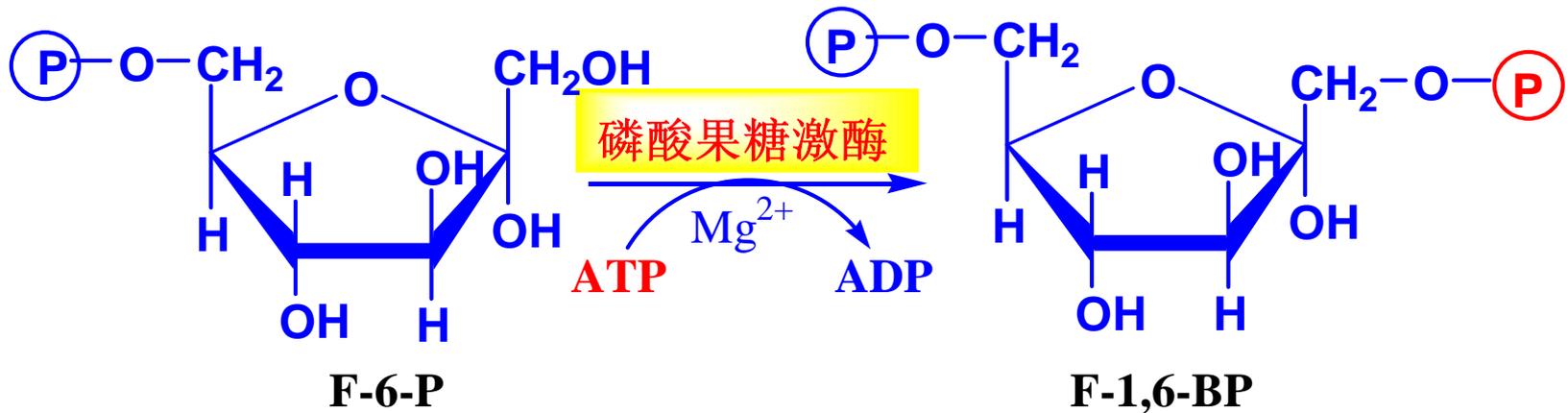
	己糖激酶	葡萄糖激酶
存在部位	肝外组织	肝
$K_m$ 值	0.1mmol/L	10mmol/L
调节	G-6-P反馈抑制	胰岛素诱导

---

## 2. 6-磷酸葡萄糖异构为6-磷酸果糖 (F-6-P)

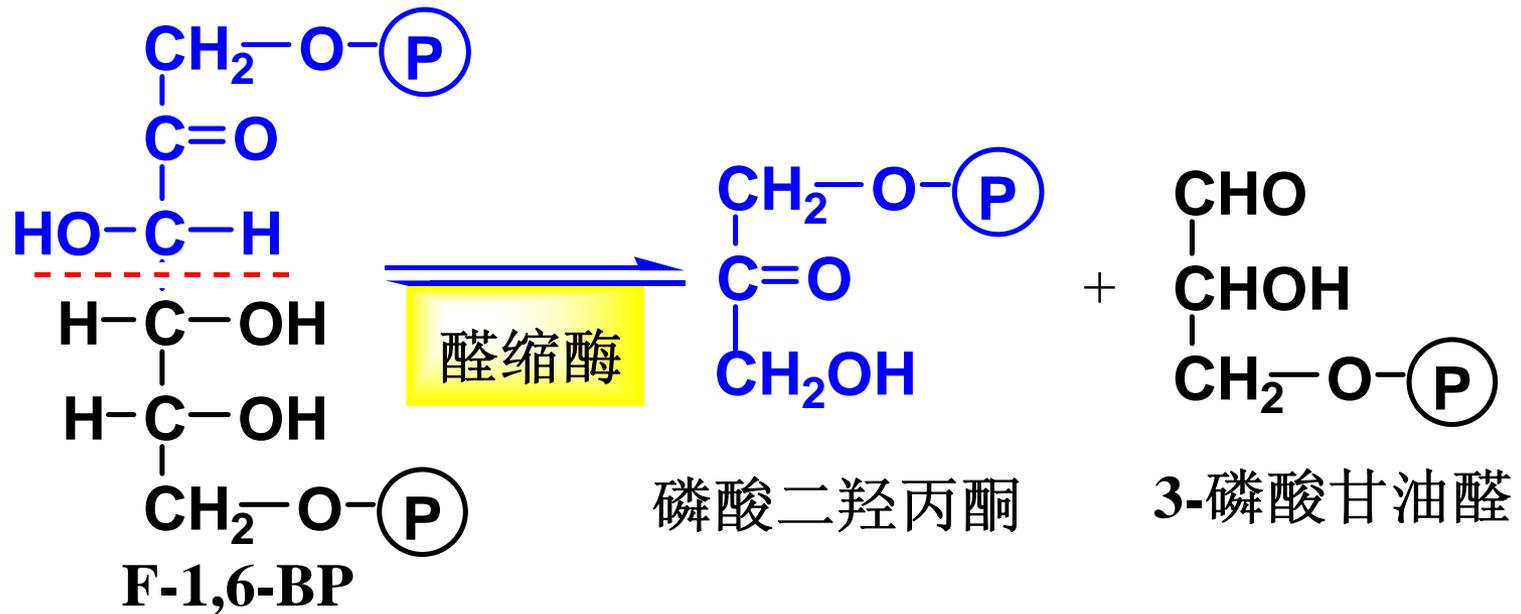


### 3. 6-磷酸果糖转变成1,6-二磷酸果糖 (F-1,6-BP)

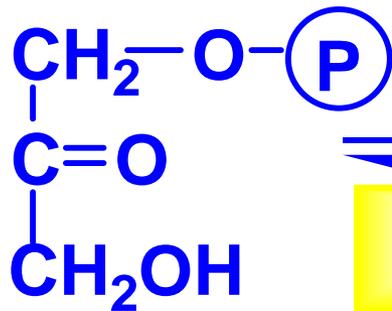


- ◆是第二个磷酸化反应，反应不可逆。
- ◆磷酸果糖激酶-1 (PFK-1)是糖酵解的限速酶。
- ◆耗一个ATP。

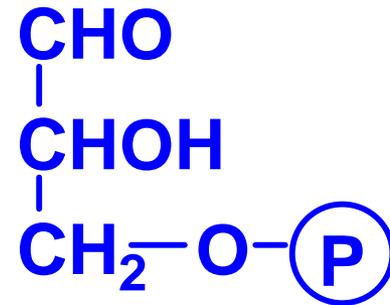
## 4. 磷酸己糖裂解成2分子磷酸丙糖



## 5. 磷酸丙糖同分异构化

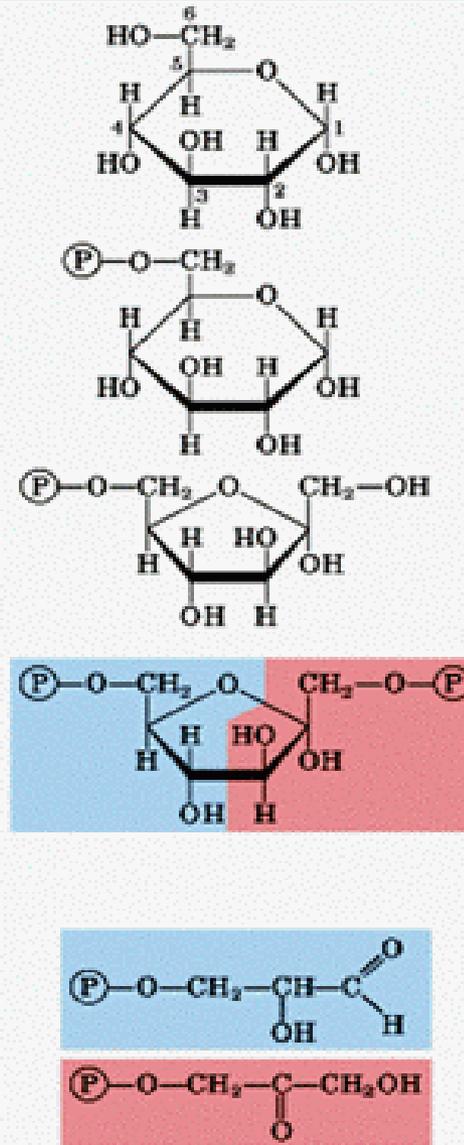
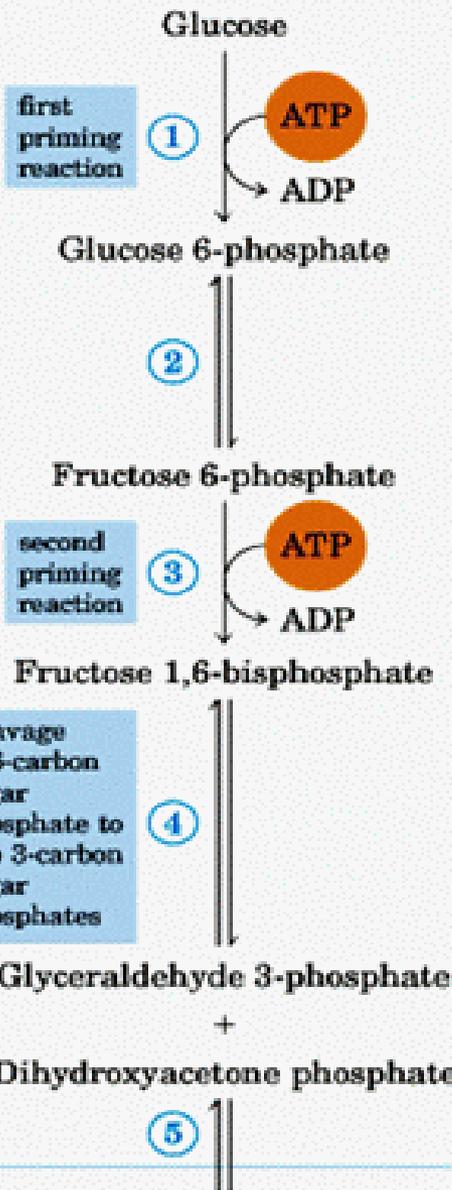


磷酸二羟丙酮



3-磷酸甘油醛

(a)

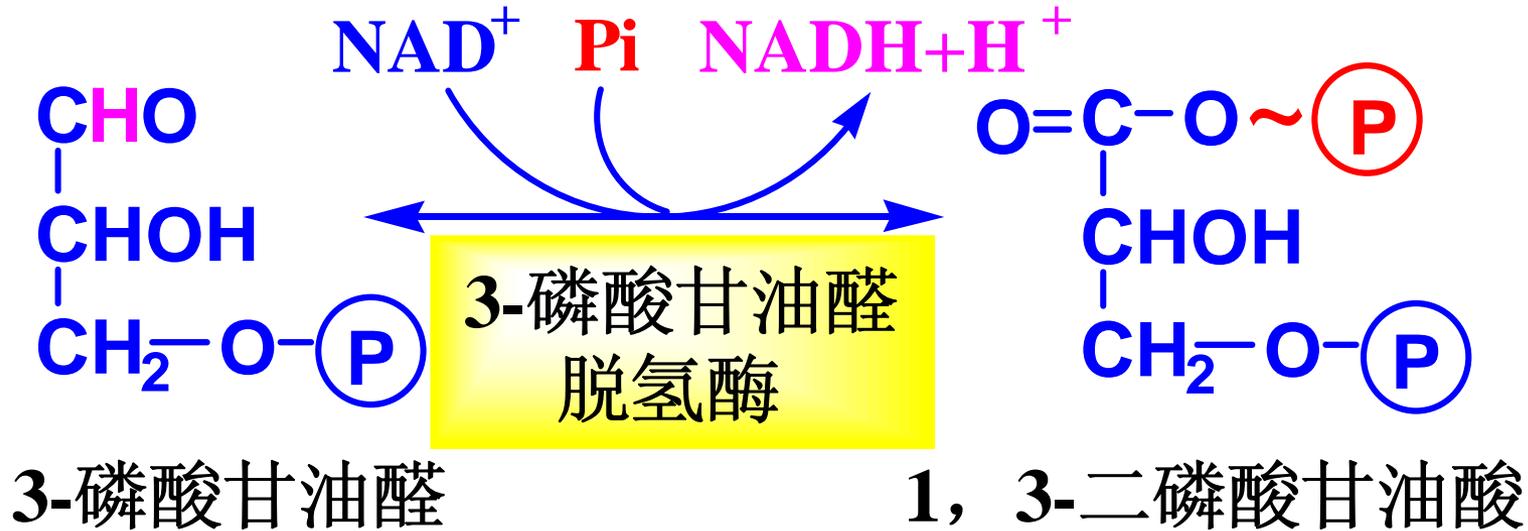


## Preparatory phase

Phosphorylation of glucose and its conversion to glyceraldehyde 3-phosphate

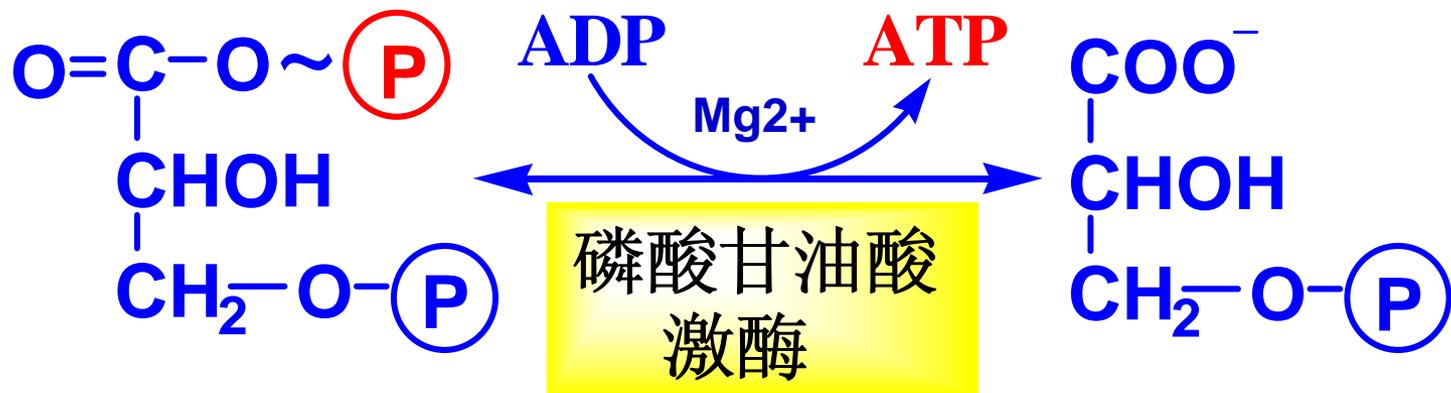
- ◆ 葡萄糖通过2步磷酸化而激活为活泼的FBP
- ◆ FBP裂解为2分子三碳糖
- ◆ 2步磷酸化反应分别由己糖激酶和磷酸果糖激酶-1催化,为不可逆反应
- ◆ 磷酸果糖激酶-1是糖酵解的重要关键酶

## 6. 3-磷酸甘油醛氧化为1,3-二磷酸甘油酸



- ◆ 脱下的氢由  $\text{NAD}^+$  接受产生  $\text{NADH}+\text{H}^+$ 。
- ◆ 糖酵解过程中第一次产生高能磷酸键。
- ◆ 催化此反应的酶是巯基酶，所以它可被碘乙酸不可逆地抑制。故碘乙酸能抑制糖酵解。

## 7. 1,3-二磷酸甘油酸转变成3-磷酸甘油酸



1, 3-二磷酸甘油酸

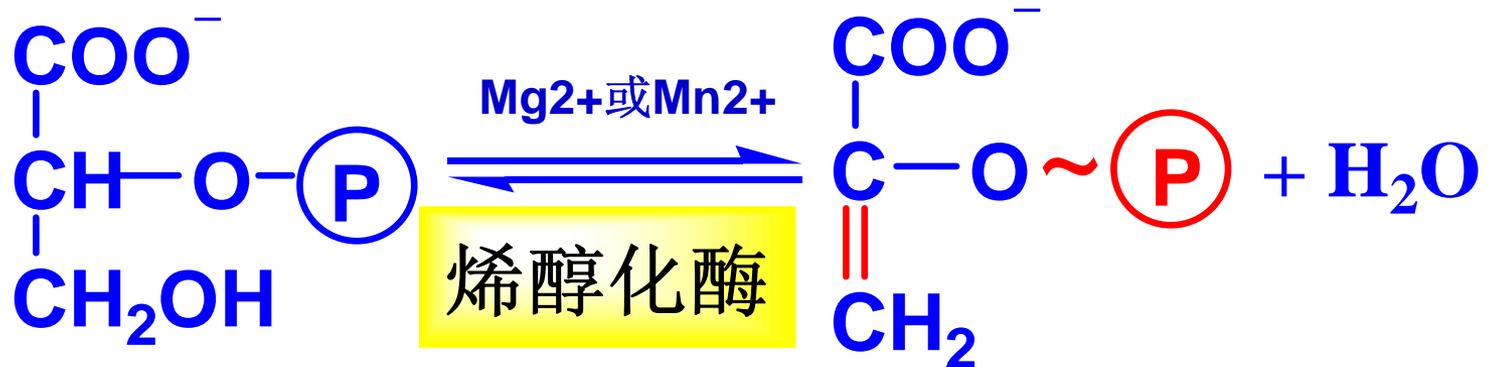
3-磷酸甘油酸

- ◆ 此步为底物水平磷酸化反应；
- ◆ 有砷酸存在时会让上前一步的氧化反应与这一步的磷酸化反应解偶联。

## 8. 3-磷酸甘油酸转变为2-磷酸甘油酸



## 9. 2-磷酸甘油酸转变成磷酸烯醇式丙酮酸(PEP)

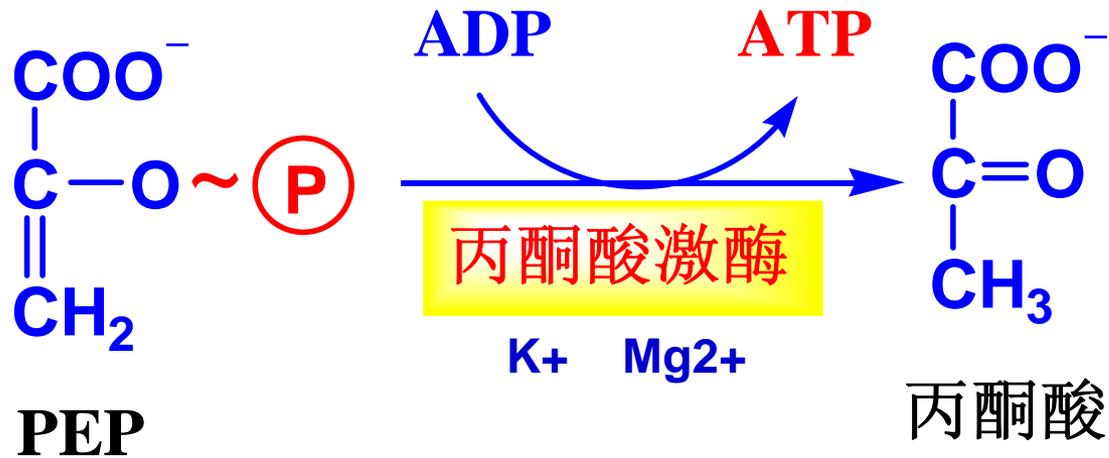


2-磷酸甘油酸

磷酸烯醇式  
丙酮酸

◆ 形成第二个高能磷酸键（高能化合物）。

# 10. PEP转变成丙酮酸 (pyruvate)



- ◆ 第二次底物水平磷酸化，反应不可逆。
- ◆ 烯醇式立即自发转变为酮式。

(b)

Glyceraldehyde 3-phosphate (2)

oxidation and phosphorylation

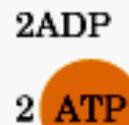
6



1,3-Bisphosphoglycerate (2)

first ATP-forming reaction (substrate-level phosphorylation)

7



3-Phosphoglycerate (2)

8

2-Phosphoglycerate (2)

9



Phosphoenolpyruvate (2)

second ATP-forming reaction (substrate-level phosphorylation)

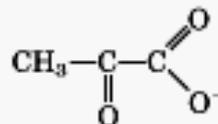
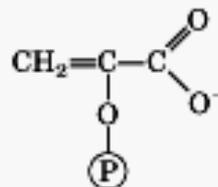
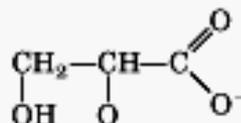
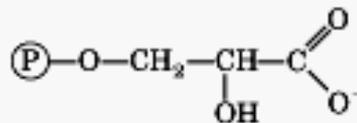
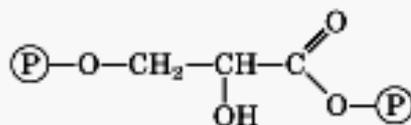
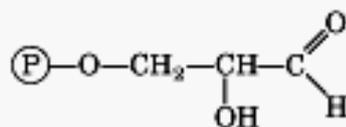
10



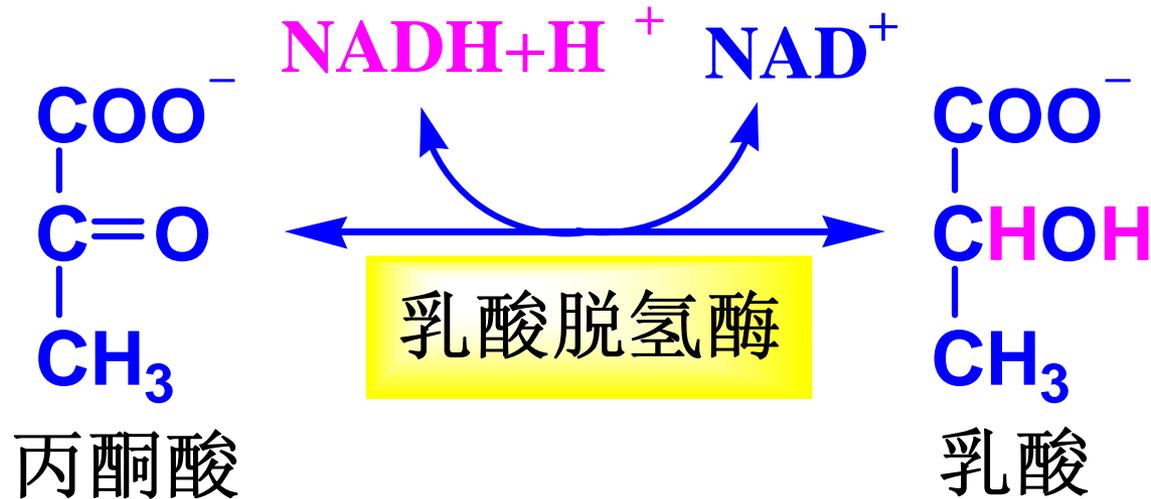
Pyruvate (2)

### Payoff phase

Oxidative conversion of glyceraldehyde 3-phosphate to pyruvate and the coupled formation of ATP and NADH



## (二) 丙酮酸转变成乳酸(lactate)



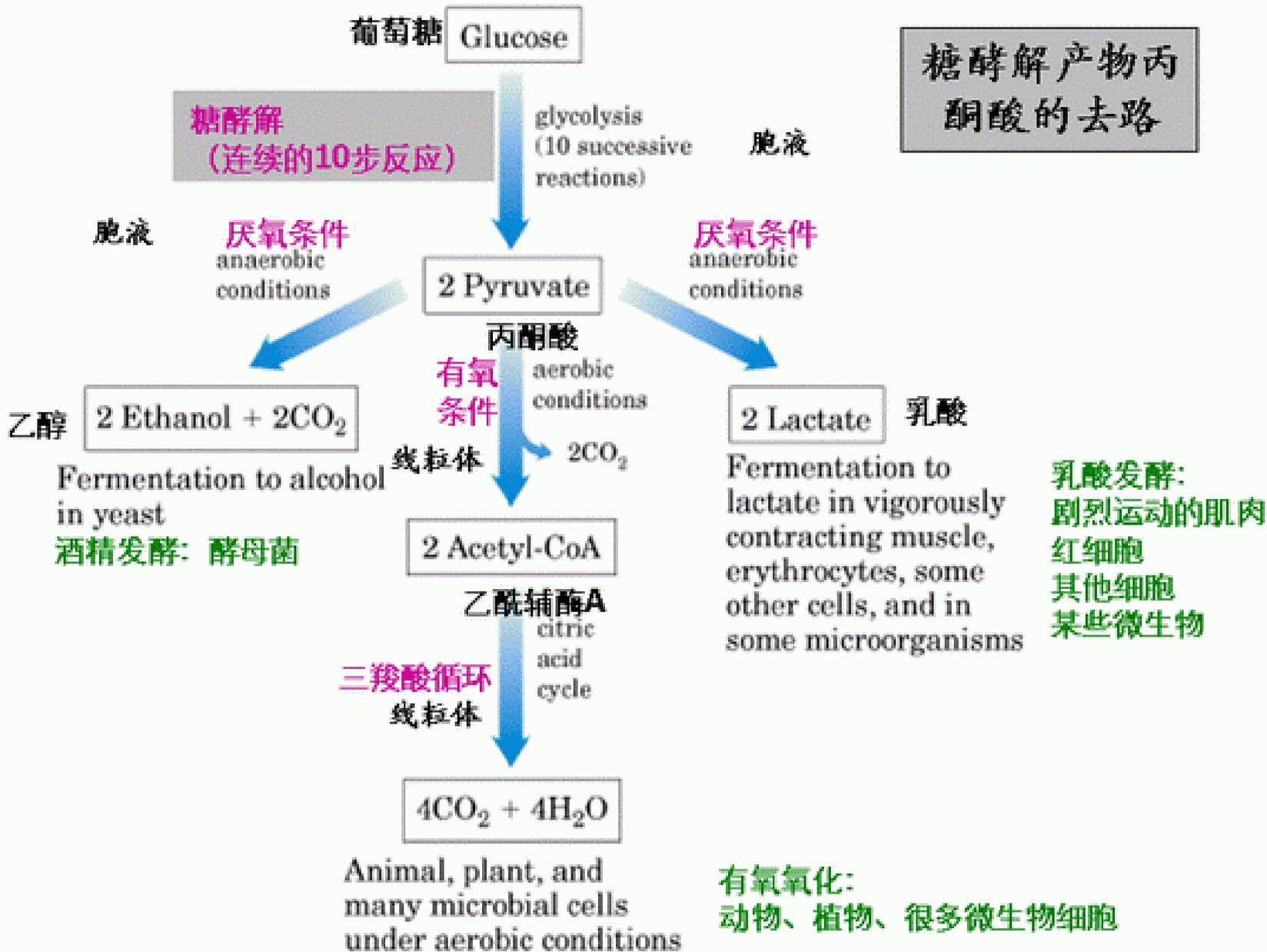
- ◆ 此为还原反应， $\text{NADH}+\text{H}^+$ 来自于3-磷酸甘油醛脱氢。
- ◆ 乳酸是糖酵解的终产物。

在无氧或相对缺氧时 ——还可进行酒精发酵

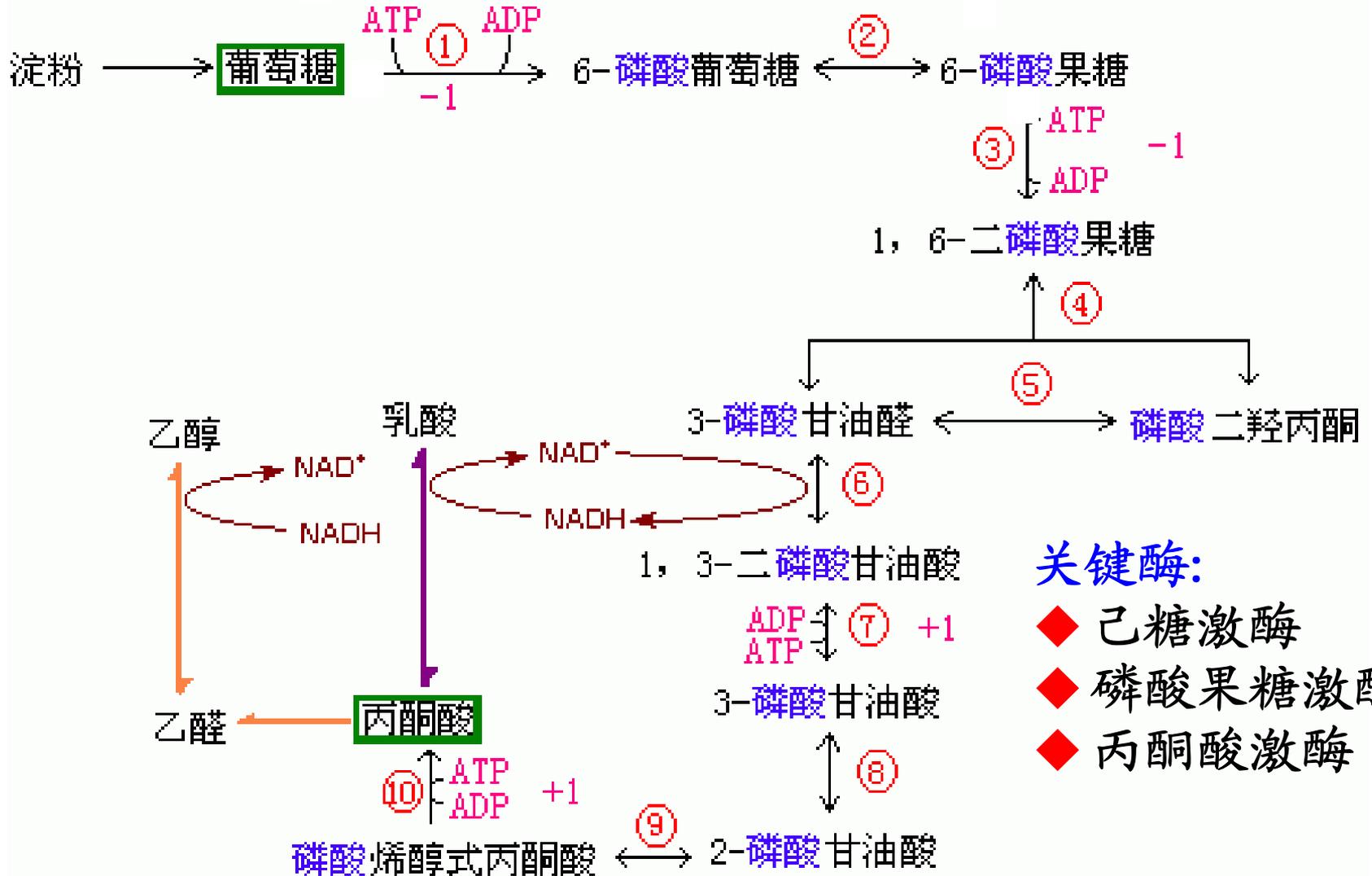
由葡萄糖 → 乙醇的过程



丙酮酸脱羧酶需要TPP作为辅酶。

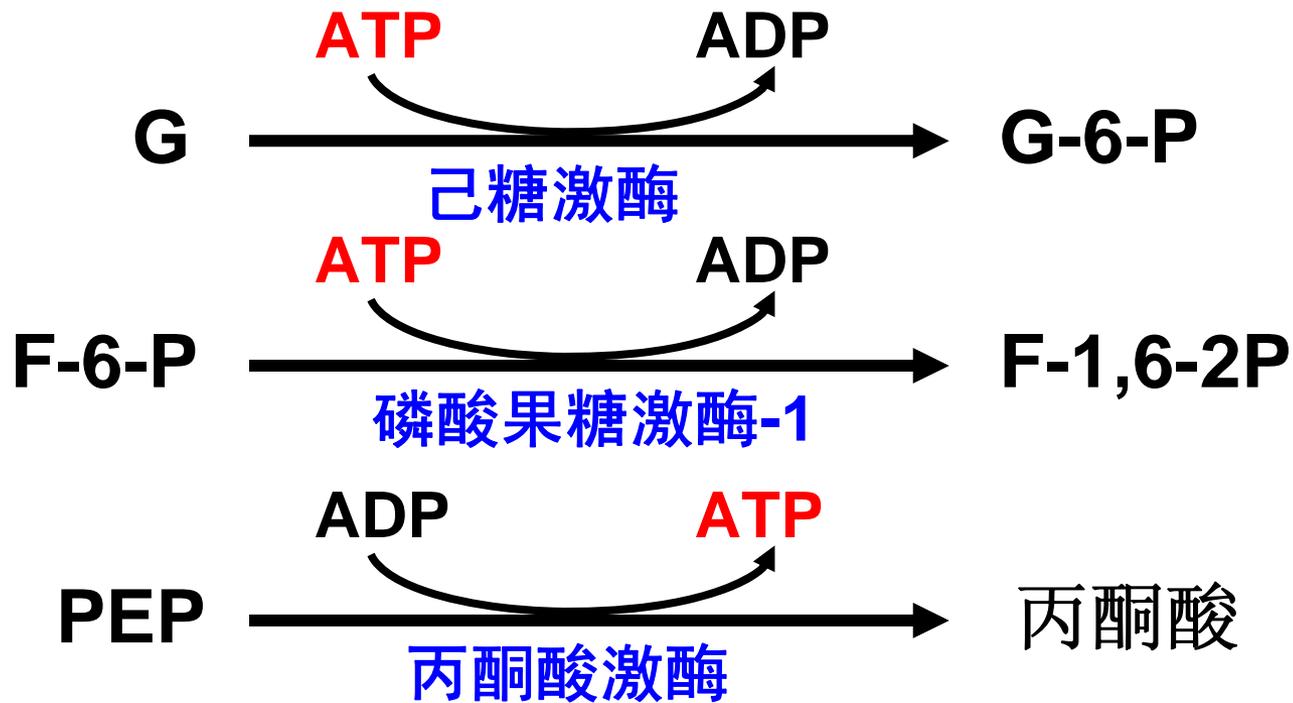


# (三) 糖酵解的小结



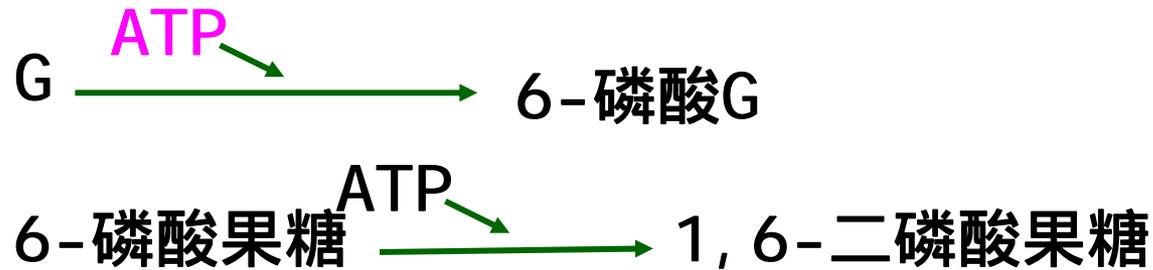
反应部位：**胞液**

反应过程不可逆。其中有**三步不可逆**的反应

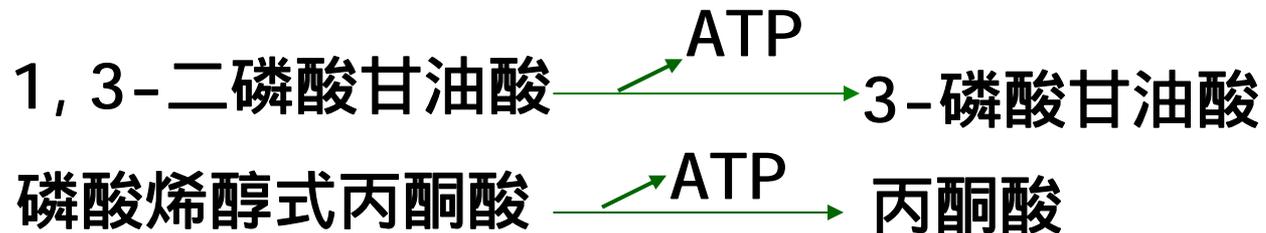


糖酵解是一个不需氧的产能过程能量的净生成：  
2ATP

消耗ATP的步骤：



生成ATP的步骤：



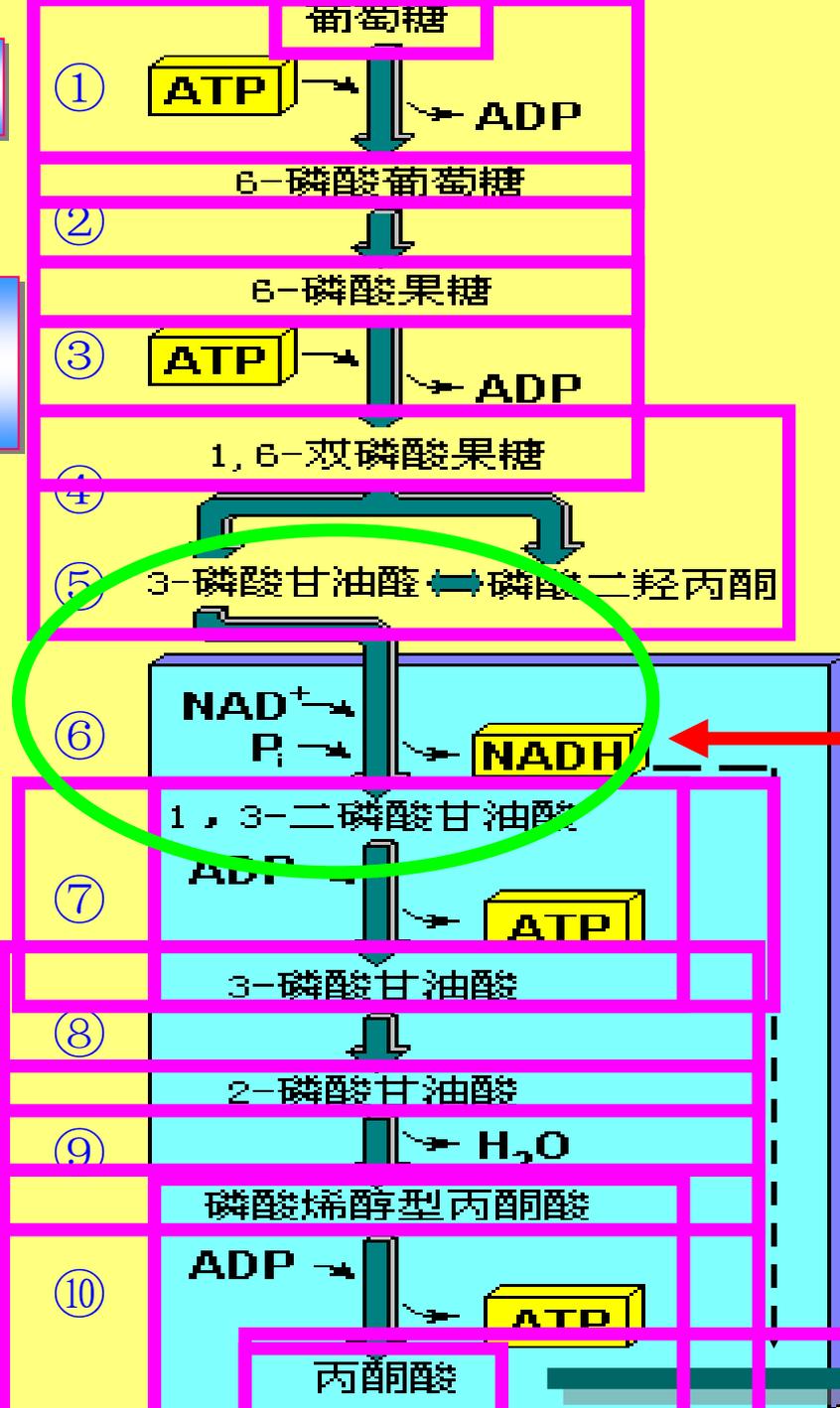
高能化合物：**1,3-二磷酸甘油酸，磷酸烯醇式丙酮酸。**

# 糖酵解

己糖激酶

6-磷酸果糖  
激酶-1

丙酮酸激酶



三个关键酶

一次脱氢

二次底物

水平磷酸化



## (四) 糖酵解的调节

酶的名称	激活剂	抑制剂
己糖激酶	AMP	G-6-P (反馈)
磷酸果糖激酶-1 (PFK-1)	AMP、ADP、F-1,6-2P、 F-2,6-2P	ATP, 柠檬酸, 长链脂 肪酸和NADH
丙酮酸激酶	F-1,6-2P和PEP	ATP、柠檬酸, 长链 脂肪酸

## (五) 糖酵解生理意义:

- ◆ 紧急供能: 剧烈运动时。
- ◆ 生理供能: 红细胞、视网膜、睾丸和骨髓
- ◆ 病理供能: 严重贫血、呼吸功能障碍和循环功能障碍
- ◆ 中间产物为糖异生提供原料。

## 二、糖的有氧氧化

### \* 概念

糖的有氧氧化指在机体氧供应充足时，葡萄糖彻底氧化成 $\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CO}_2$ ，并释放出能量的过程，是机体主要供能方式。

### \* 部位：胞液及线粒体

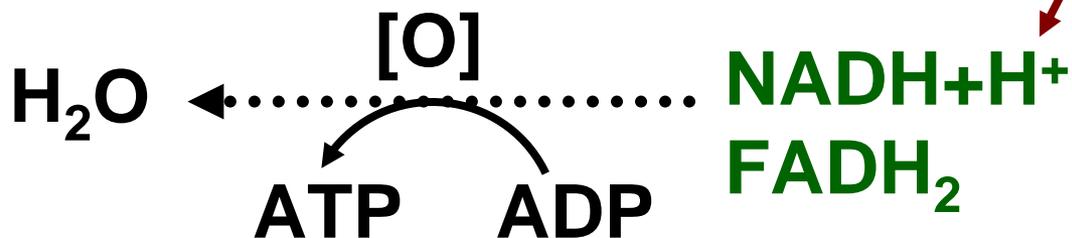
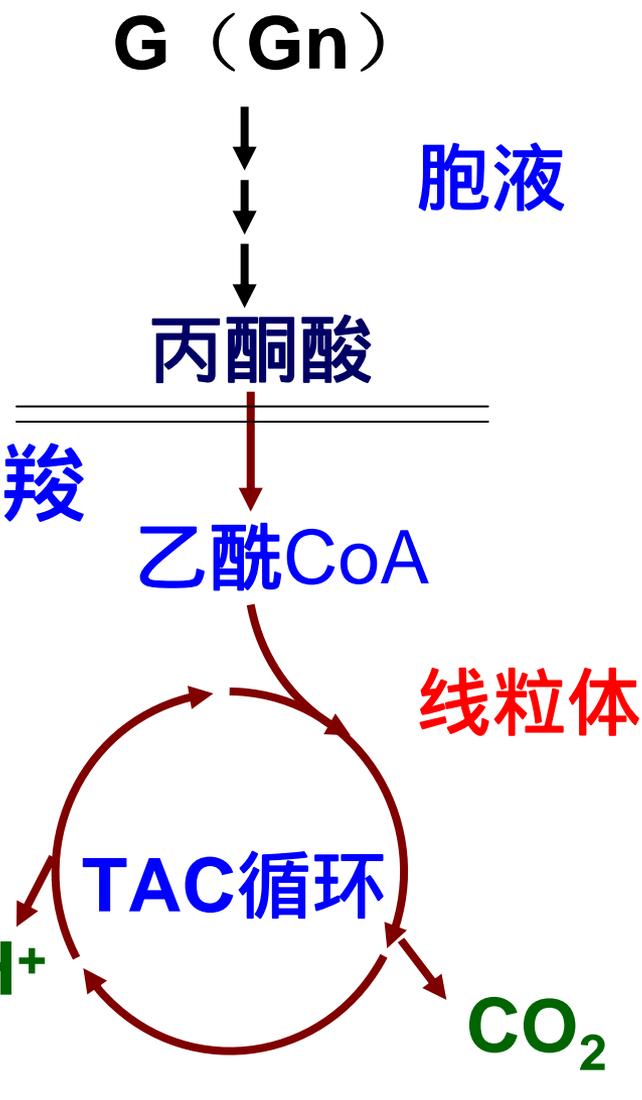
# (一) 有氧氧化的反应过程

第一阶段：糖酵解途径

第二阶段：丙酮酸的氧化脱羧

第三阶段：三羧酸循环

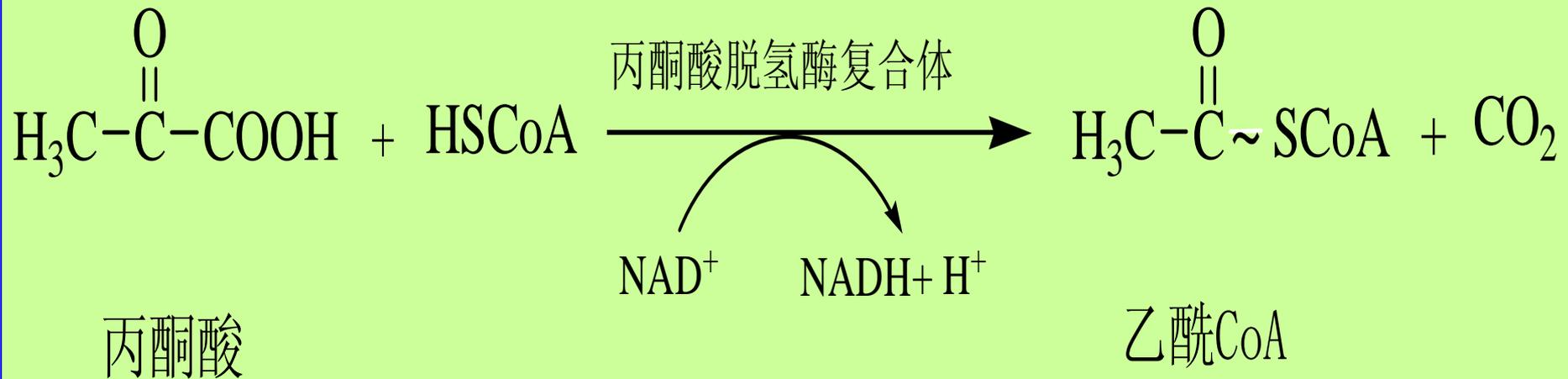
第四阶段：氧化磷酸化



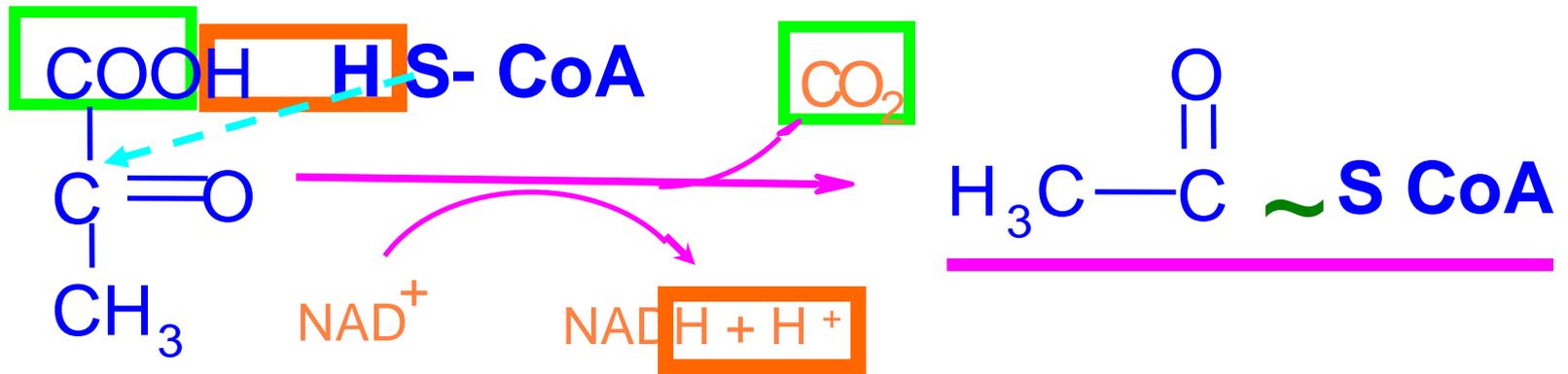
# 1、丙酮酸的氧化脱羧

丙酮酸进入线粒体，氧化脱羧为乙酰CoA。

总反应式：



# 丙酮酸的氧化脱羧



丙酮酸 + 辅酶A

乙酰辅酶A

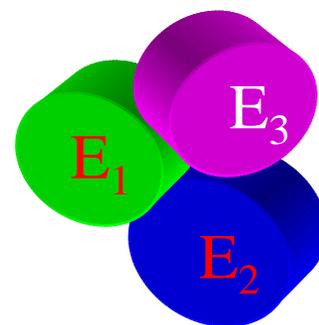
# 丙酮酸脱氢酶复合体的组成

- 三种酶:

**E1** 丙酮酸脱氢酶

**E2** 二氢硫辛酰胺转乙酰酶

**E3** 二氢硫辛酰胺脱氢酶



- 六种辅助因子:

**TPP**、**Mg<sup>2+</sup>** 硫辛酸、**FAD**、**NAD<sup>+</sup>**、**HSCoA**

B1

B2

Vpp

泛酸

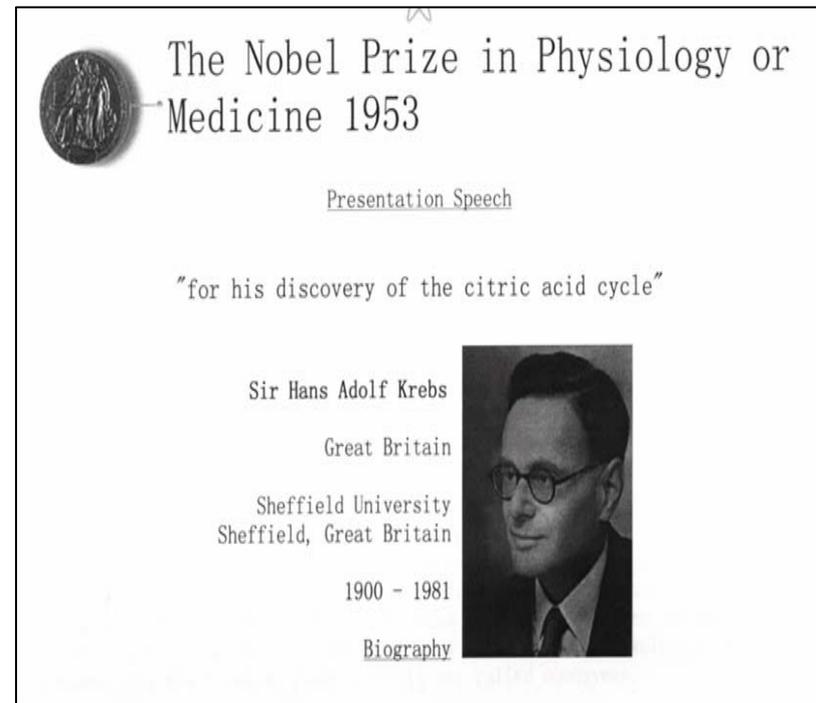


## 2、三羧酸循环

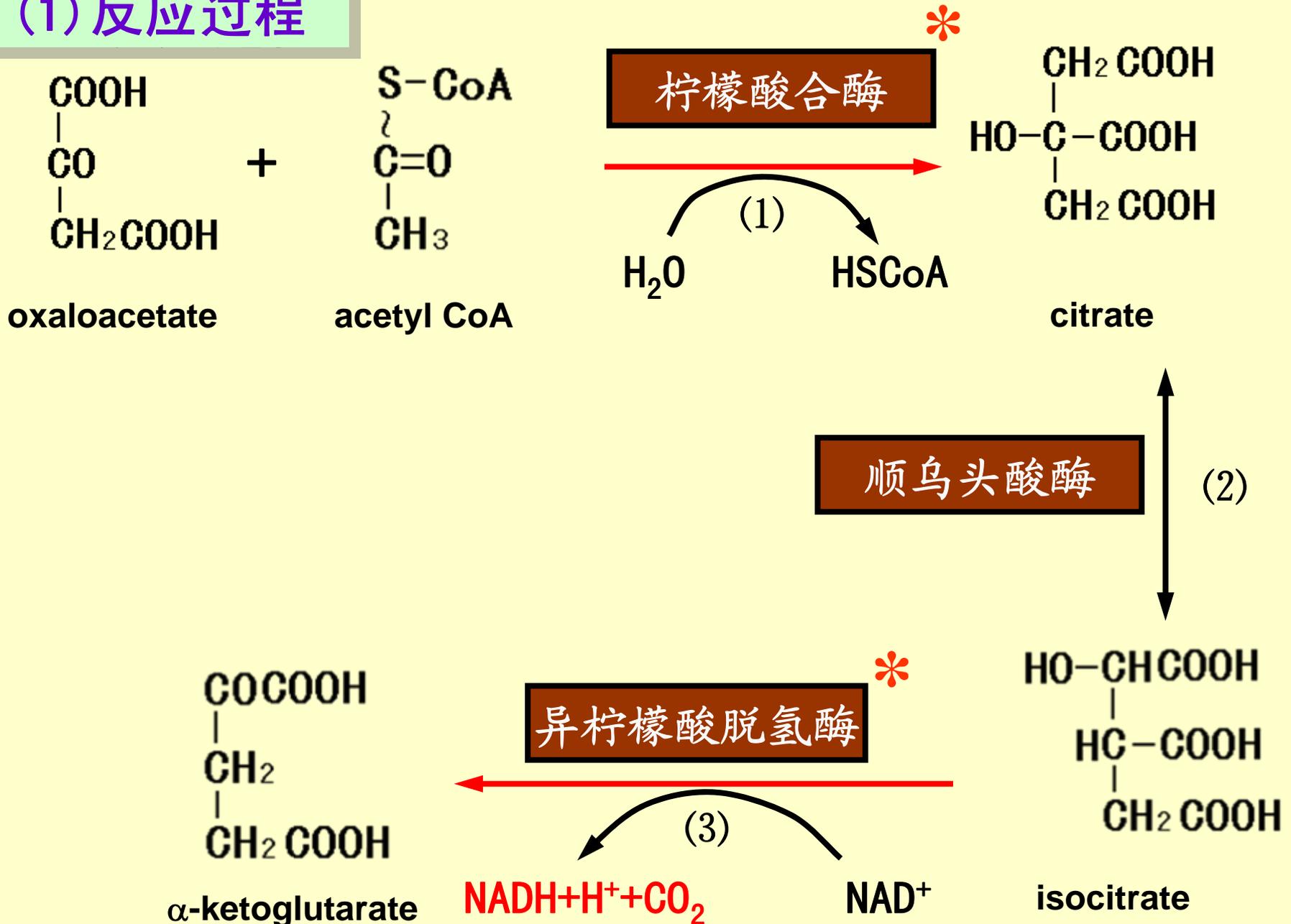
❖三羧酸循环(**Tricarboxylic acid Cycle, TAC**)也称为柠檬酸循环，这是因为循环反应中的第一个中间产物是一个含三个羧基的柠檬酸。由于**Krebs**正式提出了三羧酸循环的学说，故此循环又称为**Krebs循环**。

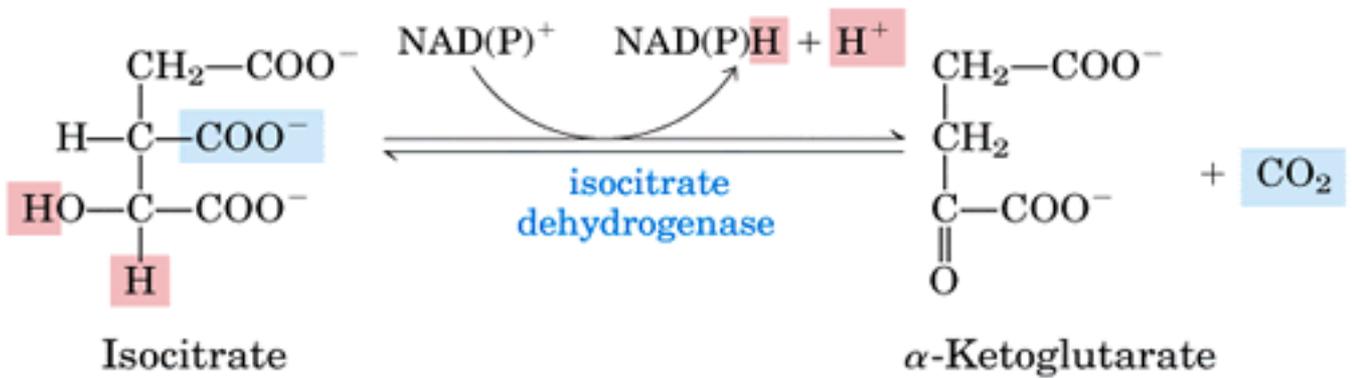
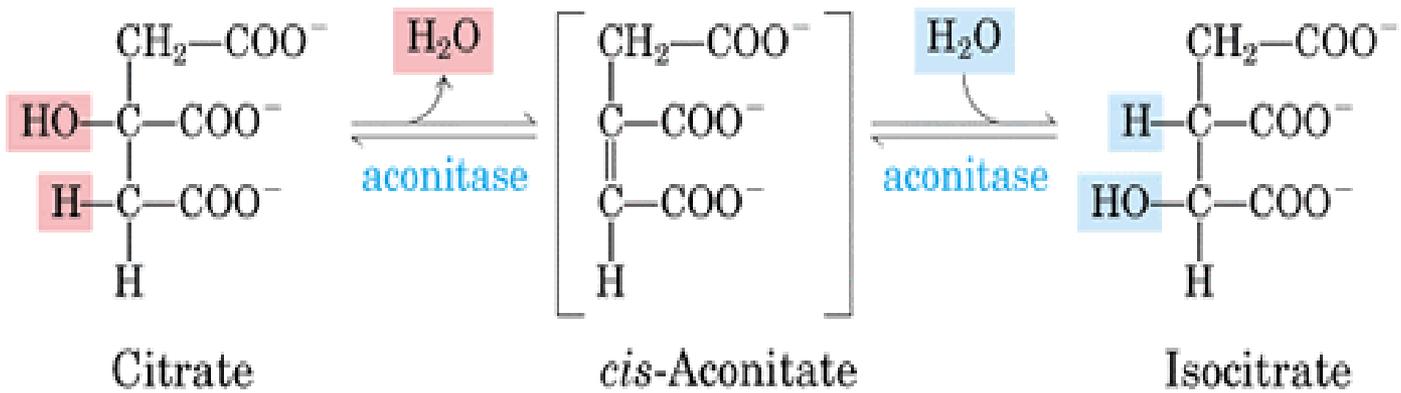
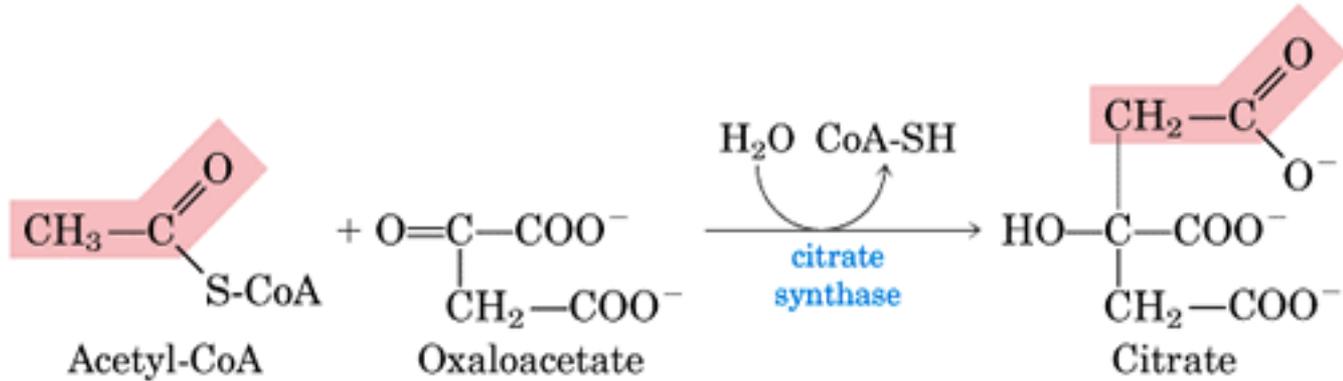
❖乙酰CoA进入由一连串反应构成的循环体系，被氧化生成CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O并释放出大量能量的过程。

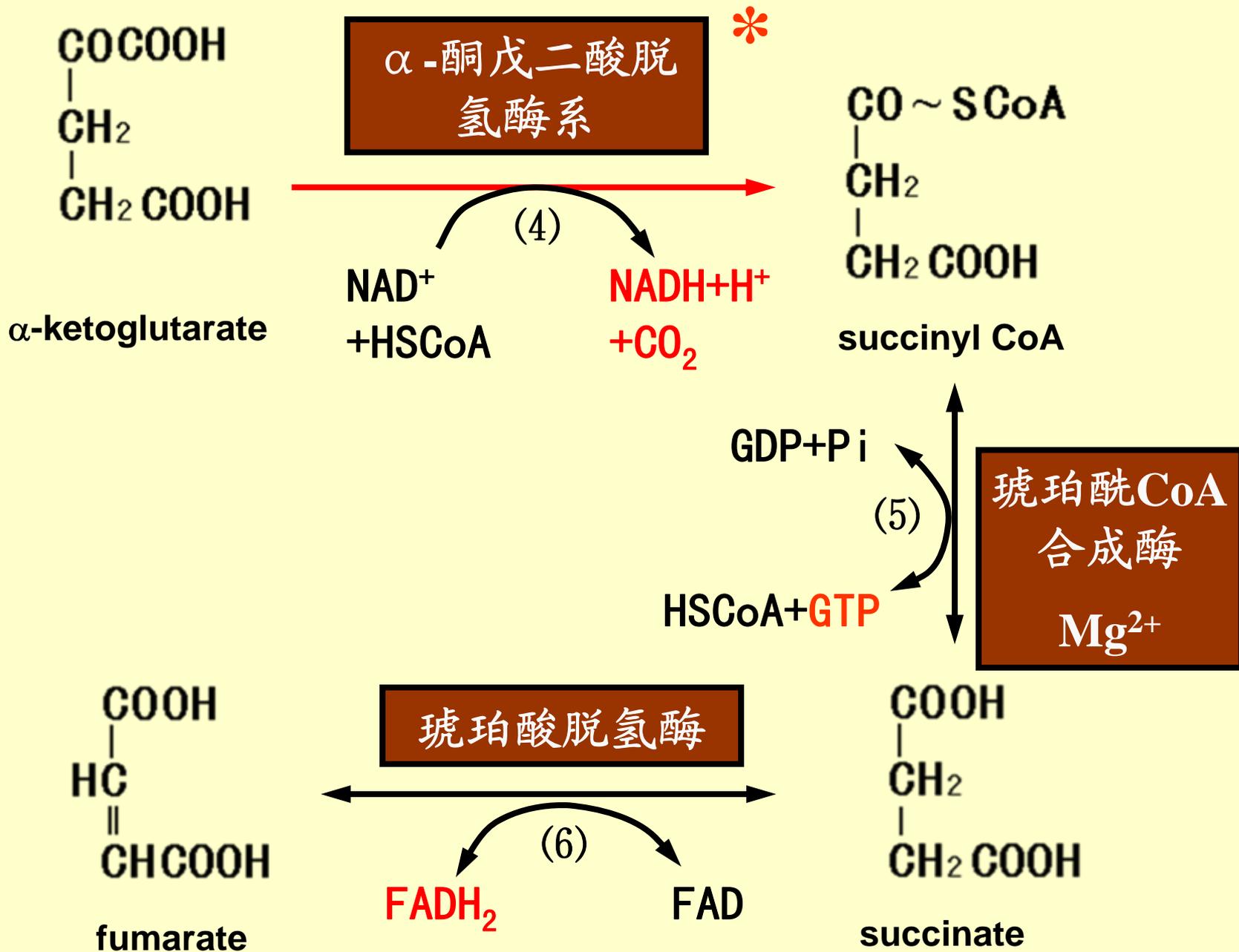
❖反应部位：**线粒体**

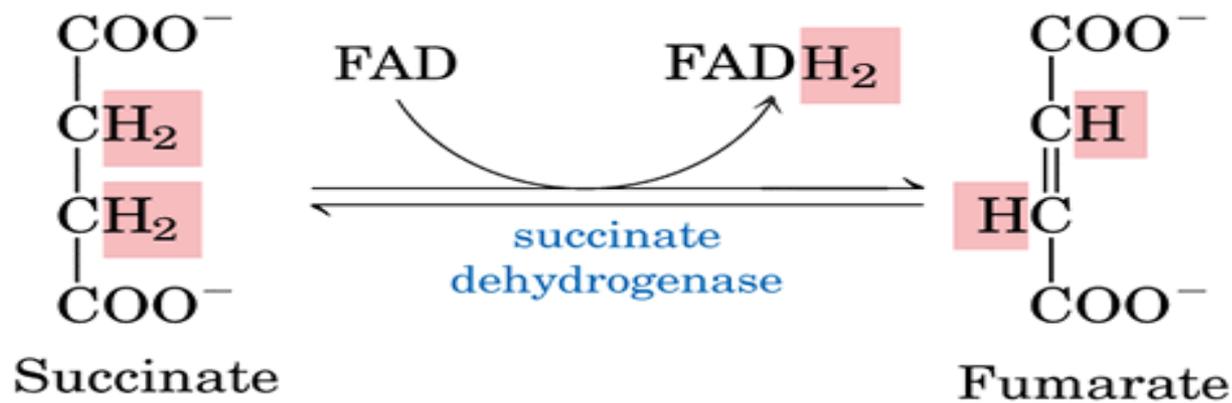
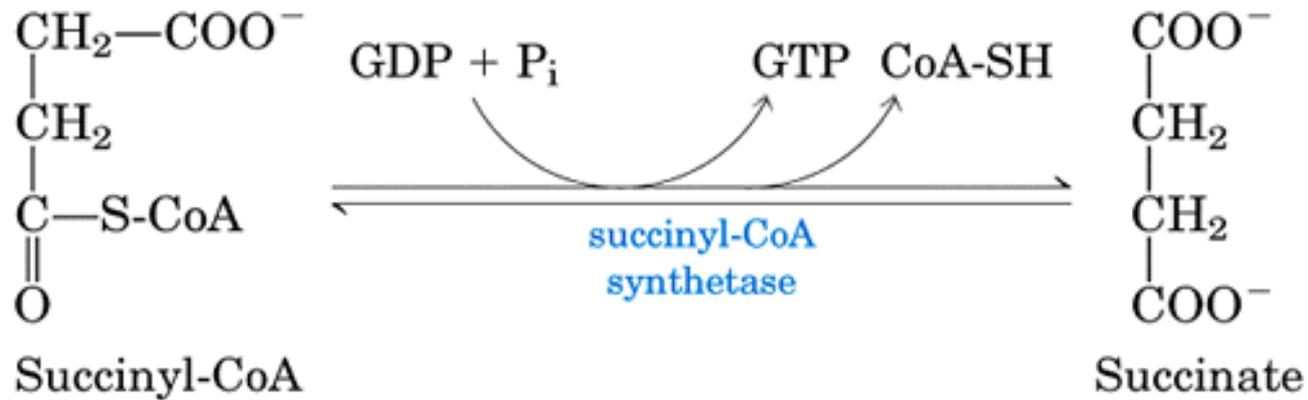
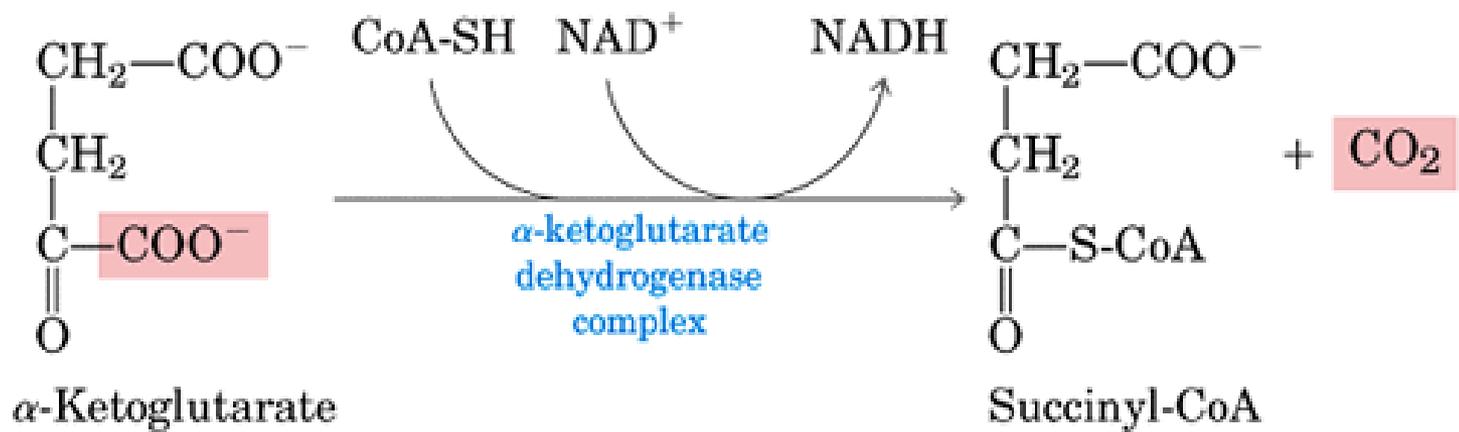


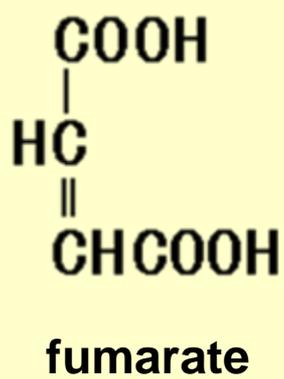
# (1) 反应过程



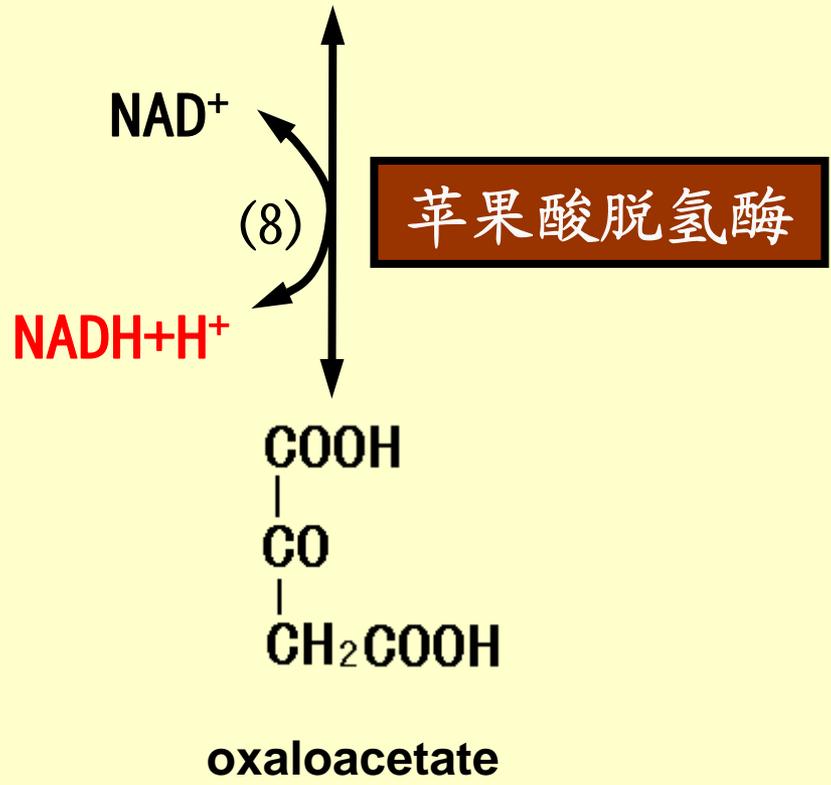
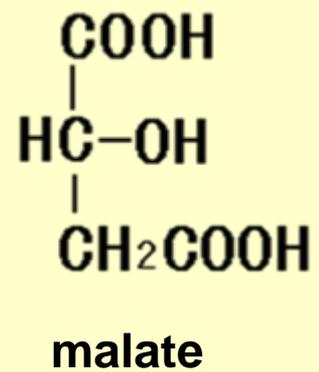
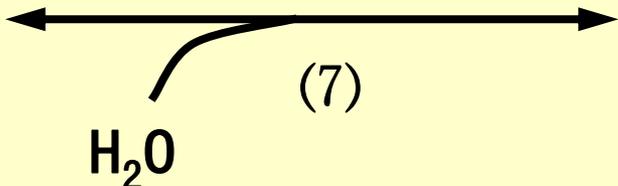


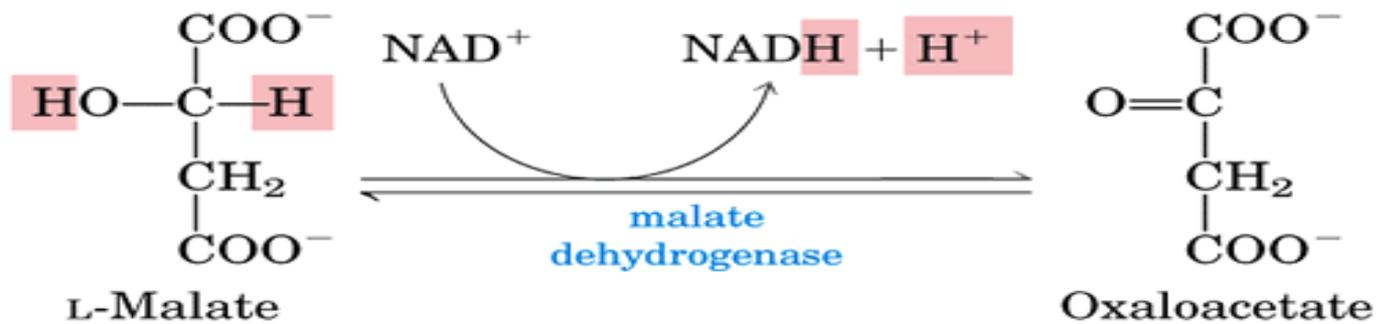
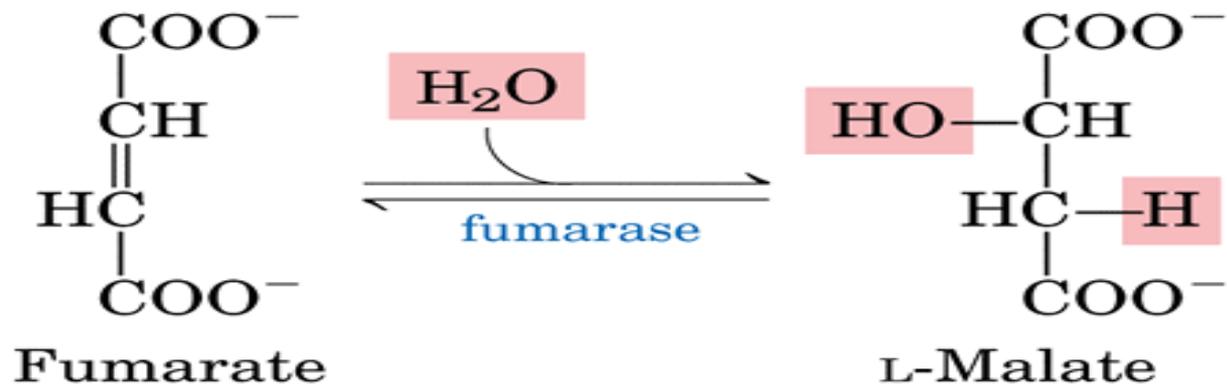




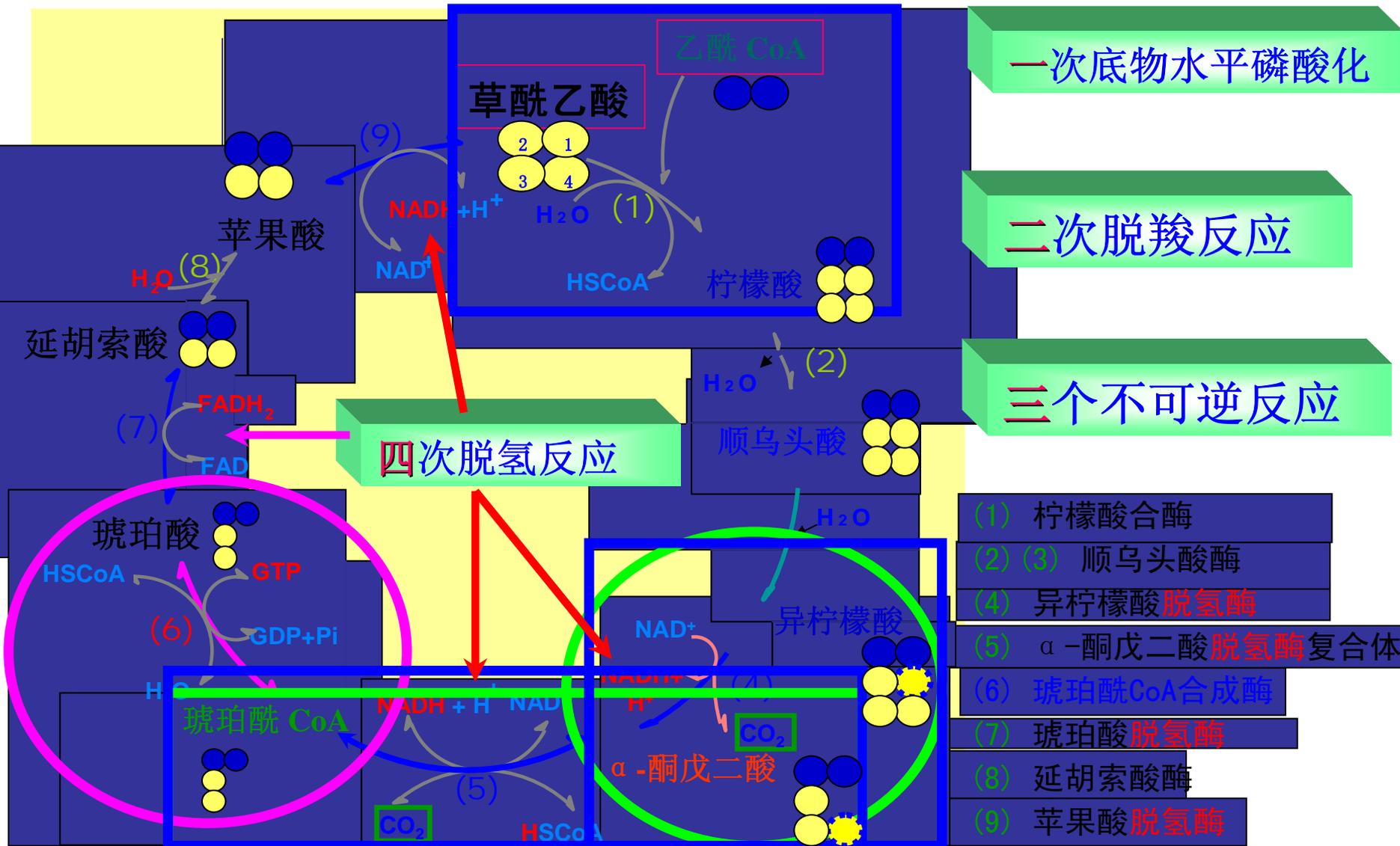


延胡索酸酶

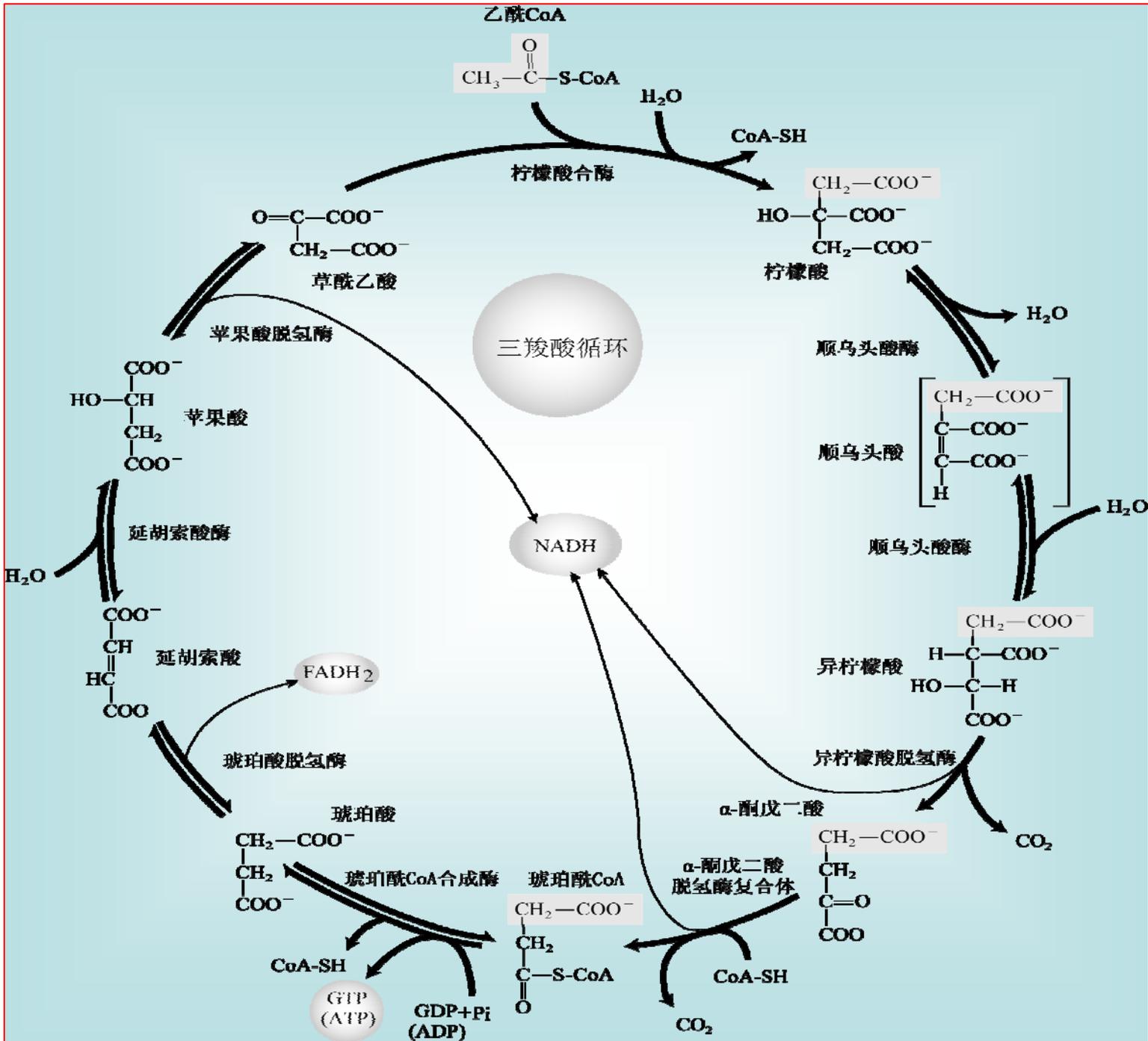




# 三羧酸循环



# 三羧酸循环反应



## (2) 三羧酸循环的特点

- ① 循环反应在**线粒体(mitochondrion)**中进行，为**不可逆反应**。
- ② 关键酶：**柠檬酸合酶，异柠檬酸脱氢酶， $\alpha$ -酮戊二酸脱氢酶复合体**。
- ③ 必须在**有氧**的条件下才能进行。

## ④每循环一周

- ◆ 消耗一分子乙酰**CoA**，**2**分子水
- ◆ 一次底物水平的磷酸化：**1**分子**GTP**
- ◆ 二次脱羧反应：**2**分子**CO<sub>2</sub>**
- ◆ 三个调节位点：**三步不可逆反应**
- ◆ 四次脱氢：**(3分子NADH+H<sup>+</sup>、1分子FADH<sub>2</sub>)**
- ◆ 每循环一周产生**10(9ATP+1GTP)**个**ATP**、**2**个**CO<sub>2</sub>**。

⑤三羧酸循环的中间产物不会因参与循环而被消耗，但可以参加其他代谢而被消耗。

⑥以CO<sub>2</sub>方式失去的碳并不是来自乙酰基的两个碳而是来自草酰乙酸



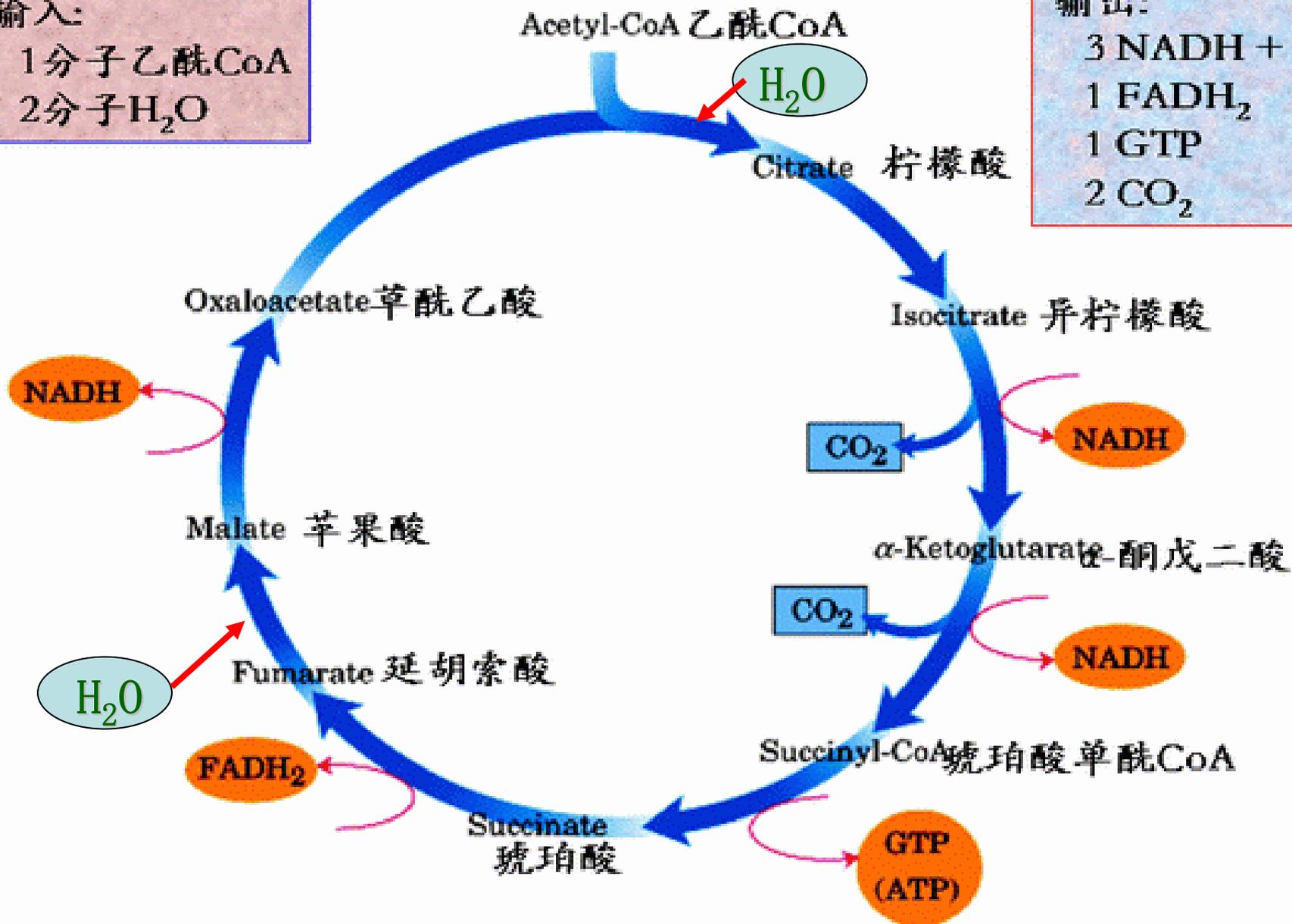
# 一轮三羧酸循环的总结算

输入:

1分子乙酰CoA  
2分子H<sub>2</sub>O

输出:

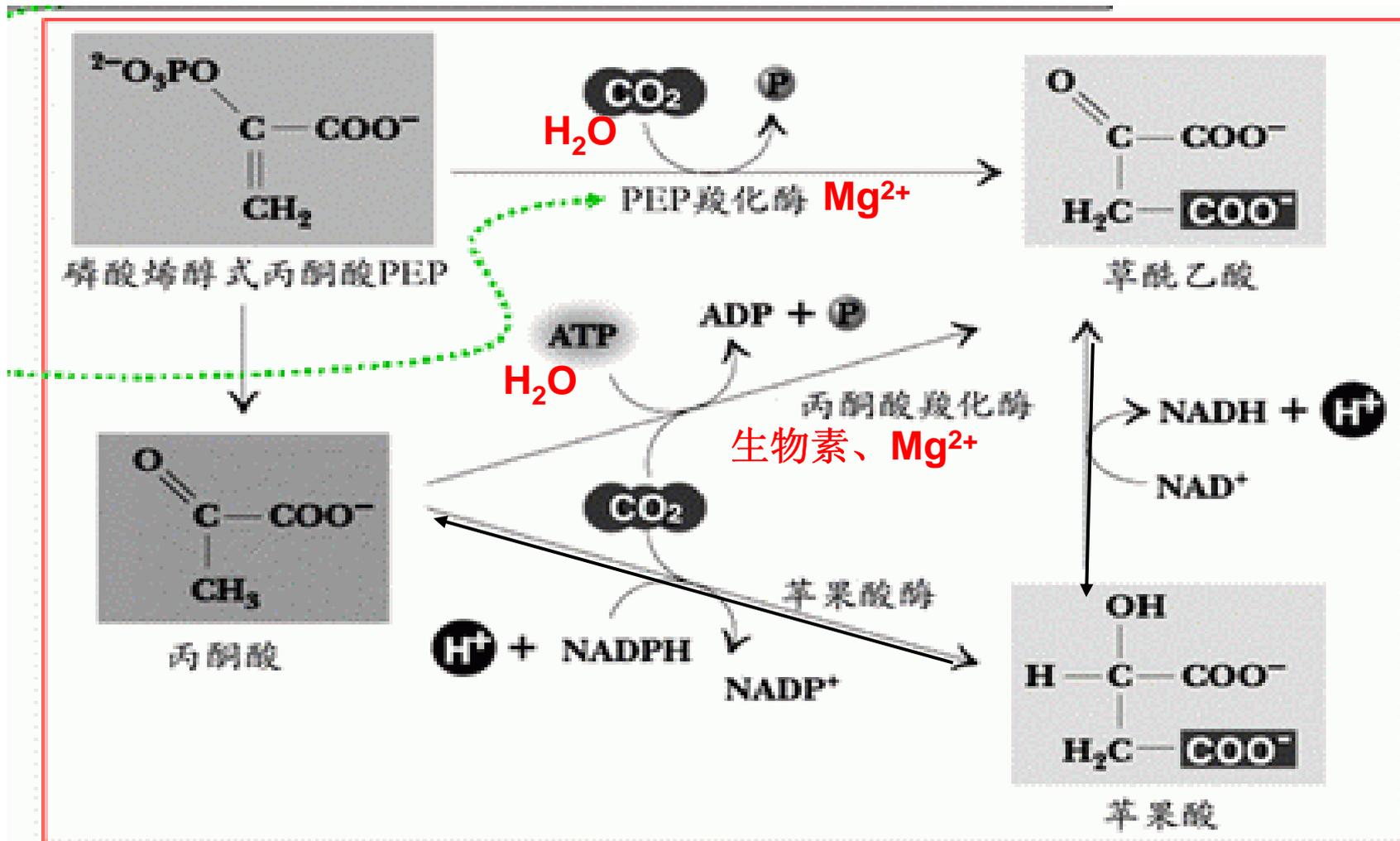
3 NADH + H<sup>+</sup>  
1 FADH<sub>2</sub>  
1 GTP  
2 CO<sub>2</sub>



### (3) 三羧酸循环的生理意义

- ① 是三大营养物质氧化分解的共同途径;
- ② 是三大营养物质代谢联系的枢纽;
- ③ 为其它物质代谢提供小分子前体;
- ④ 为机体提供能量: ATP和还原力 $\text{NADH}+\text{H}^+$

## (4) 草酰乙酸的回补



## (二) 有氧氧化生成的ATP

	反 应	辅酶	ATP产生
第一阶段	葡萄糖 → 6-磷酸葡萄糖		-1
	6-磷酸果糖 → 1,6-二磷酸果糖		-1
	3-磷酸甘油醛 → 1,3-二磷酸甘油酸	NAD <sup>+</sup>	2.5 (或1.5) × 2
	1,3-二磷酸甘油酸 → 3-磷酸甘油酸		1 × 2
	磷酸烯醇式丙酮酸 → 丙酮酸		1 × 2
第二阶段	丙酮酸 → 乙酰辅酶A	NAD <sup>+</sup>	2.5 × 2
第三阶段	异柠檬酸 → α-酮戊二酸	NAD <sup>+</sup>	2.5 × 2
	α-酮戊二酸 → 琥珀酰辅酶A	NAD <sup>+</sup>	2.5 × 2
	琥珀酰辅酶A → 琥珀酸		1 × 2
	琥珀酸 → 延胡索酸	FAD	1.5 × 2
	苹果酸 → 草酰乙酸	NAD <sup>+</sup>	2.5 × 2
合 计			30或32

肝与心肌中，净产生：**32ATP**；在骨骼肌、脑细胞中，净产生：**30ATP**

### (三) 有氧氧化的调节

关键酶

酵解途径：己糖激酶

丙酮酸激酶

6-磷酸果糖激酶-1

丙酮酸的氧化脱羧：丙酮酸脱氢酶复合体

三羧酸循环：柠檬酸合酶

异柠檬酸脱氢酶

-酮戊二酸脱氢酶复合体

# 1. 丙酮酸脱氢酶复合体

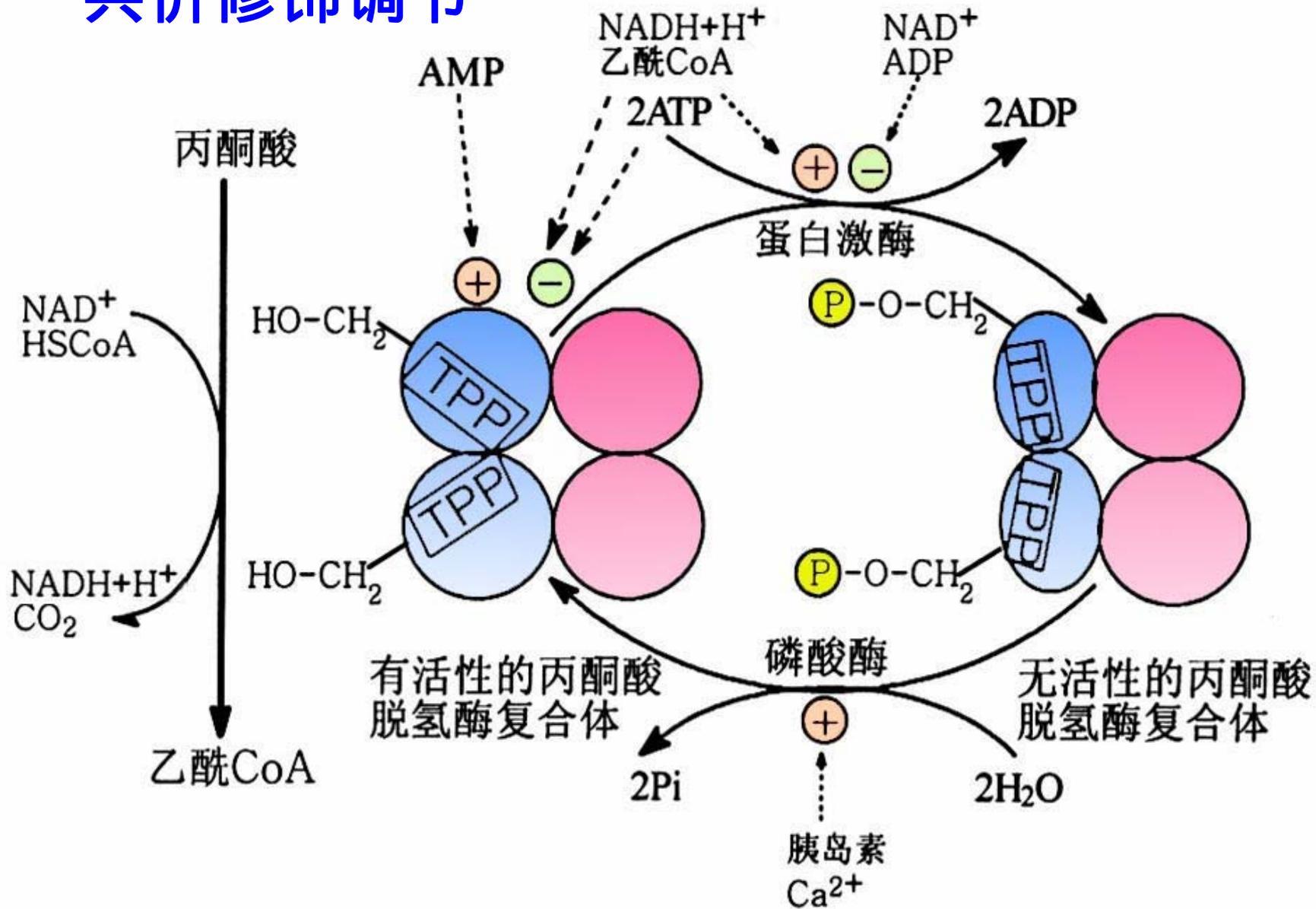
## 别构调节

◆ 别构抑制剂：乙酰CoA; NADH; ATP

◆ 别构激活剂：AMP; ADP; NAD<sup>+</sup>

乙酰CoA/HSCoA↑或 NADH/NAD<sup>+</sup>↑  
时，其活性也受到抑制。

# 共价修饰调节

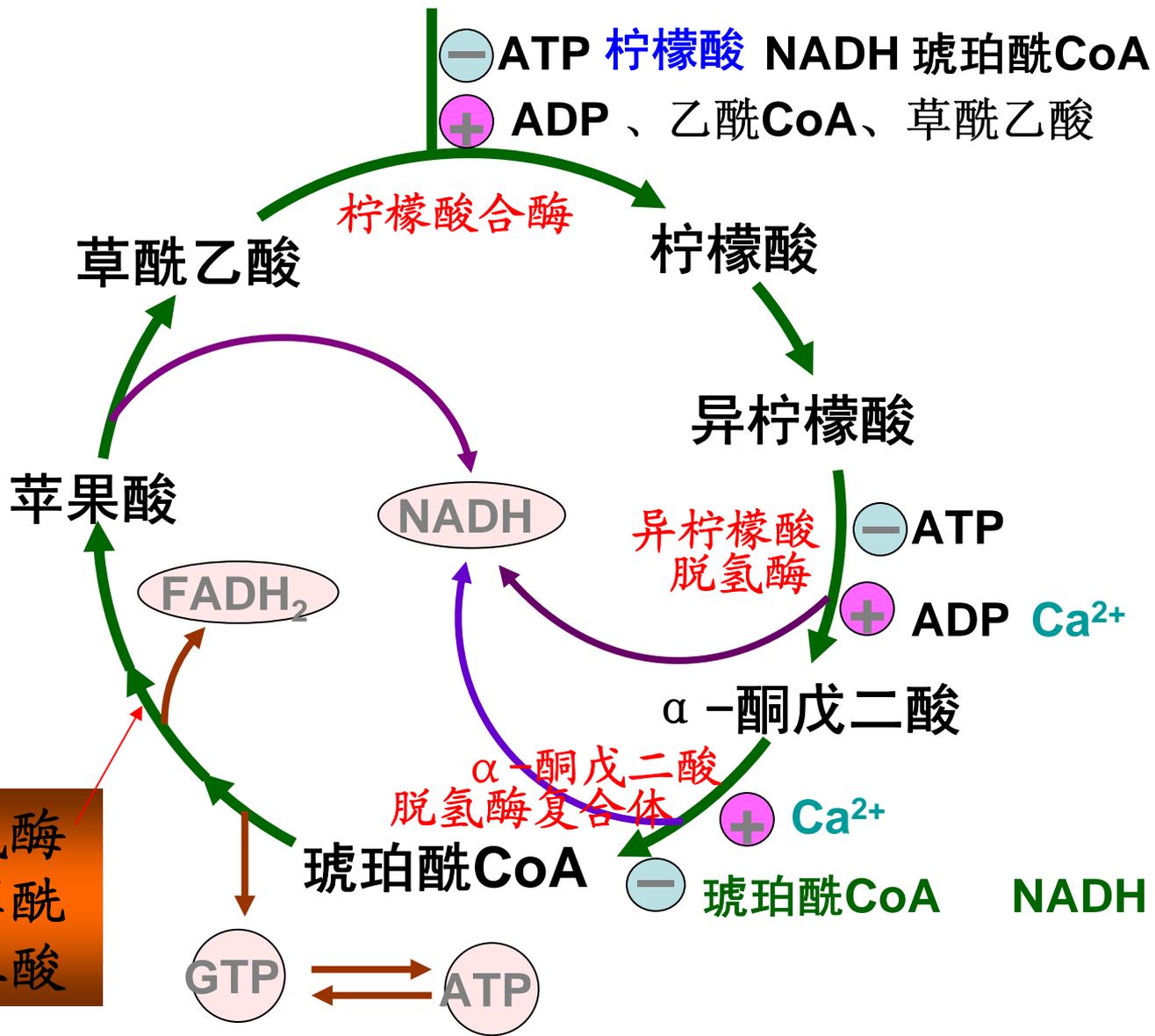


## 2. 三羧酸循环的调节

- ◆  $[ATP] / [ADP]$ ， $[NADH] / [NAD^+]$ 很高时，提示能量足够，三个限速酶活性被抑制；反之，这三个限速酶的活性被激活。
- ◆ 柠檬酸合酶受琥珀酰CoA及柠檬酸抑制。受乙酰CoA、草酰乙酸激活。
- ◆ 异柠檬酸脱氢酶，ADP是其变构激活剂
- ◆  $\alpha$ -酮戊二酸脱氢酶，被琥珀酰CoA抑制。



# 乙酰CoA



琥珀酸脱氢酶  
抑制剂：草酰  
乙酸、丙二酸

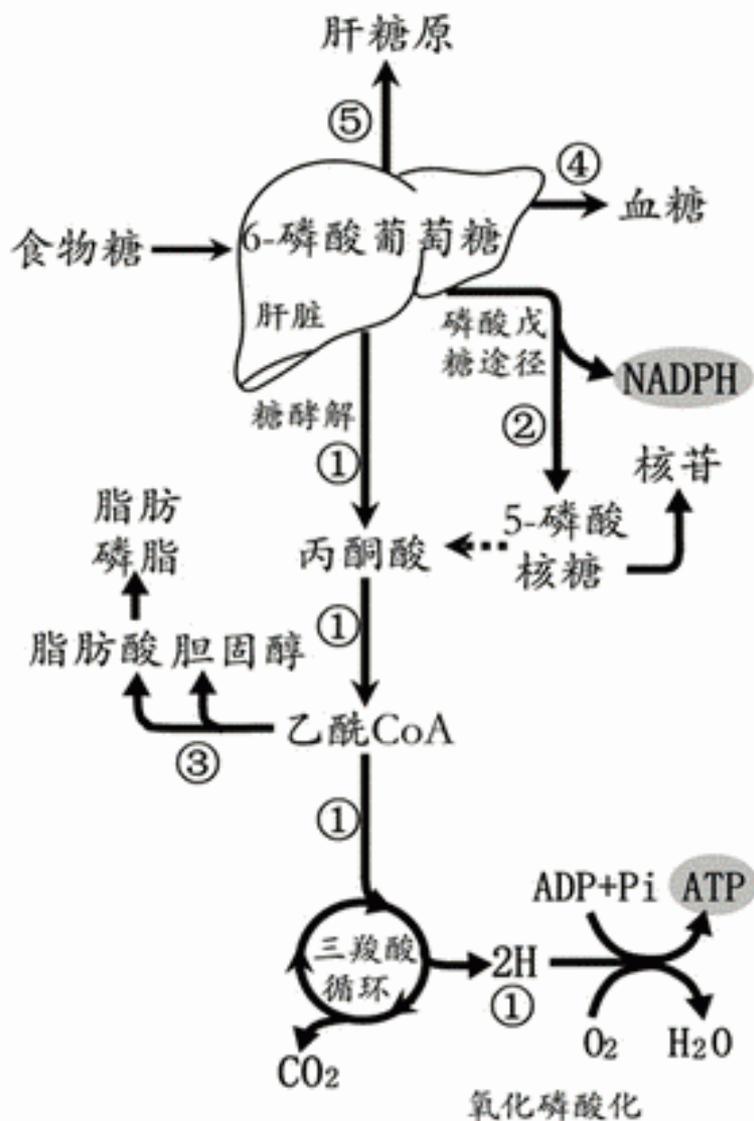
## (四)巴斯德效应与反巴斯德效应

- ◆ **巴斯德效应 (Pasteur effect)** 是指糖的有氧氧化可以抑制糖的无氧酵解的现象。
- ◆ 有氧时，由于无氧酵解产生的**NADH**和丙酮酸进入线粒体而产生**ATP**，抑制糖酵解中有关酶的活性，故糖的无氧酵解代谢受抑制。

# 反巴斯德效应效应

- 在癌细胞发现给予葡萄糖时不论供氧充足与否都呈现很强的酵解反应，而糖的有氧氧化受抑制，称为Crabtree效应或反巴斯德效应。
- 这种现象较普遍地存在于癌细胞中，此外也存在于一些正常组织细胞如视网膜、睾丸、颗粒白细胞等。

### 三、磷酸戊糖途径



### 磷酸戊糖支路

① 肝脏中约10~15%的葡萄糖进入该途径

② 场所：胞浆（细胞溶胶）

③ 氧化特征：辅酶为NADP<sup>+</sup>

④ 重要产物

a.NADPH，良好的还原剂

b.5-磷酸核糖：参与核酸合成

## (一) 概念

磷酸戊糖途径（**pentose phosphate pathway, PPP途径**），也称为**磷酸己糖支路**，指从**G-6-P**脱氢反应开始，经一系列代谢反应生成**磷酸戊糖**等中间代谢物，然后再重新进入糖氧化分解代谢途径的一条支代谢途径，在该条途径**无ATP生成**，但会生成具有重要生理功能的**NADPH + H<sup>+</sup>**。

❖ 发生的场所：**胞液**

## (二) 磷酸戊糖途径的反应过程

反应过程可分为二个阶段

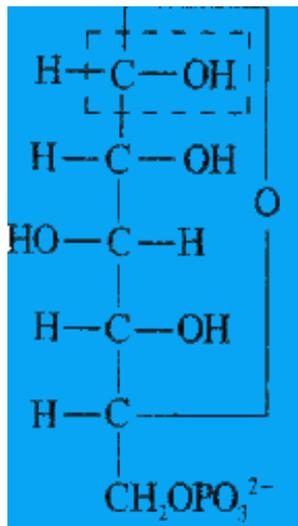
- ◆ 第一阶段：氧化反应

生成**磷酸戊糖**， **$\text{NADPH}+\text{H}^+$** 及 **$\text{CO}_2$**

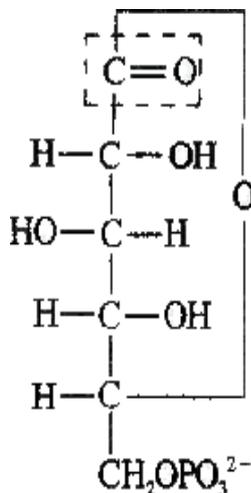
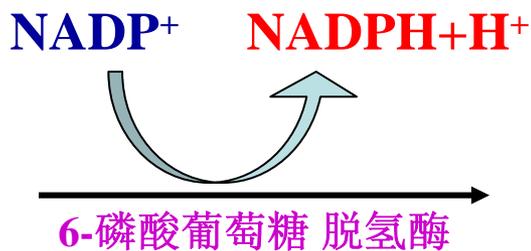
- ◆ 第二阶段非氧化反应

包括一系列基团转移反应（**转酮醇**反应和**转醛醇**反应）生成**3-磷酸甘油醛**和**6-磷酸果糖**。

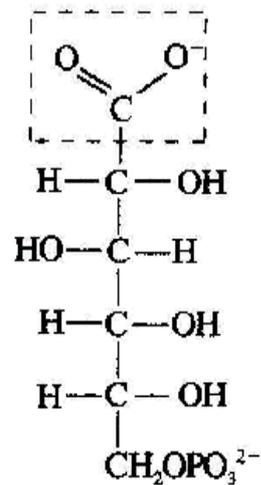
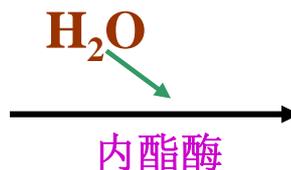
# 1、磷酸戊糖途径的氧化脱羧阶段



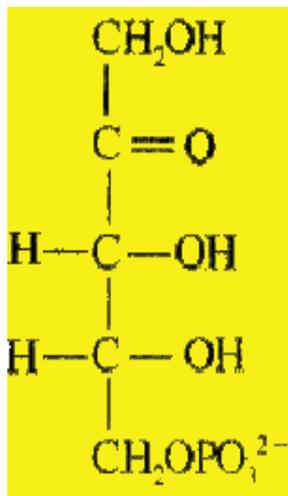
6-磷酸葡萄糖



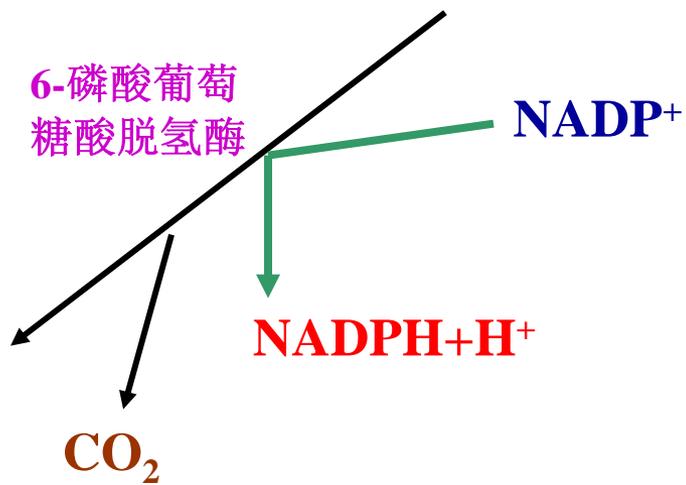
6-磷酸葡萄糖酸内酯

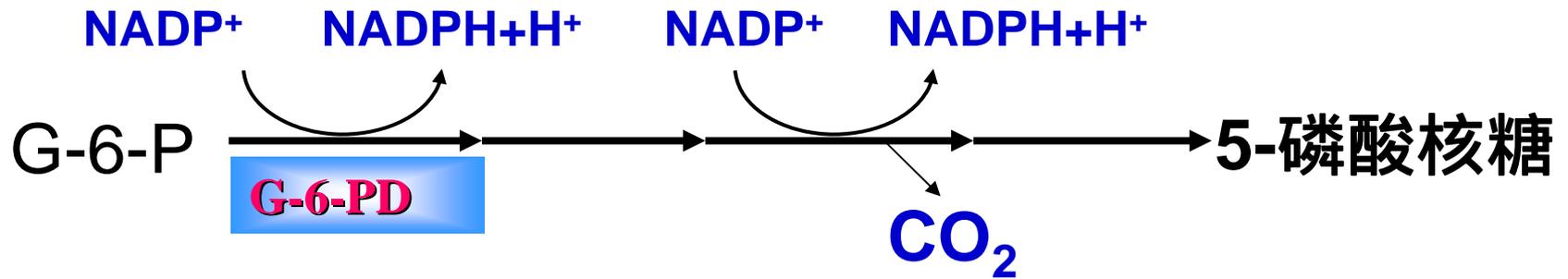


6-磷酸葡萄糖酸



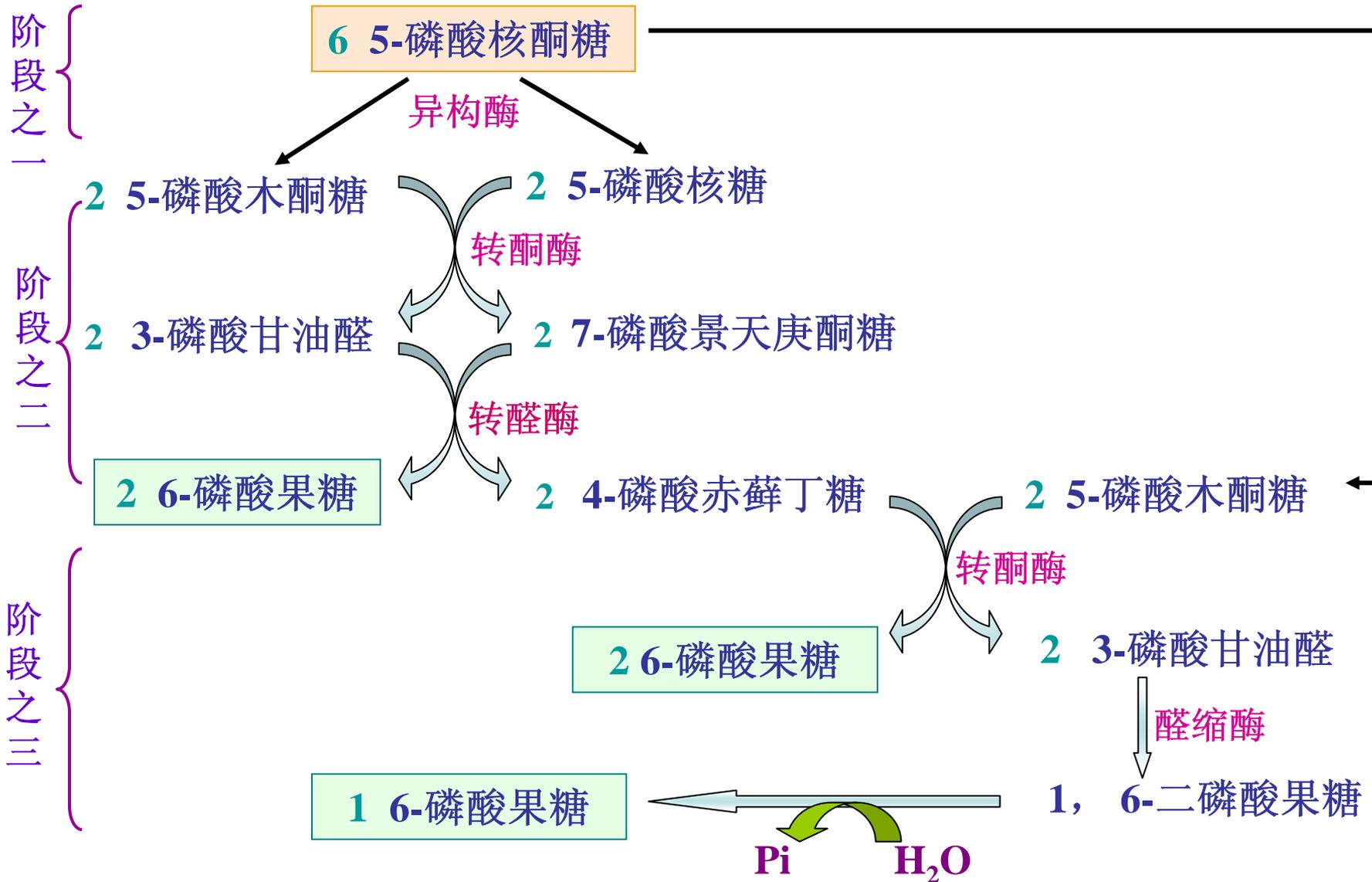
5-磷酸核酮糖





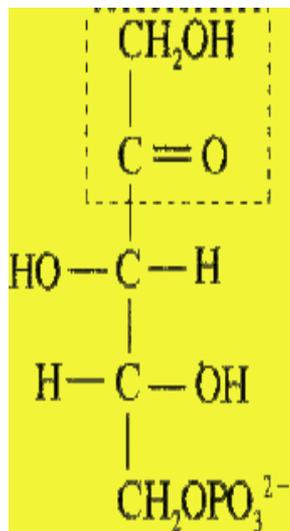
- 催化第一步脱氢反应的**6-磷酸葡萄糖脱氢酶**是此代谢途径的关键酶。
- 两次脱氢脱下的氢均由**NADP<sup>+</sup>**接受生成**NADPH + H<sup>+</sup>**。
- 反应生成的**磷酸核糖**是一个非常重要的中间产物。

## 2、磷酸戊糖途径的非氧化分子重排阶段

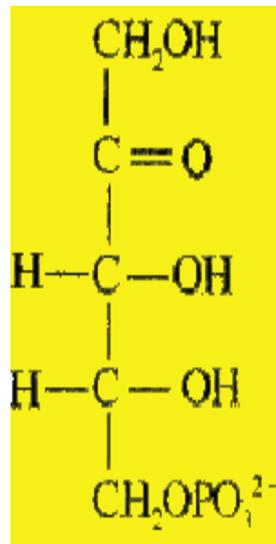


# 磷酸戊糖途径的非氧化阶段之一

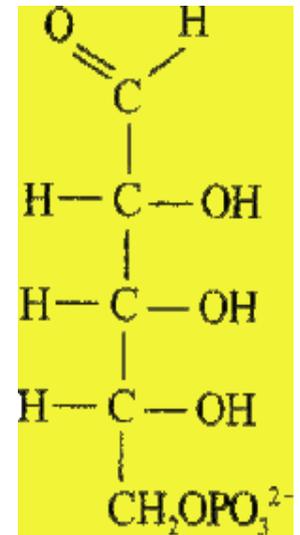
## (5-磷酸核酮糖异构化)



5-磷酸木酮糖

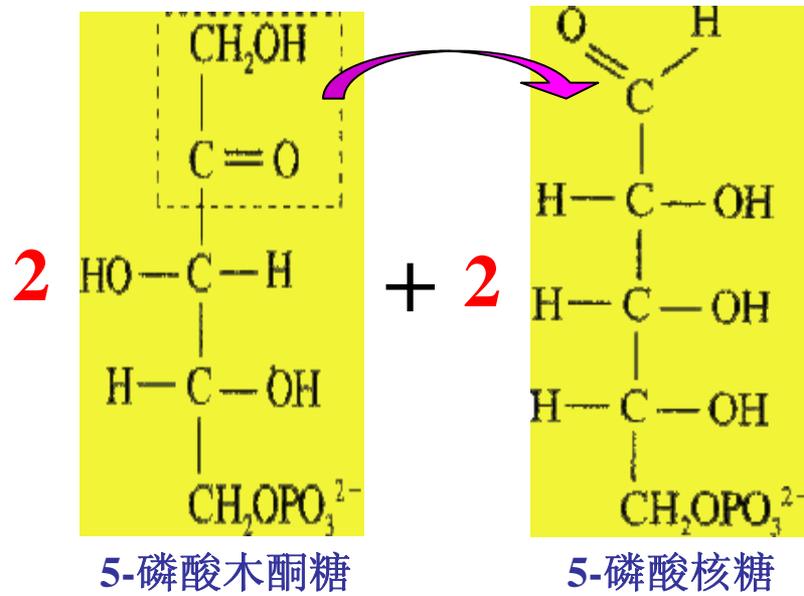


5-磷酸核酮糖

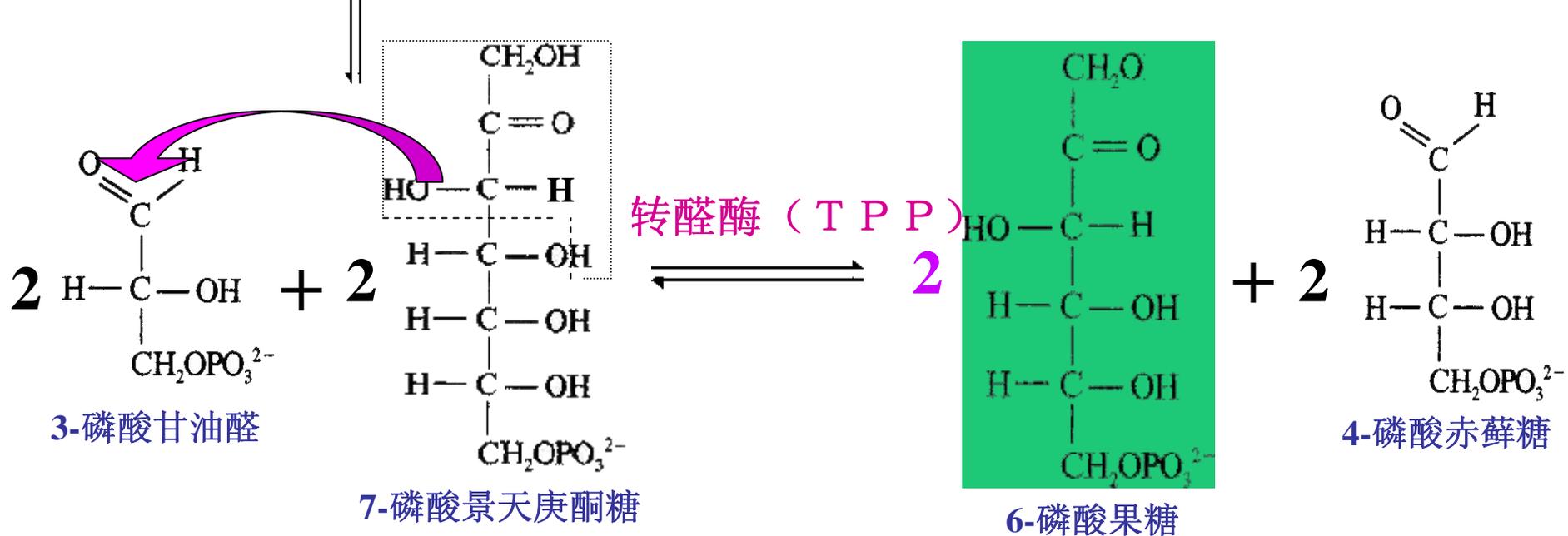


5-磷酸核糖

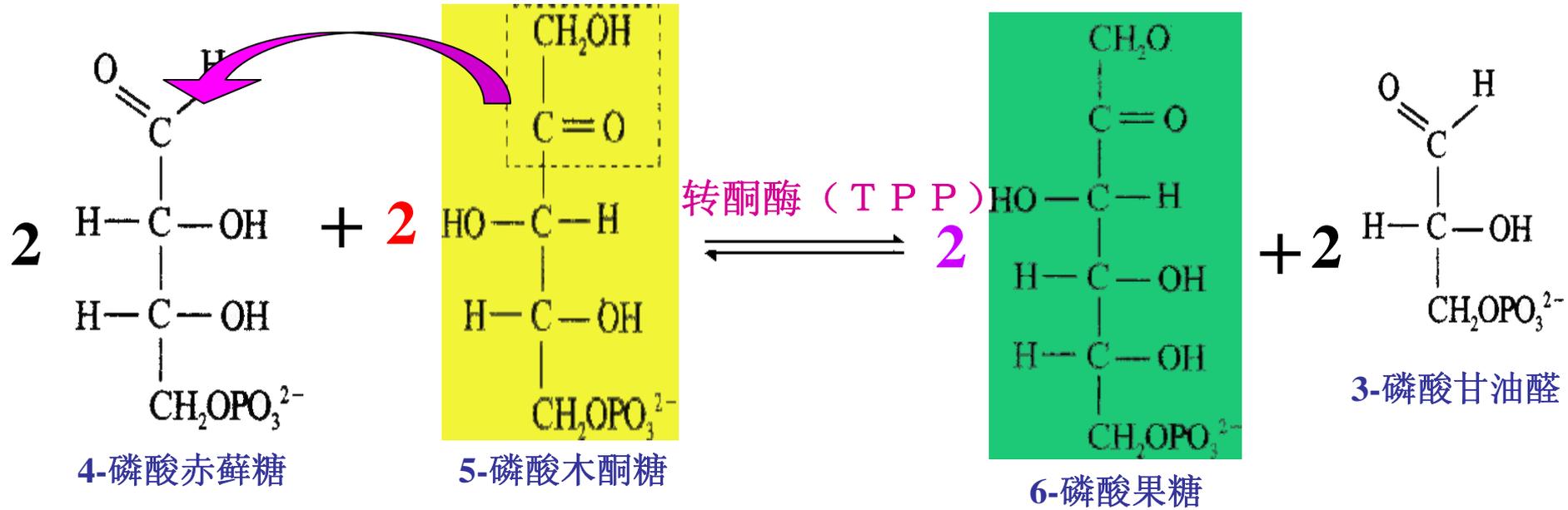
# 磷酸戊糖途径的非氧化阶段之二 (基团转移)



转酮酶 (T P P)

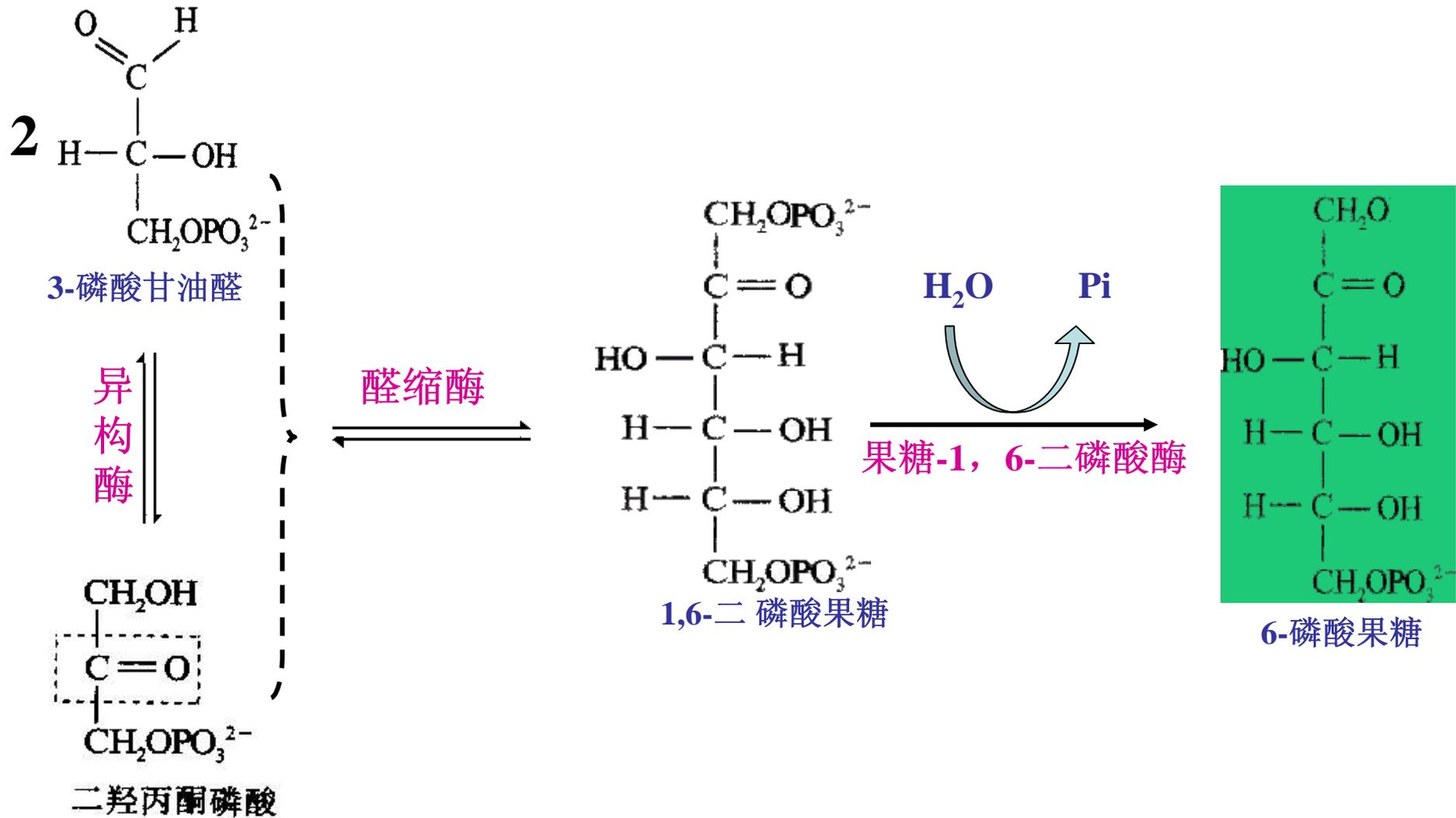


# 基团转移 (续前)



# 磷酸戊糖途径的非氧化阶段之三

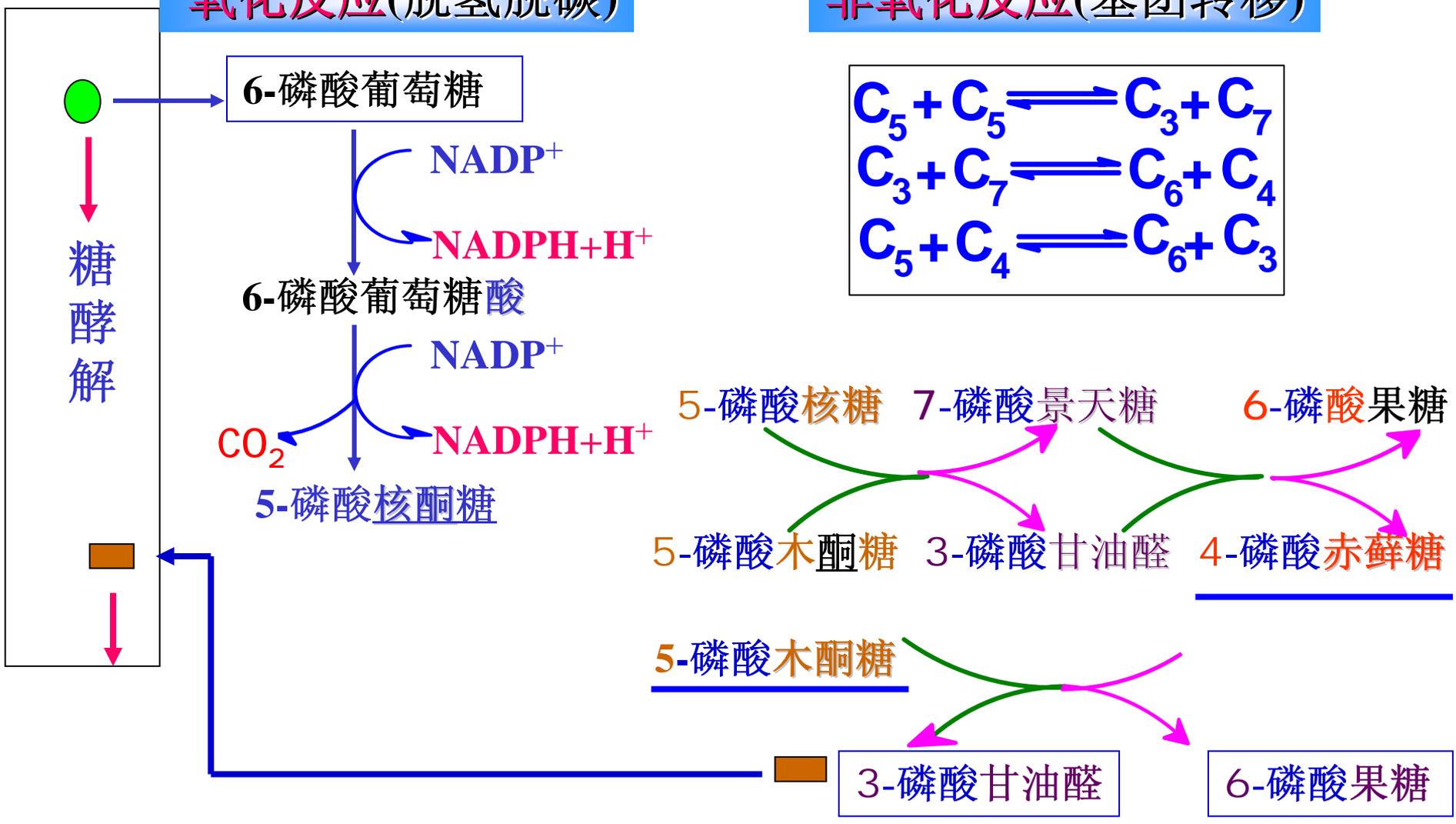
(3-磷酸甘油醛异构、缩合与水解)



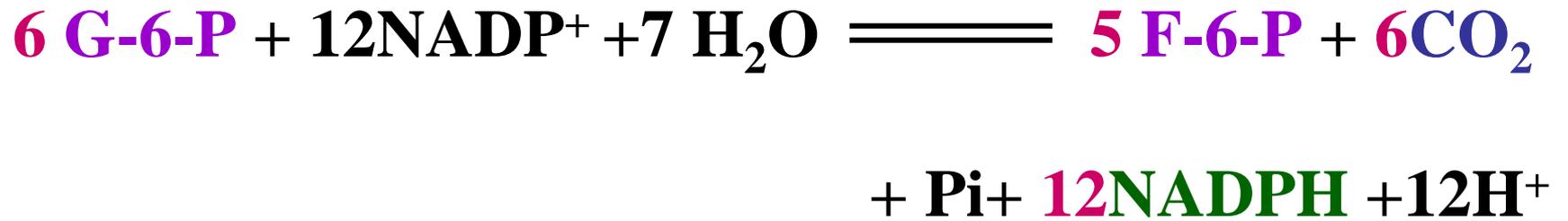
# 反应过程

## 氧化反应(脱氢脱碳)

## 非氧化反应(基团转移)



### (三)磷酸戊糖途径的总反应式



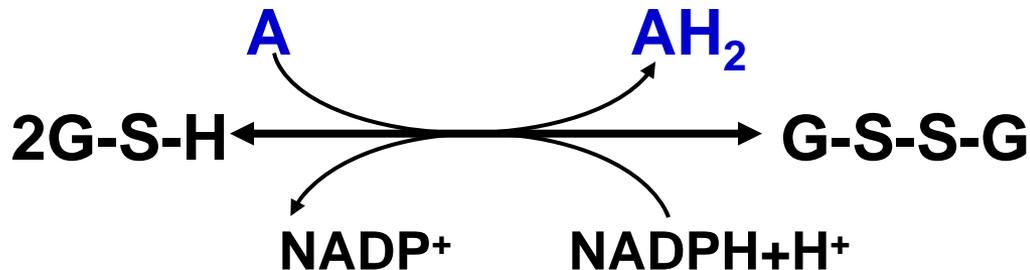
## (四)磷酸戊糖途径的特点

1. 脱氢反应以**NADP<sup>+</sup>**为受氢体，生成**NADPH+H<sup>+</sup>**。
2. 反应过程中进行了一系列酮基和醛基转移反应，经过了3、4、5、6、7碳糖的演变过程，反应中生成了重要的中间代谢物——**5-磷酸核糖**。
3. 一分子**G-6-P**经过反应，只能发生**一次脱羧**和**二次脱氢**反应，生成一分子**CO<sub>2</sub>**和**2分子NADPH+H<sup>+</sup>**。
4. 此途径并非生物体葡萄糖氧化供能的重要途径

## (五)磷酸戊糖途径的生理意义

- 1、为核苷酸的生成提供核糖
- 2、提供NADPH作为供氢体参与多种代谢反应

- ◆NADPH是体内许多合成代谢的供氢体
- ◆NADPH可维持红细胞内血红蛋白中的铁处于二价状态
- ◆NADPH可维持GSH的还原性，防止膜脂过氧化



3. 通过磷酸戊糖途径中的转酮醇基及转醛醇基反应，使不同个数碳原子的糖在体内得以互相转变。

## (六) 磷酸戊糖途径的调节

\*关键酶:

### 6-磷酸葡萄糖脱氢酶

此酶活性主要受 **NADPH/NADP<sup>+</sup>** 比值的影响，比值升高则被抑制，降低则被激活。

# 第三节 糖原的合成与分解

## ◆糖原 (glycogen)

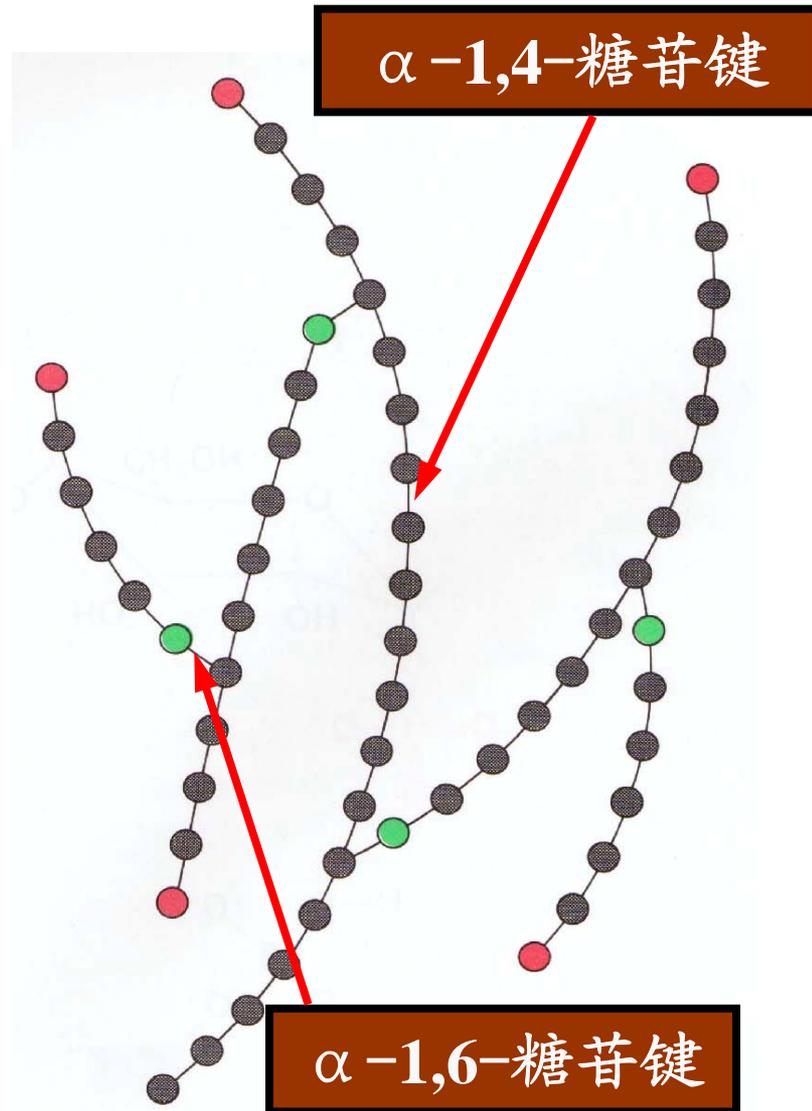
是**动物体内**糖的储存形式之一，是机体能迅速动用的能量储备。

## ◆糖原储存的主要器官及其生理意义

肌肉：肌糖原，主要供肌肉收缩所需

肝脏：肝糖原，维持血糖水平

## ◆糖原的结构特点及其意义



1. 葡萄糖单元以  $\alpha$ -1,4-糖苷键形成长链。
2. 约10个葡萄糖单元处形成分枝，分枝处葡萄糖以  $\alpha$ -1,6-糖苷键连接，分支增加，溶解度增加。
3. 每条链都终止于一个非还原端。非还原端增多，以利于其被酶分解。

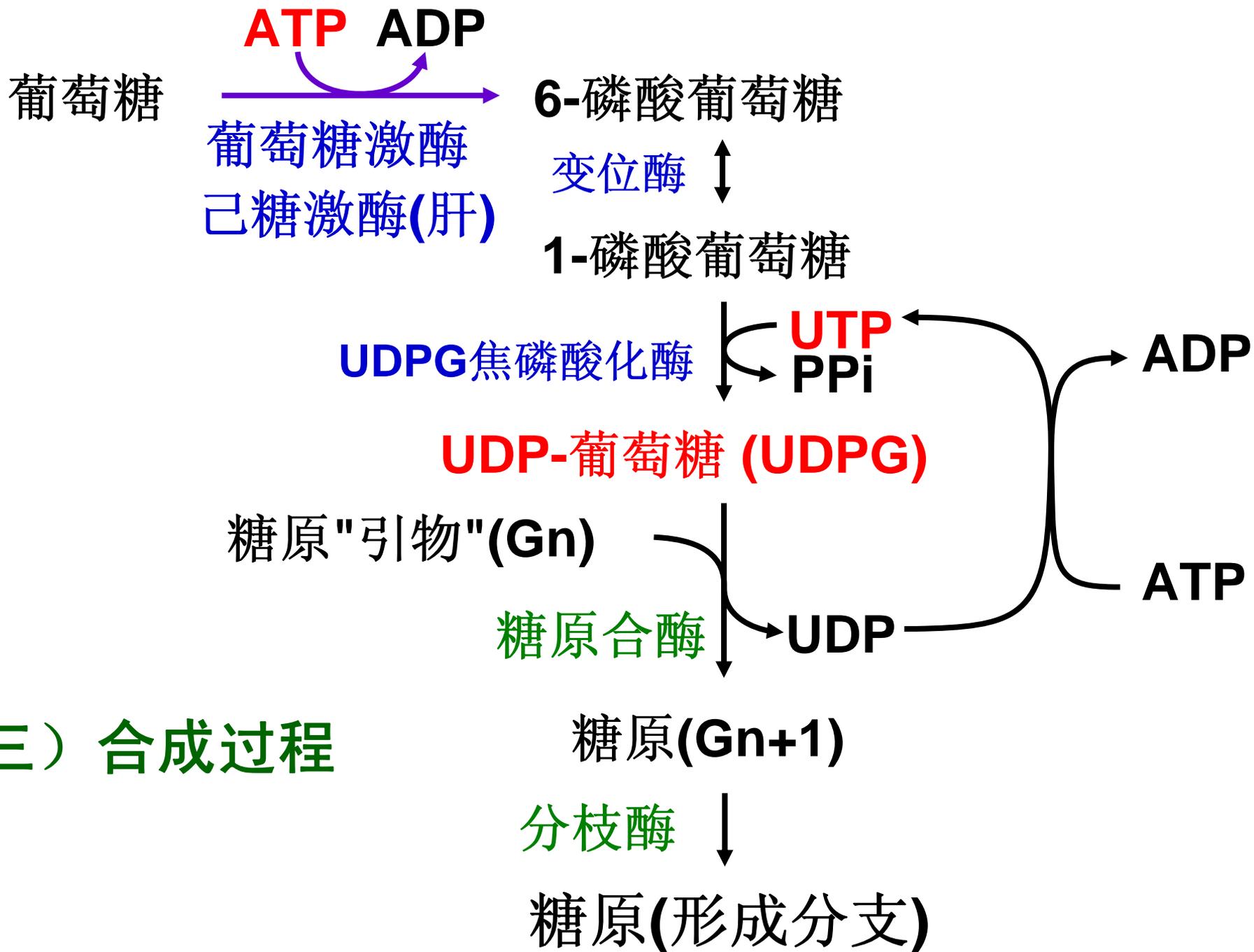
# 一、糖原的合成代谢

## （一）定义

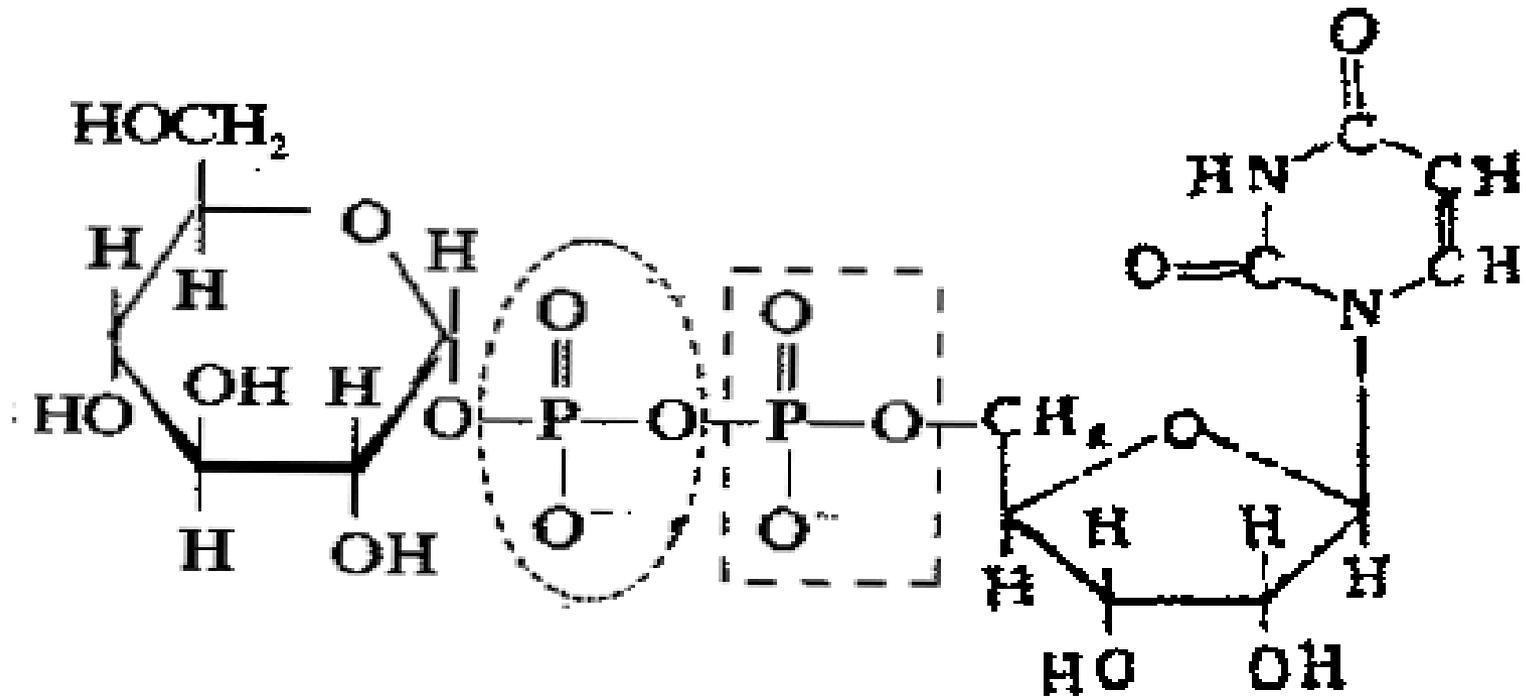
指由葡萄糖合成糖原的过程。

## （二）合成部位

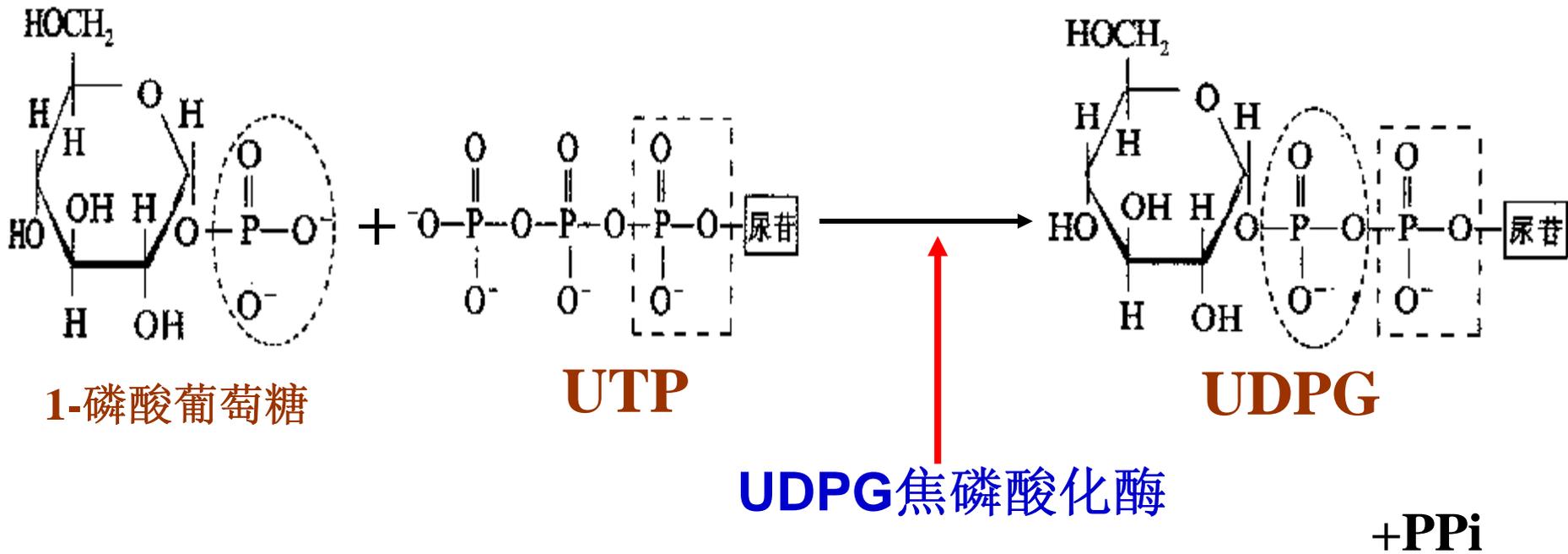
- 组织定位：主要在肝脏、肌肉
- 细胞定位：胞质



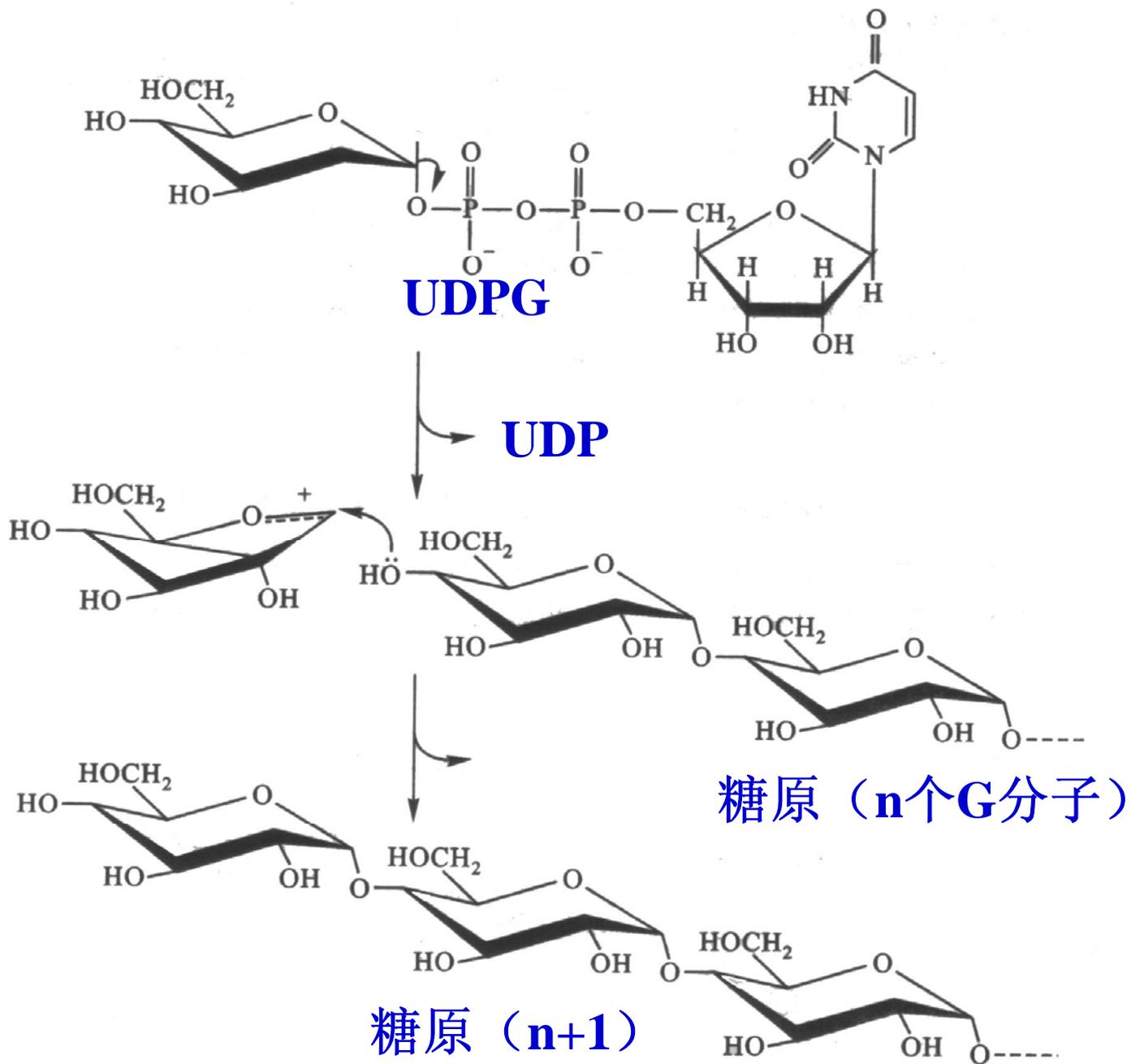
# UDPG的结构

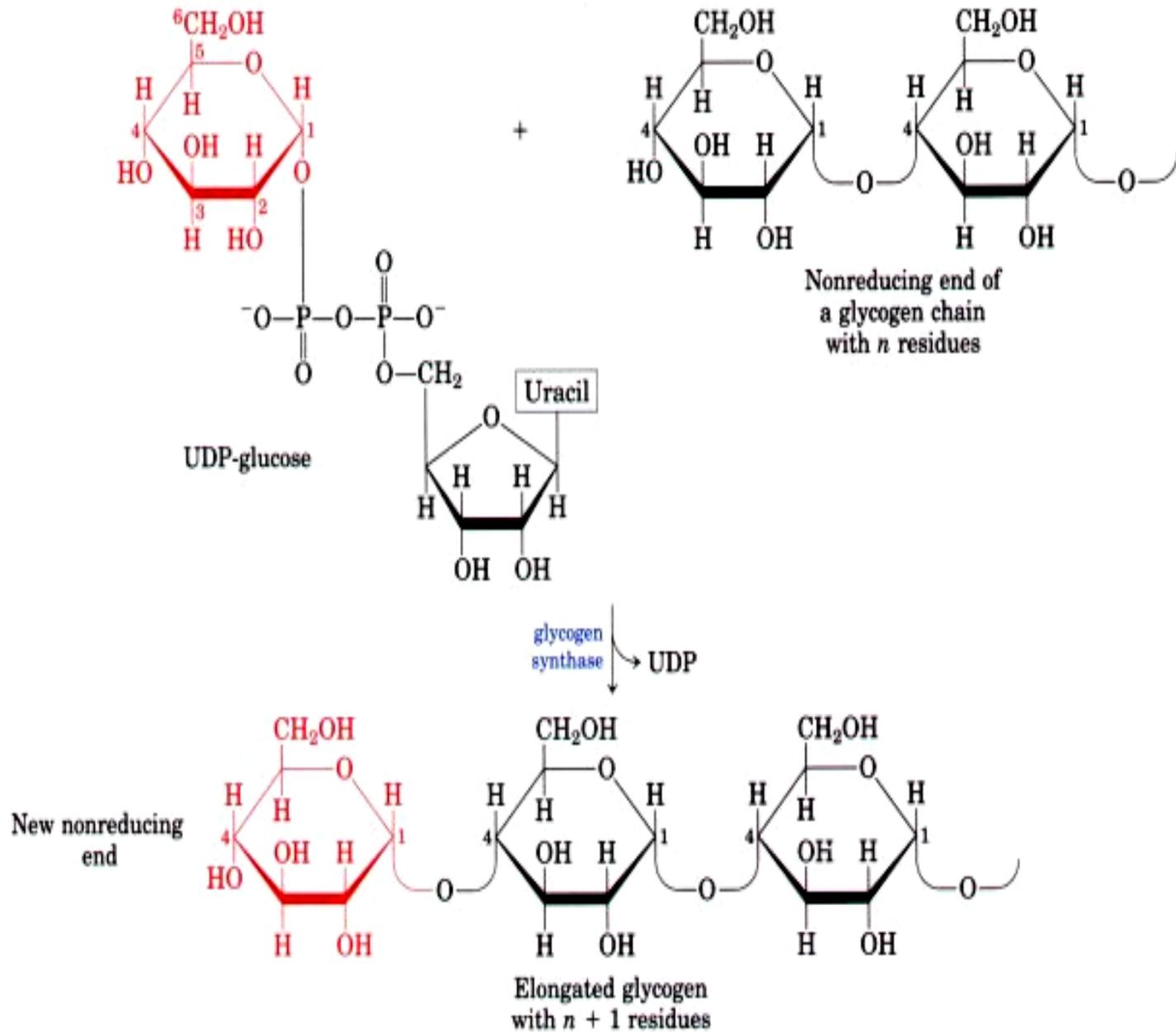


# 糖核苷酸的生成



# 糖原合酶反应

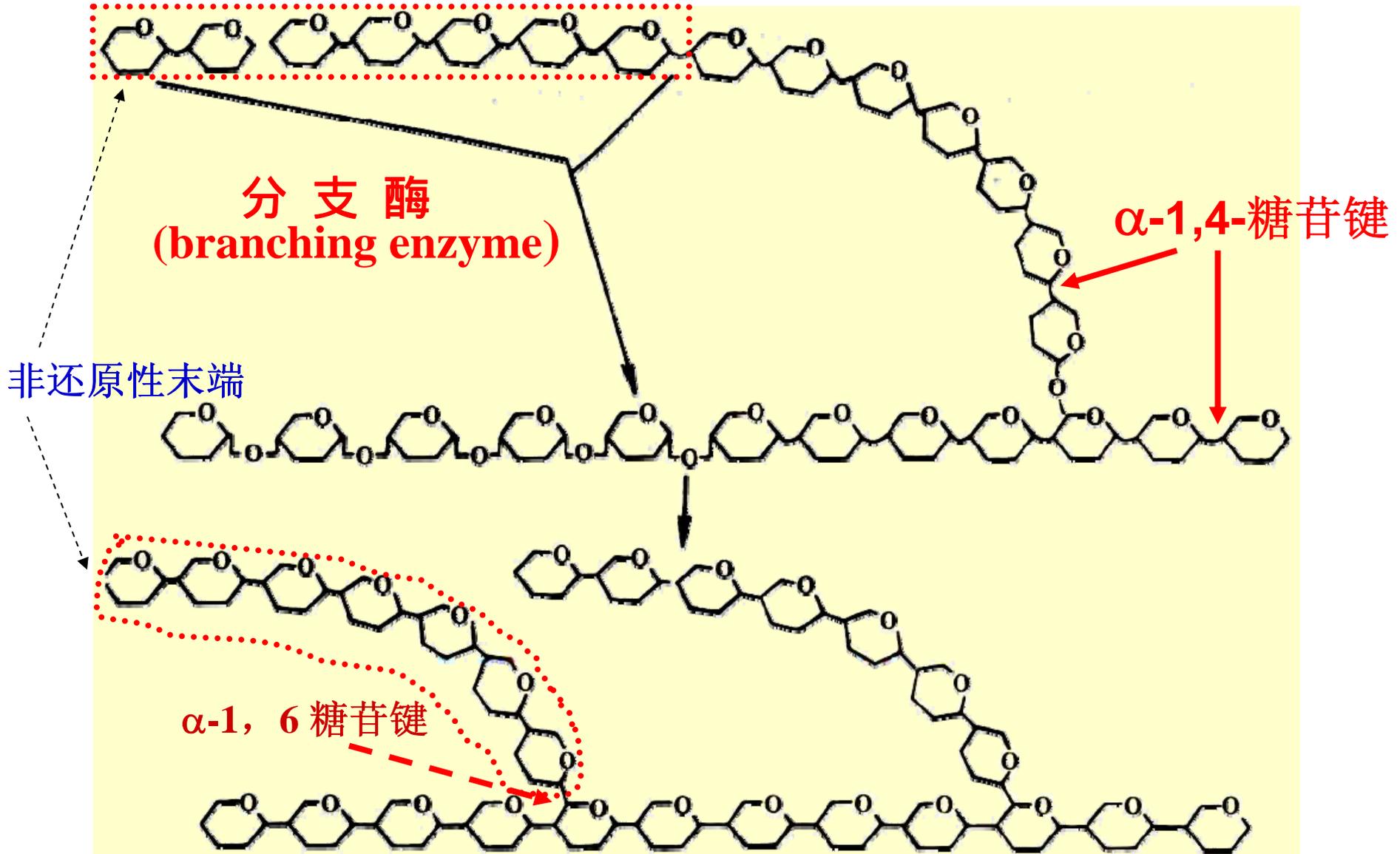




糖原n 为原有的细胞内的较小糖原分子，称为**糖原引物(primer)**，作为UDPG 上葡萄糖基的接受体。

近来人们在糖原分子的核心发现了一种名为**glycogenin的蛋白质**。Glycogenin可对其自身进行**共价修饰**，将**UDP-葡萄糖分子的C1**结合到自身特定的酪氨酸残基上，从而使它糖基化。这个结合上去的葡萄糖分子即成为糖原合成时的引物。

# 糖原新分支的形成



## （四）糖原合成的特点：

1. 必须以原有糖原分子作为引物；
2. 合成反应在糖原的非还原端进行；
3. 合成为一耗能过程，每增加一个葡萄糖残基，需消耗2个高能磷酸键（2分子ATP）；
4. 关键酶是糖原合酶
5. 需UTP参与（UDPG为葡萄糖的供体及活性形式）。

## 二、糖原的分解代谢

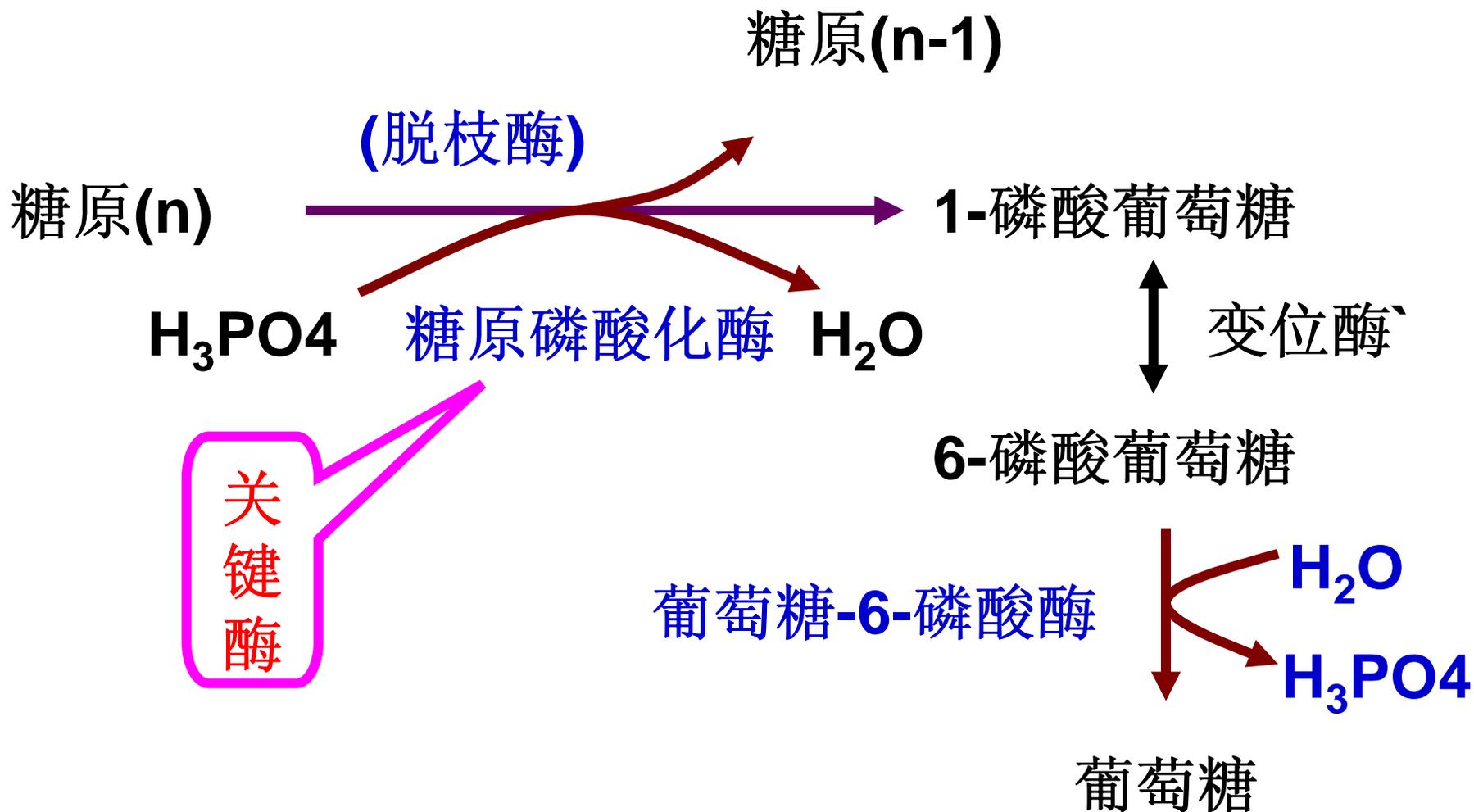
### (一)定义:

指肝糖原分解成为葡萄糖的过程。

### (二)亚细胞定位:

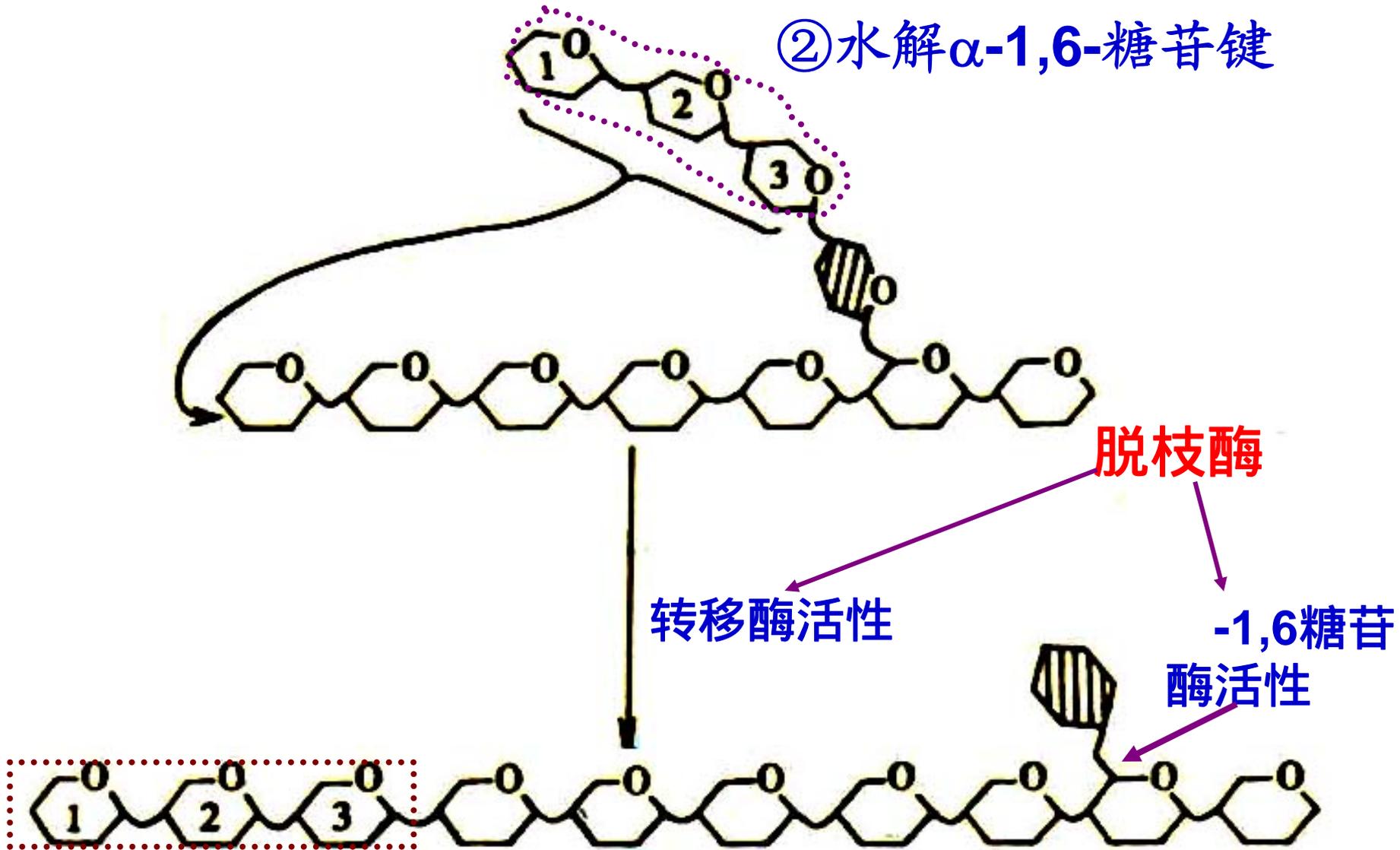
胞 质

### (三)糖原分解的基本过程

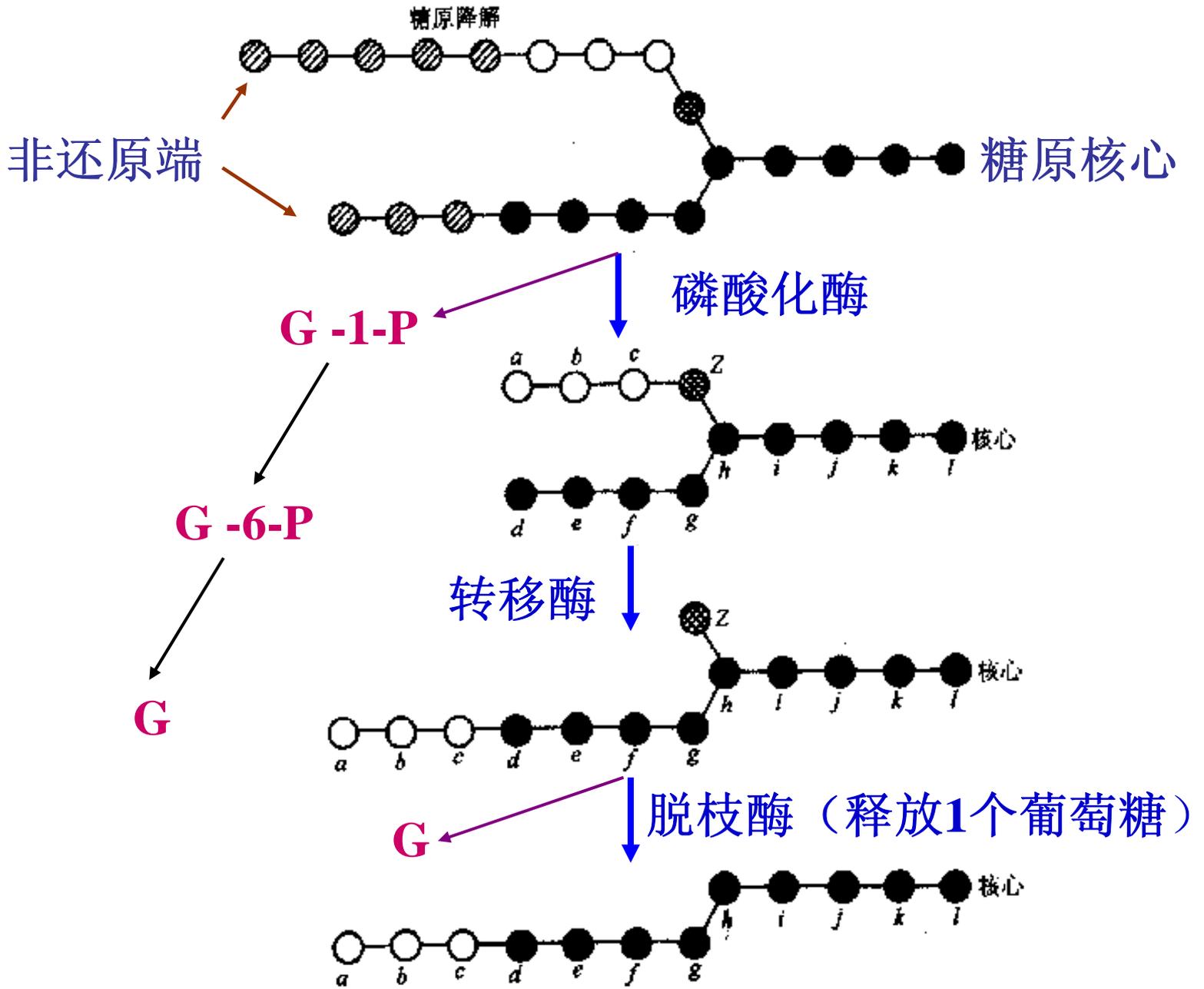


①转移葡萄糖残基

②水解 $\alpha$ -1,6-糖苷键



# 糖原磷酸解的步骤



## 脱磷酸：

由**葡萄糖-6-磷酸酶**(glucose-6-phosphatase)催化，生成自由葡萄糖。

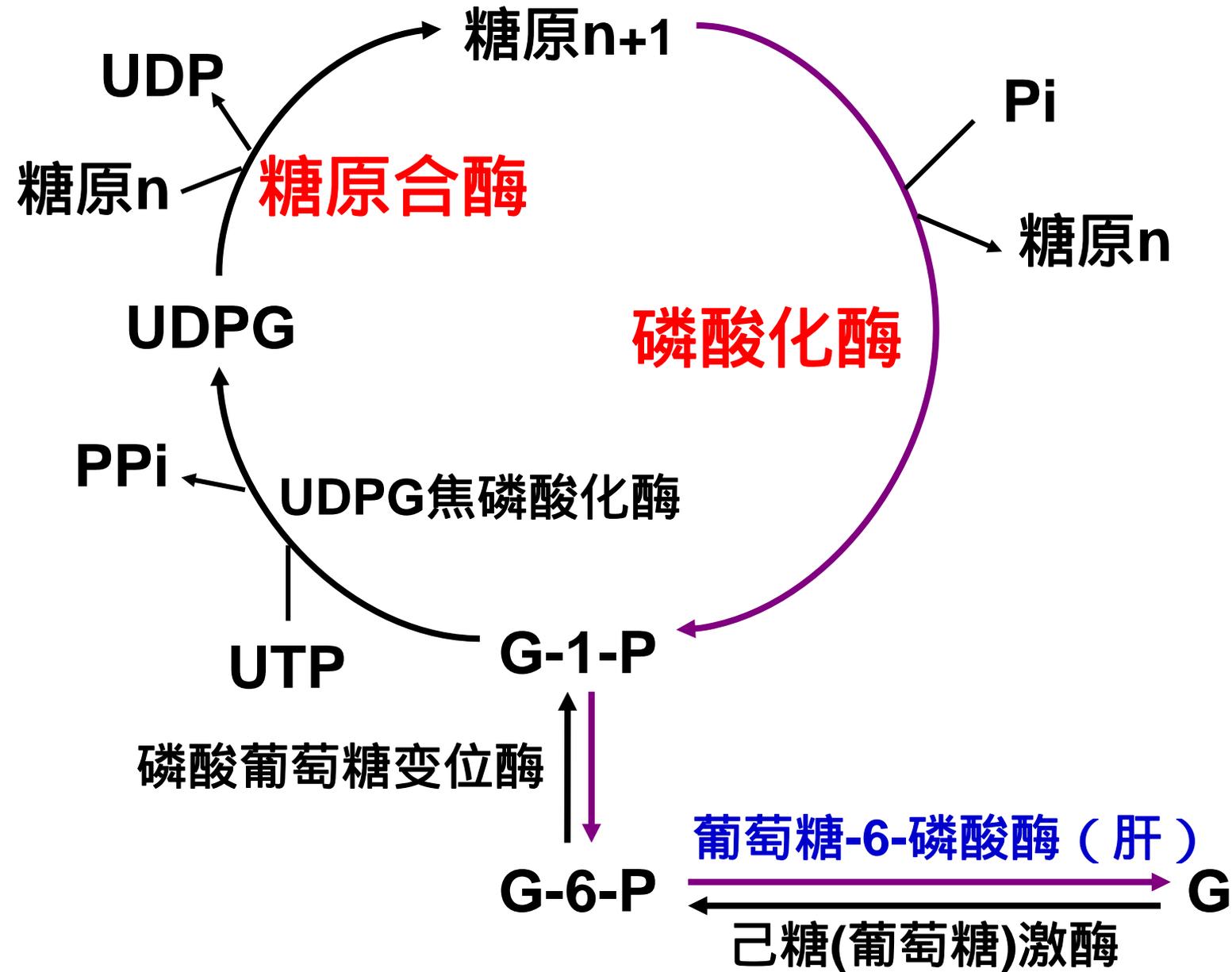
该酶只存在于**肝及肾**中。**肌肉组织中不存在葡萄糖-6-磷酸酶**，所以生成的**6-磷酸葡萄糖**不能转变成葡萄糖释放入血，提供血糖，而只能进入酵解途径进一步代谢。



## （四）糖原分解的特点：

1. 水解反应在糖原的**非还原端**进行；
2. 是一**非耗能**过程；
3. 关键酶是**糖原磷酸化酶**；
4. 在肌肉中缺乏**葡萄糖-6-磷酸酶**活性，  
因此肌糖原不能分解成葡萄糖

# (五) 糖原的合成与分解总图



### 三、糖原合成与分解的调节

关键酶

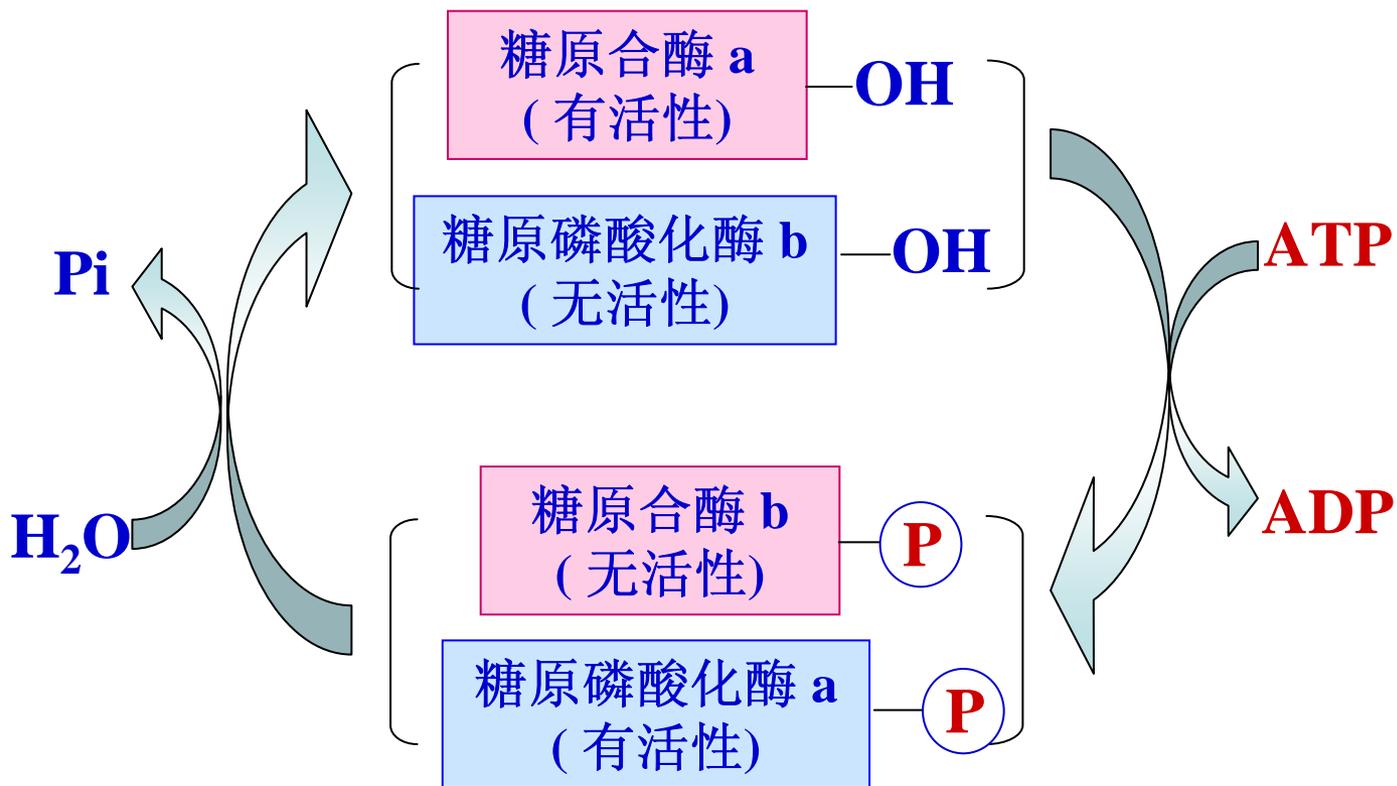
糖原合成：糖原合成酶

糖原分解：糖原磷酸化酶

它们的快速调节有共价修饰和变构调节二种方式。

# 1、共价修饰调节

糖原磷酸化酶磷酸化了有活性，而糖原合酶磷酸化了无活性，有活性用**a**表示，无活性用**b**表示。



## 2、别构调节：

- ◆ 葡萄糖6-磷酸可激活糖原合酶，抑制糖原磷酸化酶；
- ◆ ATP和葡萄糖是糖原磷酸化酶变构抑制剂；
- ◆ AMP是糖原磷酸化酶的变构激活剂。

# 四、糖异生

## (一) 概念

糖异生(gluconeogenesis)是指从非糖化合物转变为葡萄糖或糖原的过程。

## (二) 部位

主要在肝、肾细胞的胞浆及线粒体

## (三) 原料

主要有有机酸(乳酸、丙酮酸及三羧酸循环中各种羧酸)、甘油、生糖氨基酸等。

## (四) 糖异生过程

糖异生主要沿酵解途径逆行，仅有三步反应为不可逆反应，需经其他的代谢反应绕行。

### 1. G-6-P → G :

由葡萄糖-6-磷酸酶催化进行水解。该酶不存在于肌肉组织中，故肌肉组织不能生成自由葡萄糖。



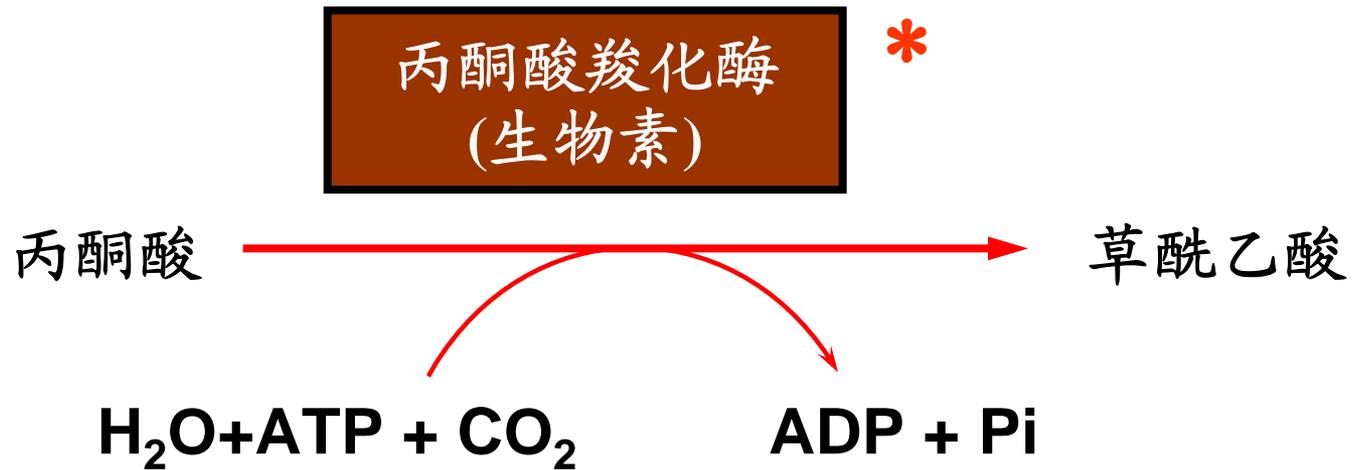
## 2. F-1,6-BP → F-6-P:



## 3. 丙酮酸 → 磷酸烯醇式丙酮酸:

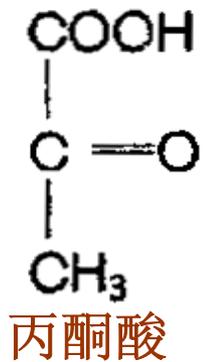
经由丙酮酸羧化支路完成。

(1) 丙酮酸 → 草酰乙酸:

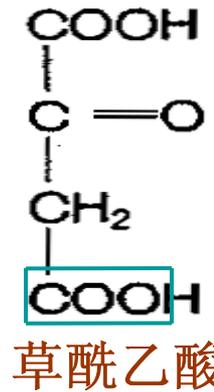


(2) 草酰乙酸 → 磷酸烯醇式丙酮酸(PEP):

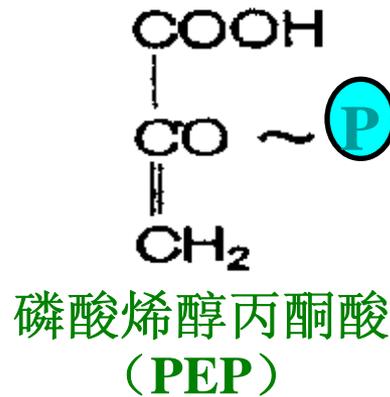




丙酮酸羧化酶



PEP羧激酶



胞液

PEP

GDP + CO<sub>2</sub>

GTP

磷酸烯醇型丙酮酸羧激酶

天冬氨酸

草酰乙酸

苹果酸

天冬氨酸

苹果酸

-酮戊二酸

谷氨酸

草酰乙酸

NAD<sup>+</sup>

NADH + H<sup>+</sup>

线粒体

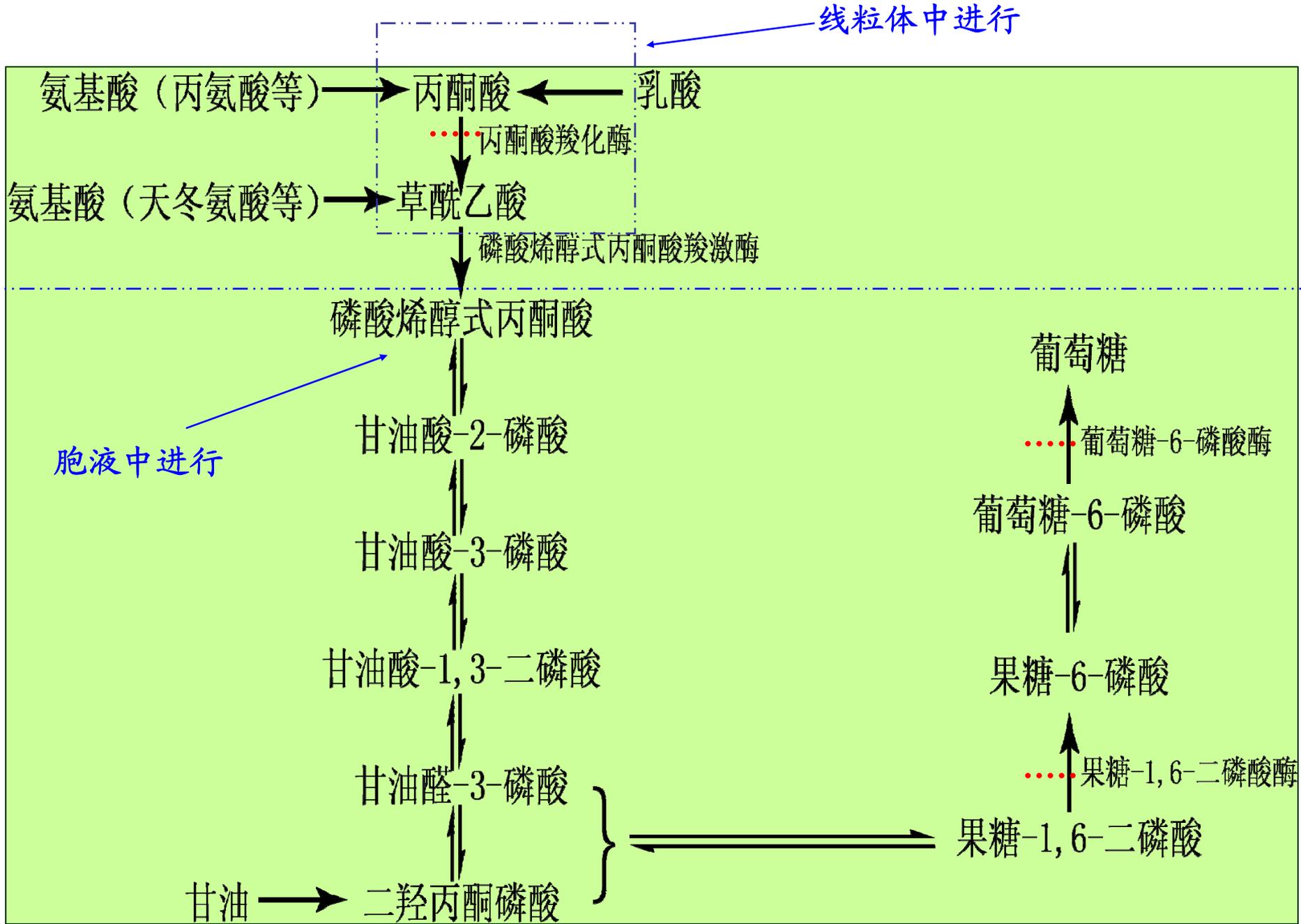
ADP + Pi

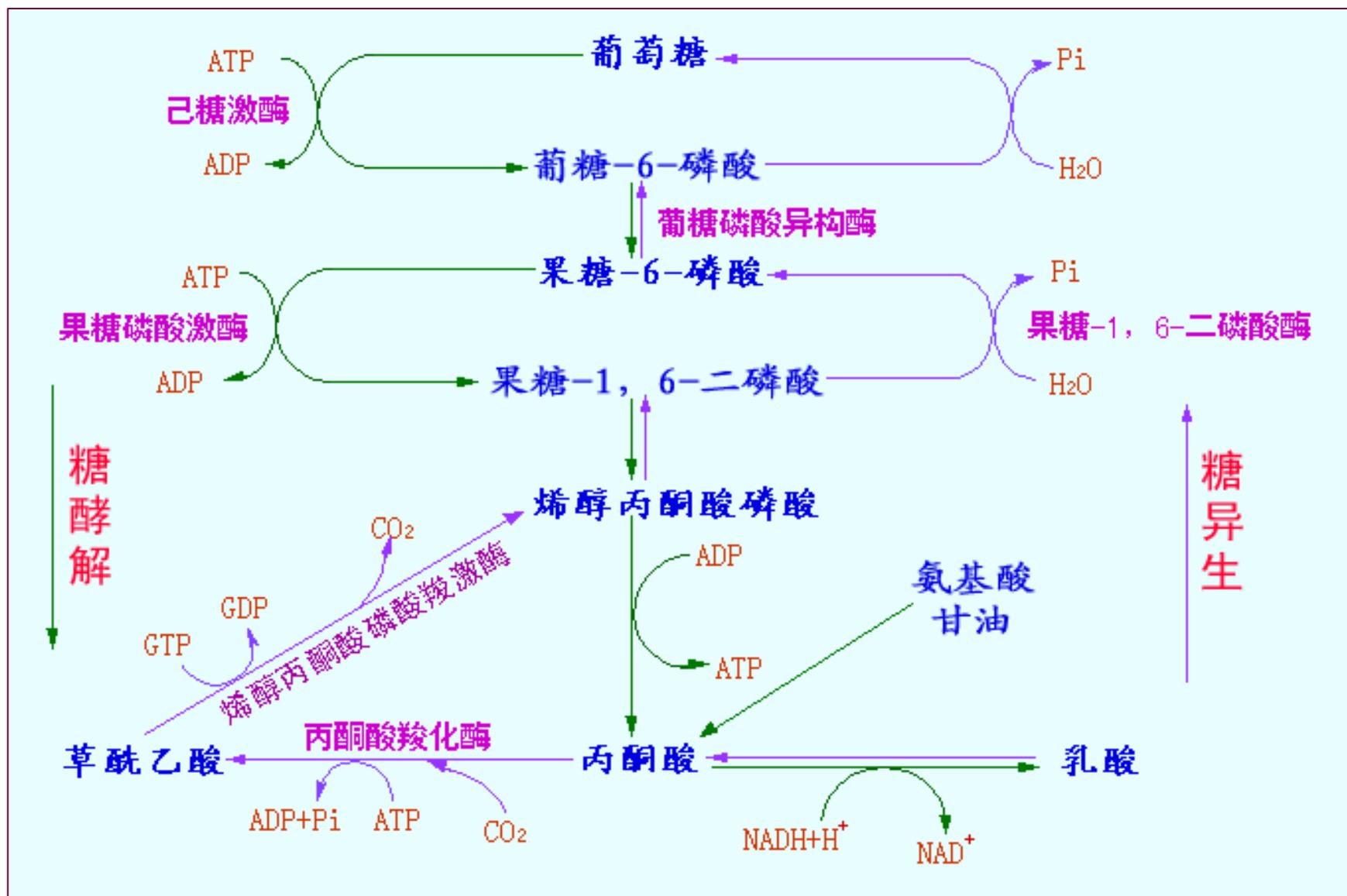
ATP + CO<sub>2</sub>

丙酮酸羧化酶

丙酮酸

丙酮酸



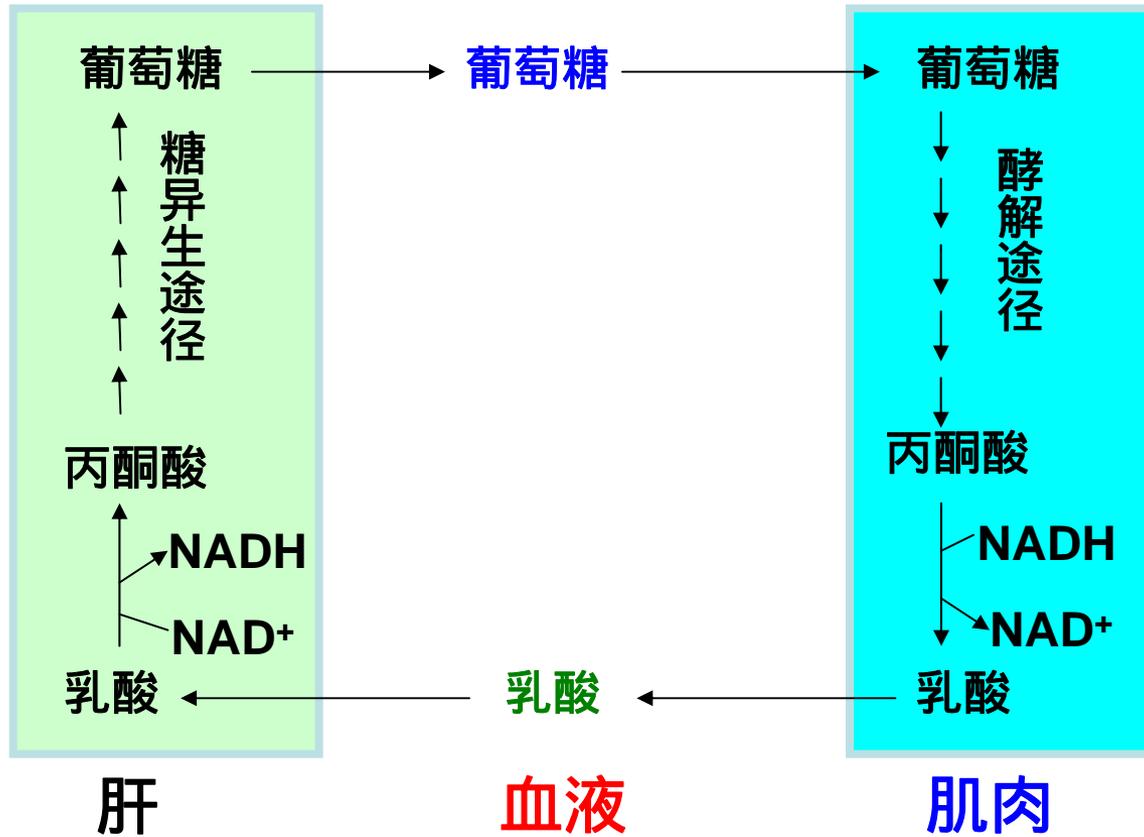


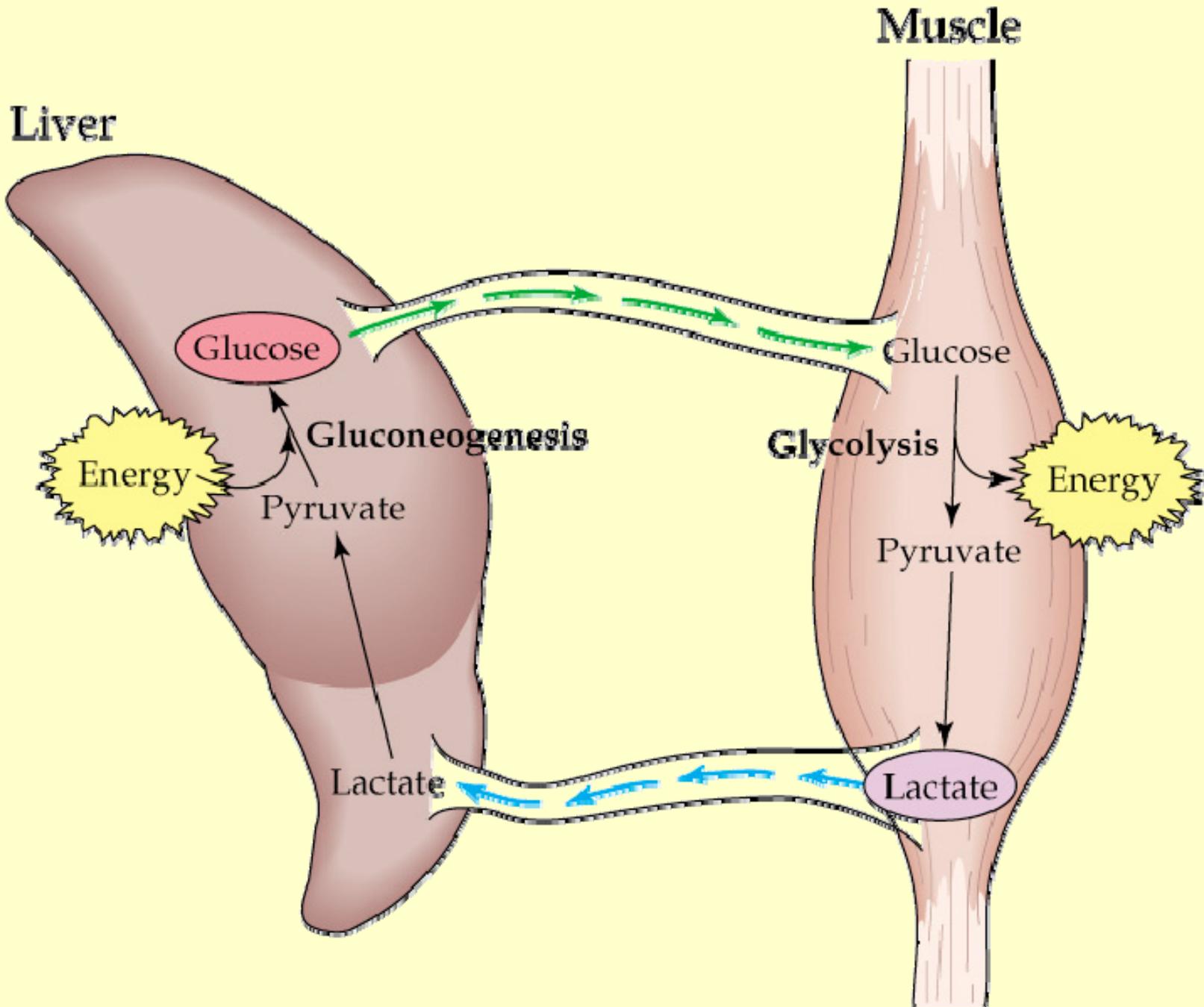
## (五)糖异生的生理意义

1. 维持血糖浓度的相对恒定
2. 回收乳酸分子中的能量

葡萄糖在肌肉组织中经糖的无氧酵解产生的乳酸，可经血循环转运至肝，再经糖的异生作用生成自由葡萄糖后转运至肌肉组织加以利用，这一循环过程就称为**乳酸循环（Cori循环）**。

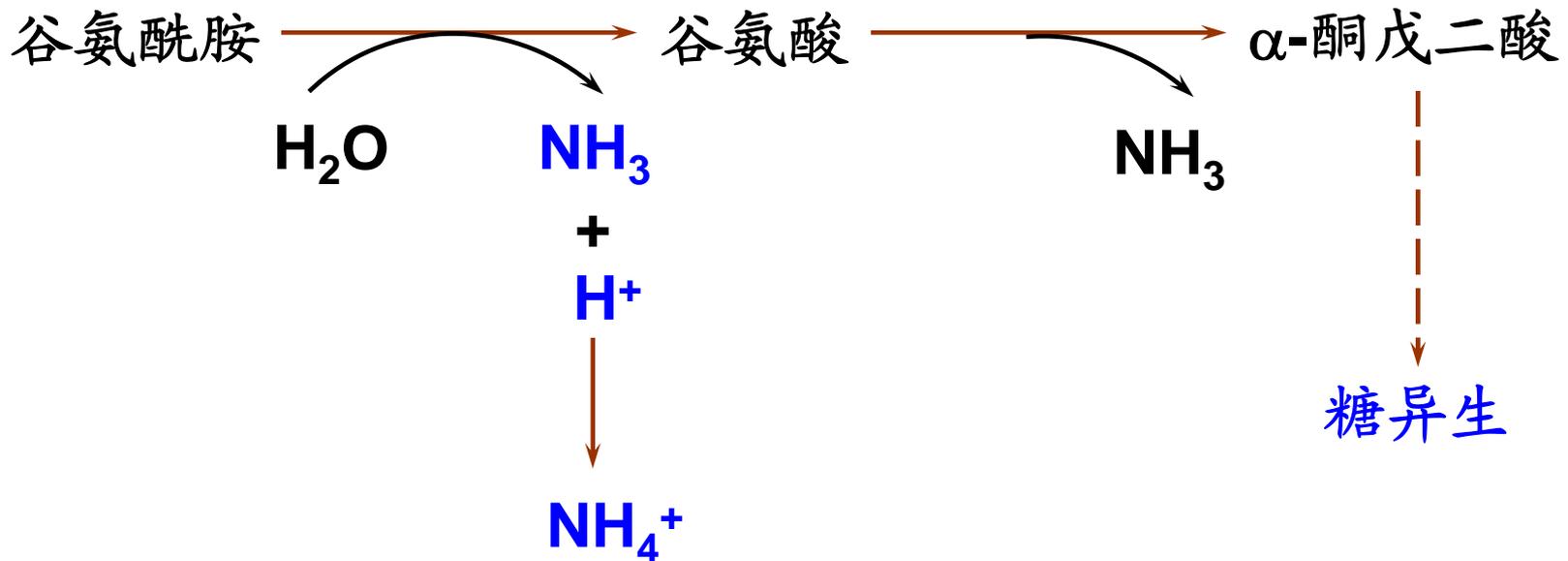
# 乳酸循环示意图





### 3. 维持酸碱平衡:

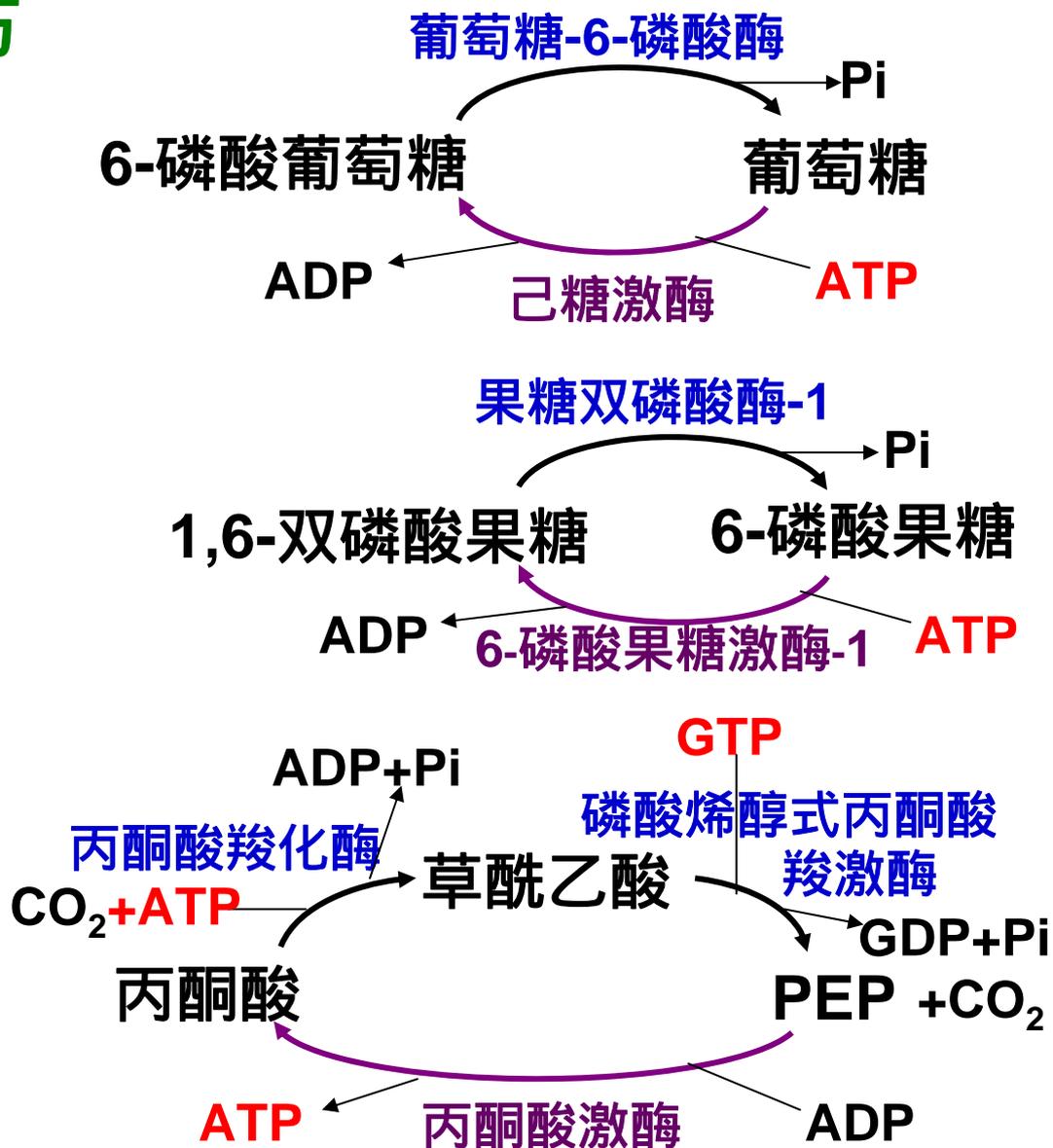
在肾组织细胞中进行的糖异生作用有利于酸性物质的排泄。



### 4. 补充肝糖原。

## (六) 糖异生的调节

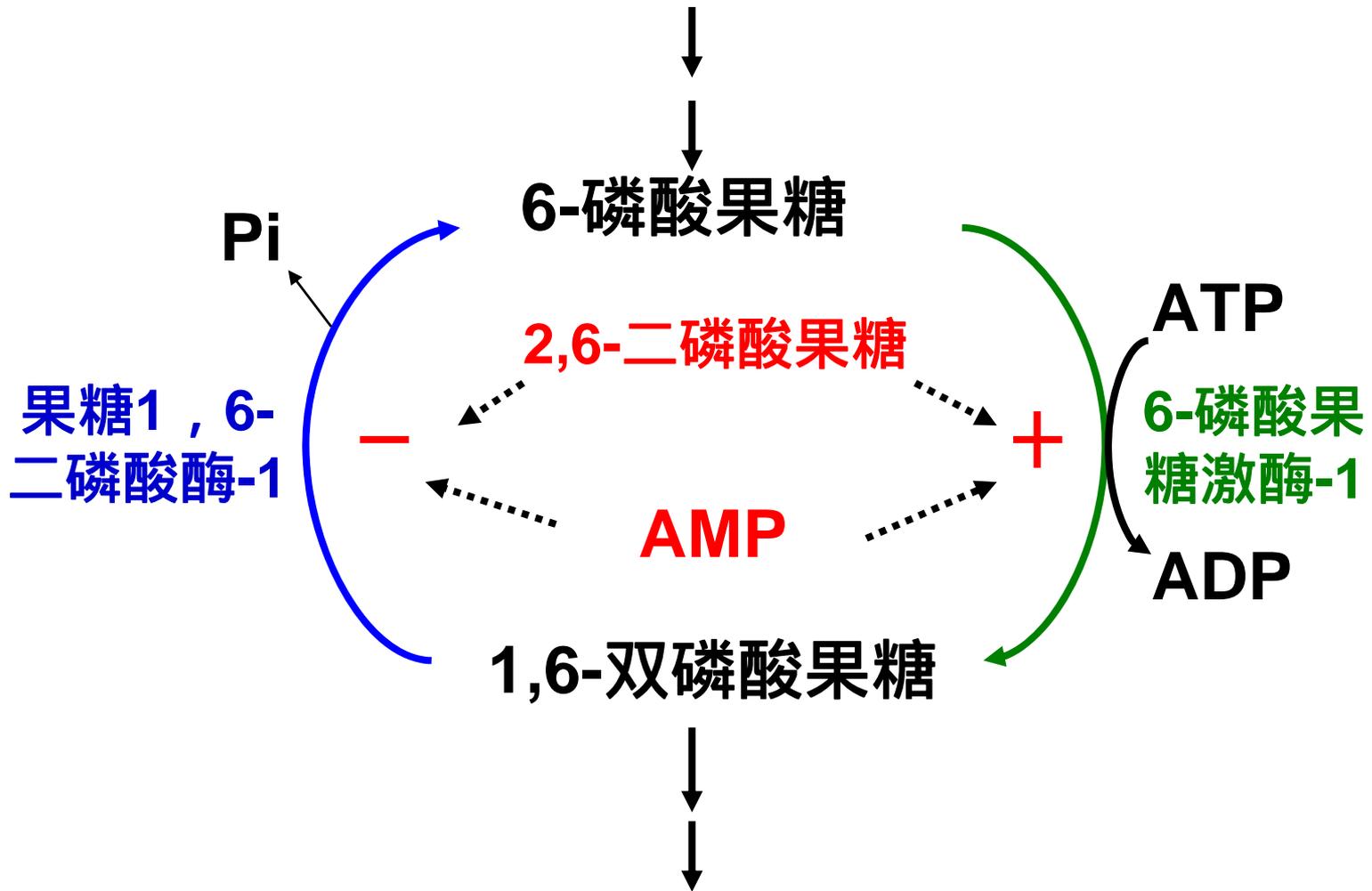
在前面的三个反应过程中，作用物的互变分别由不同酶催化其单向反应，这种互变循环称之为**底物循环**



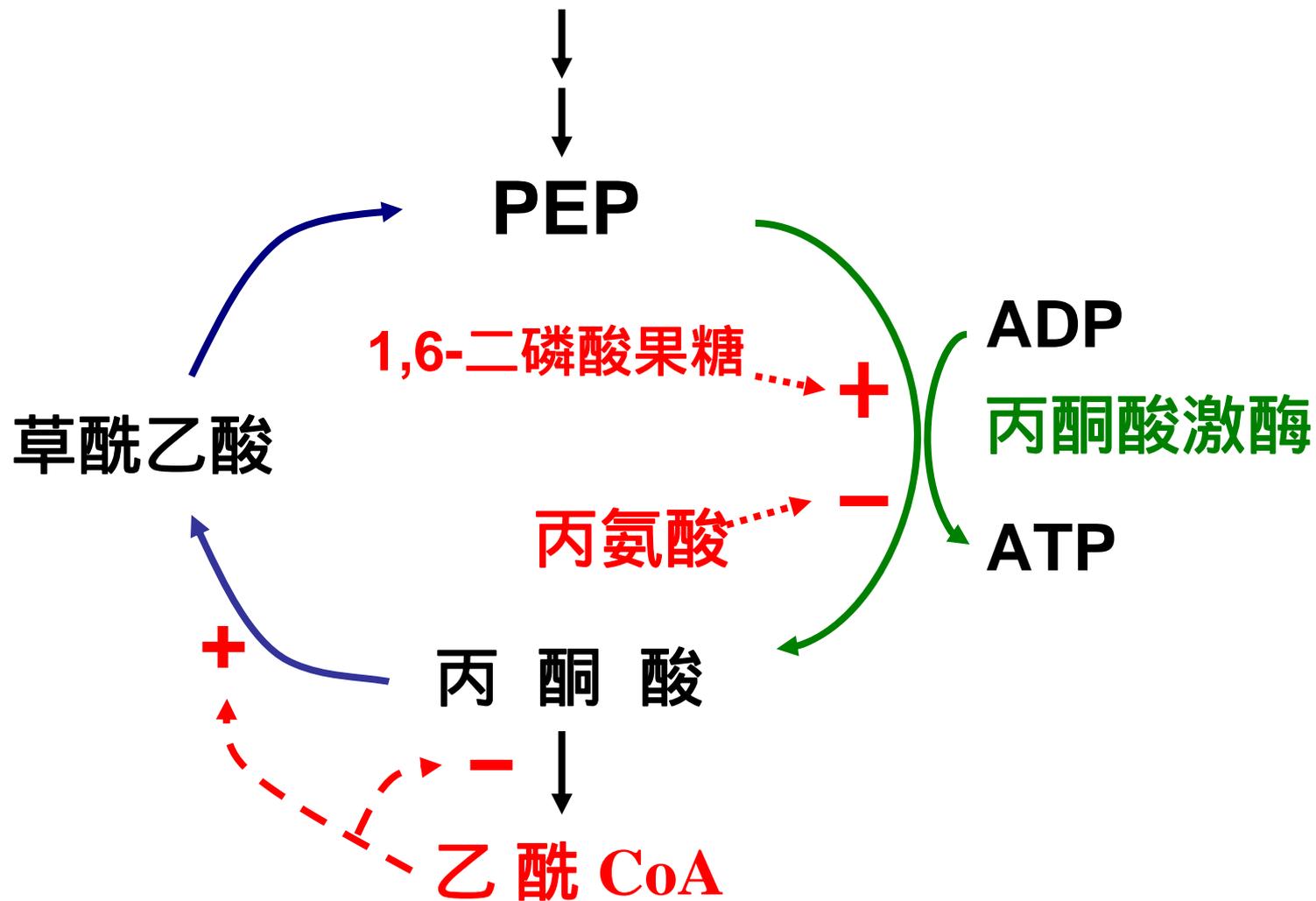
当两种酶活性相等时，则不能将代谢向前推进，结果仅是ATP分解释放出能量，因而称之为**无效循环**(futile cycle)。

因此，有必要通过调节使**糖异生途径**与**酵解途径**相互协调，主要是对前述底物循环中的**后2个底物循环**进行调节。

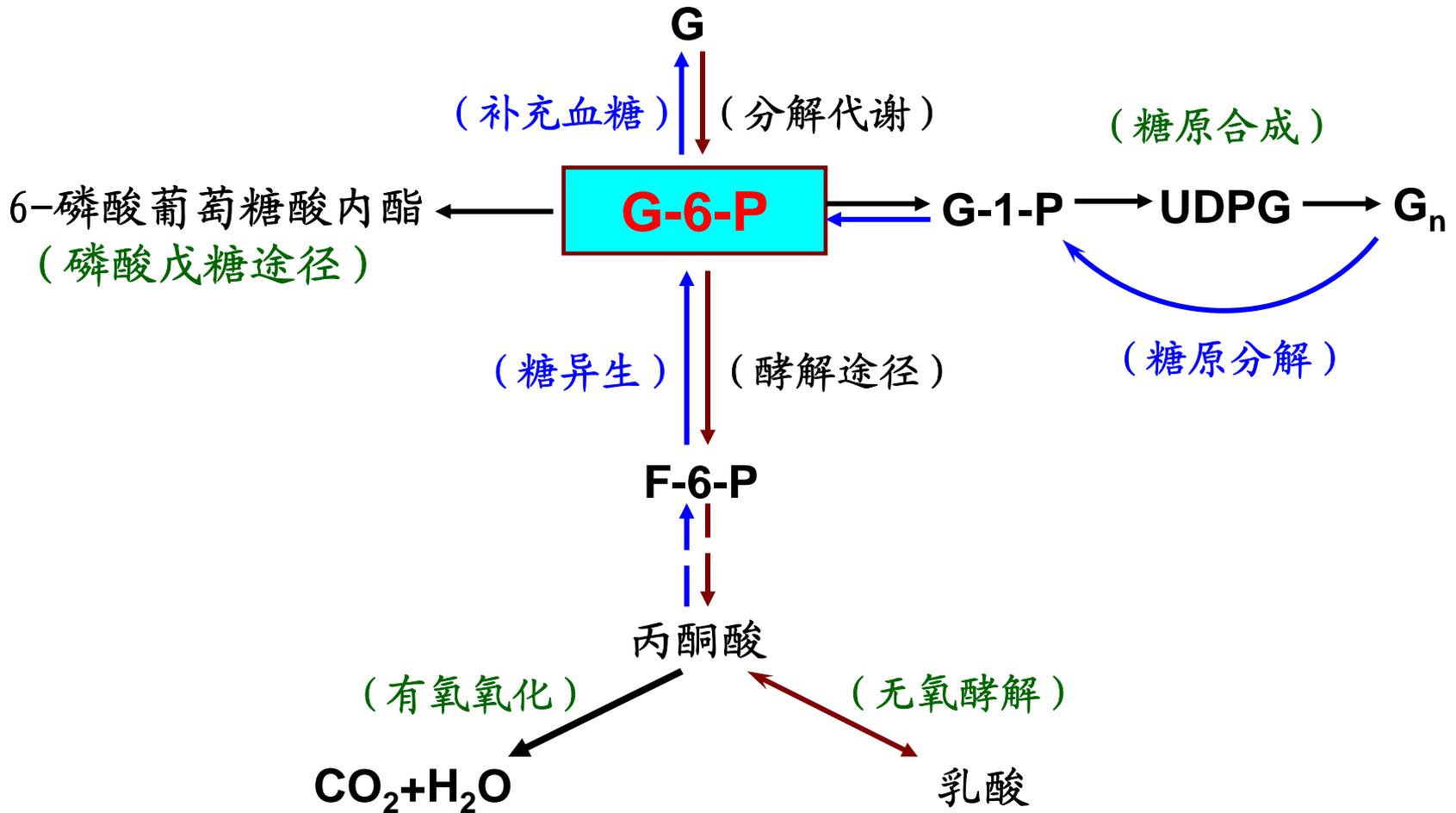
# 1. 6-磷酸果糖与1,6-双磷酸果糖之间



## 2. 磷酸烯醇式丙酮酸与丙酮酸之间



# 五、G-6-P在糖代谢中的作用



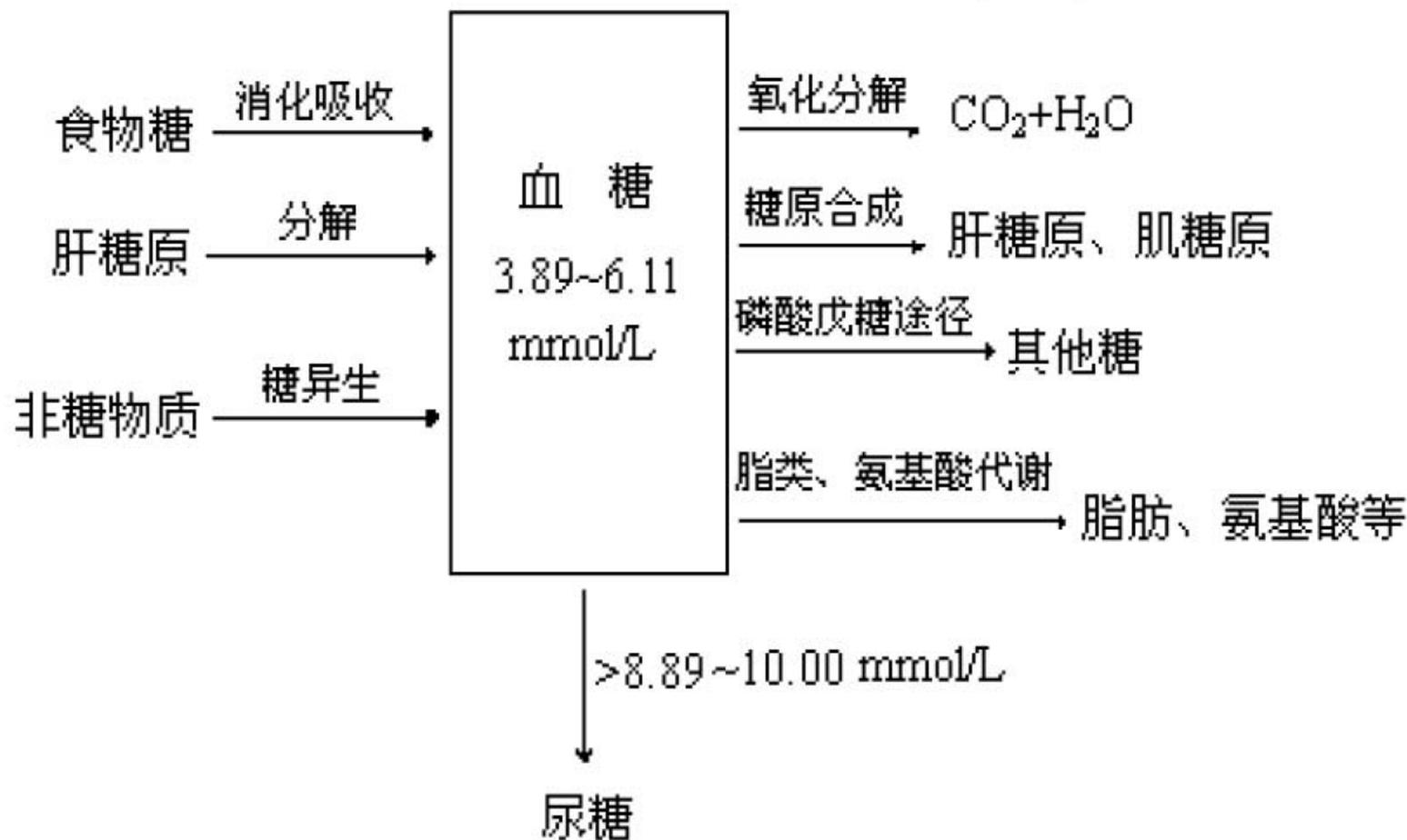
## 第四节 血糖水平的调节

- ◆ 血液中的葡萄糖含量称为**血糖**。
- ◆ 正常空腹血糖浓度为**3.89~6.11mmol/L**  
(**80~100mg%**)。

# 一、血糖的来源与去路

来源

去路



血糖的来源与去路

## 二、血糖水平异常——高血糖及糖尿症

- ◆空腹血糖水平高于**7.22~7.78mmol/L**称为**高血糖**。
- ◆当血糖浓度高于 **8.89~10.00 mmol/L**时，可出现**糖尿症**。此血糖值称为肾糖阈。
- ◆高血糖见于：糖尿病、肾脏疾病、情绪激动等。

### 三、血糖水平的调节

\* 主要依靠激素的调节

主要  
调节  
激素

降低血糖：胰岛素(insulin)

升高血糖：胰高血糖素

糖皮质激素、肾上腺素