



人民卫生出版社
PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE



第六章 糖代谢

Chapter 6 Metabolism of Carbohydrate

主要内容

- **第一节 概述**
- **第二节 糖的分解代谢**
- **第三节 糖原代谢**
- **第四节 糖异生作用**
- **第五节 血糖与血糖浓度的调节**



物质代谢

消耗能量

合成代谢：小分子 → 大分子

释放能量

分解代谢：大分子 → 小分子

代谢途径

由许多酶促反应有组织、有次序、一个接一个地依次衔接起来的连续化学反应。

代谢途径的四个特点：

1. 单向性
2. 不可逆，关键酶
3. 区域化
4. 可调节性

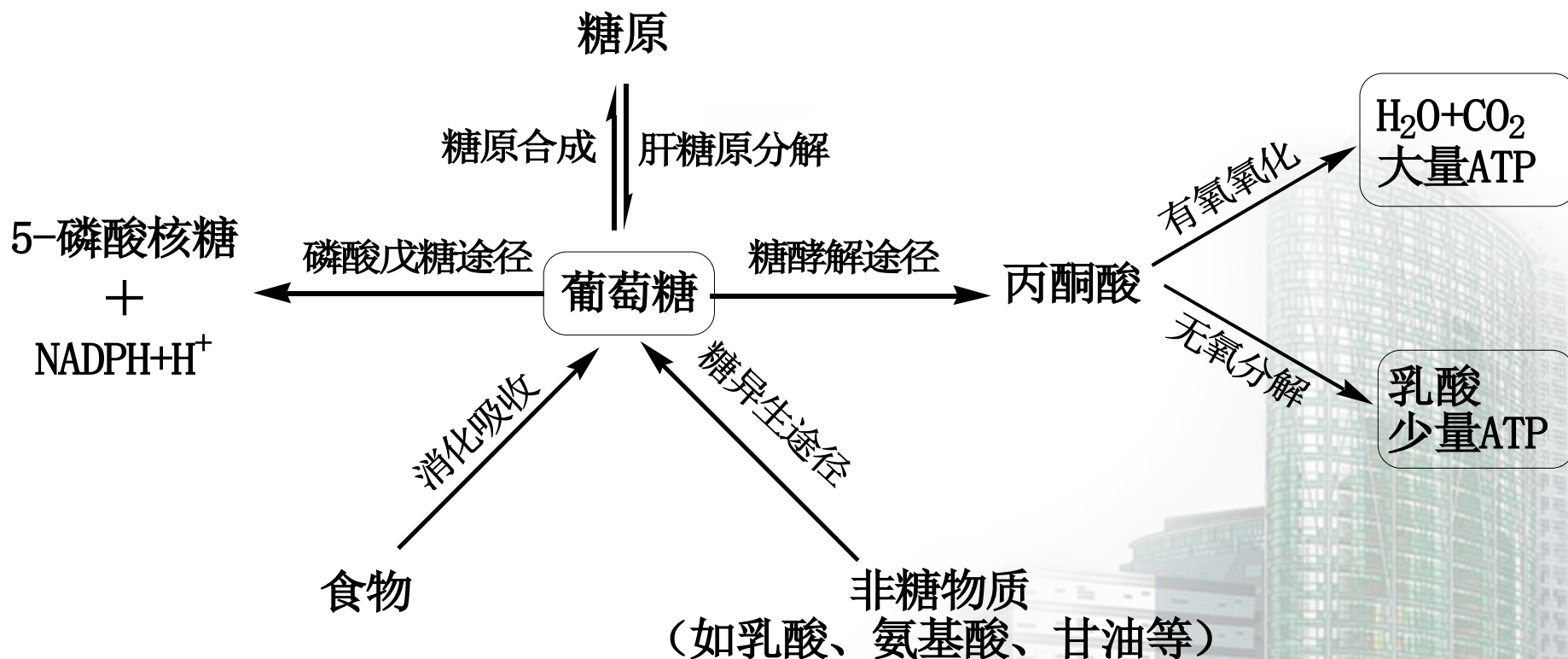


第一节 概述

一、糖的生理功能

- 最重要的**能源**物质（占约 60%）
- 机体重要的**碳源**
- 人体组织结构的重要组分
- 糖蛋白类的激素、酶、免疫球蛋白等

二、糖代谢概况



第二节 糖的分解代谢

葡萄糖的分解途径根据氧供给分为三种：

- 氧供给不足：**糖的无氧分解**



- 氧供应充足：**糖有氧氧化途径**



- 有氧氧化支路：**磷酸戊糖途径**

一、糖的无氧分解（糖酵解）

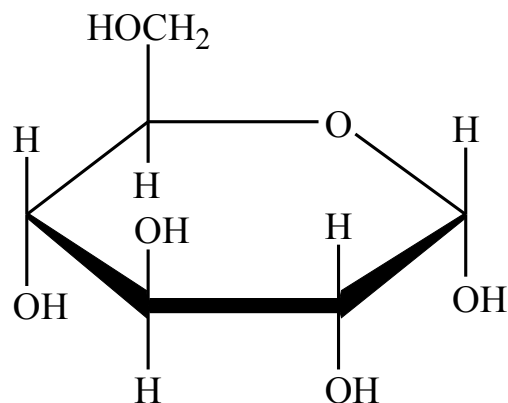
- **定义** 葡萄糖和糖原在无氧或缺氧条件下分解为乳酸和少量 ATP 的过程，称为**糖酵解**。
- **反应部位** 胞液

(一) 糖酵解的反应过程

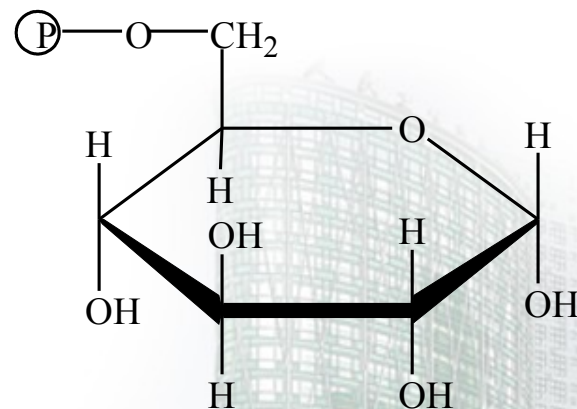
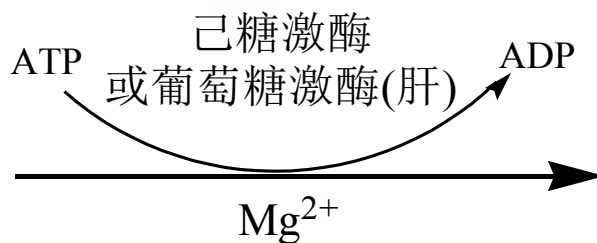
可分为 2 个阶段

- **第一阶段：葡萄糖分解成丙酮酸**
- **第二阶段：丙酮酸被还原生成乳酸**

1. 葡萄糖 (G) 的磷酸化



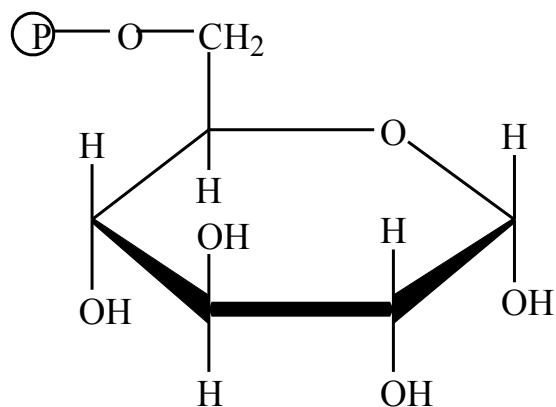
葡萄糖



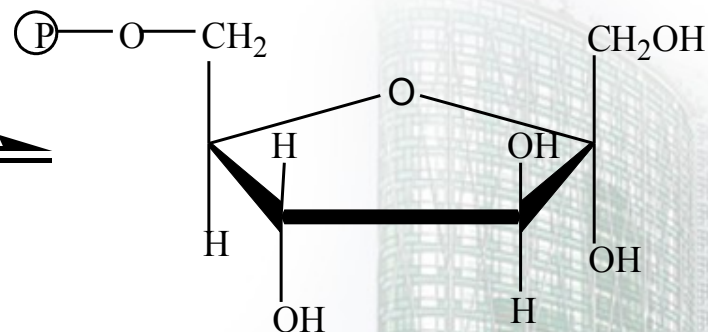
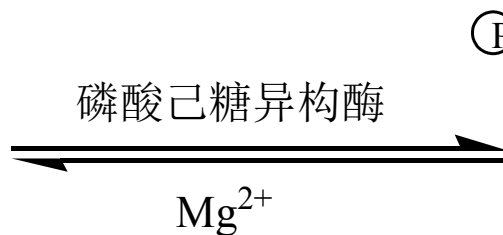
6-磷酸葡萄糖

特点：不可逆、-1ATP
己糖激酶第 1 个关键酶

2. 6- 磷酸葡萄糖异构为 6- 磷酸果糖

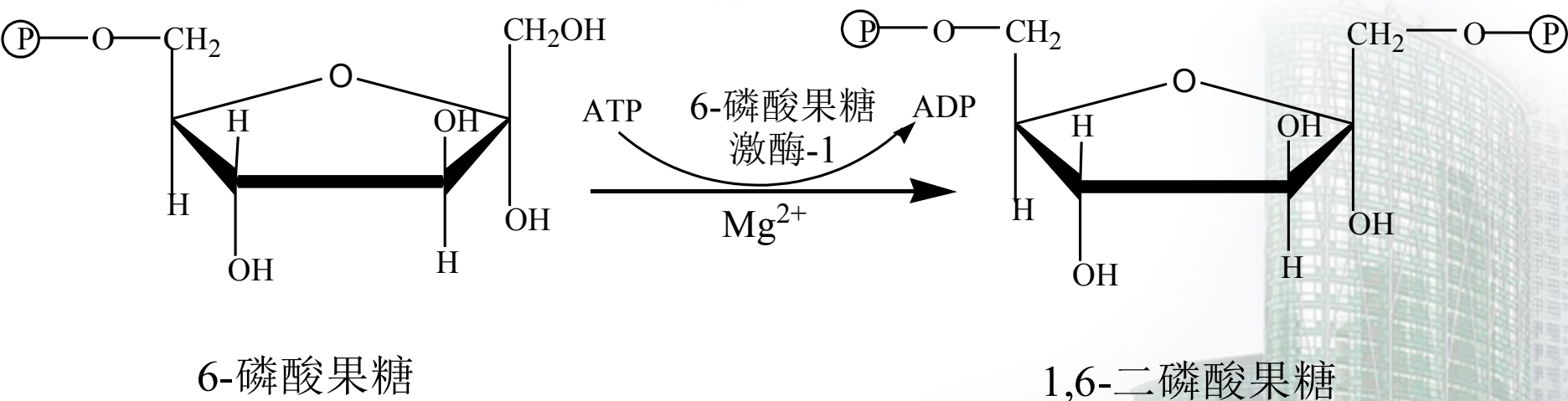


6-磷酸葡萄糖



6-磷酸果糖

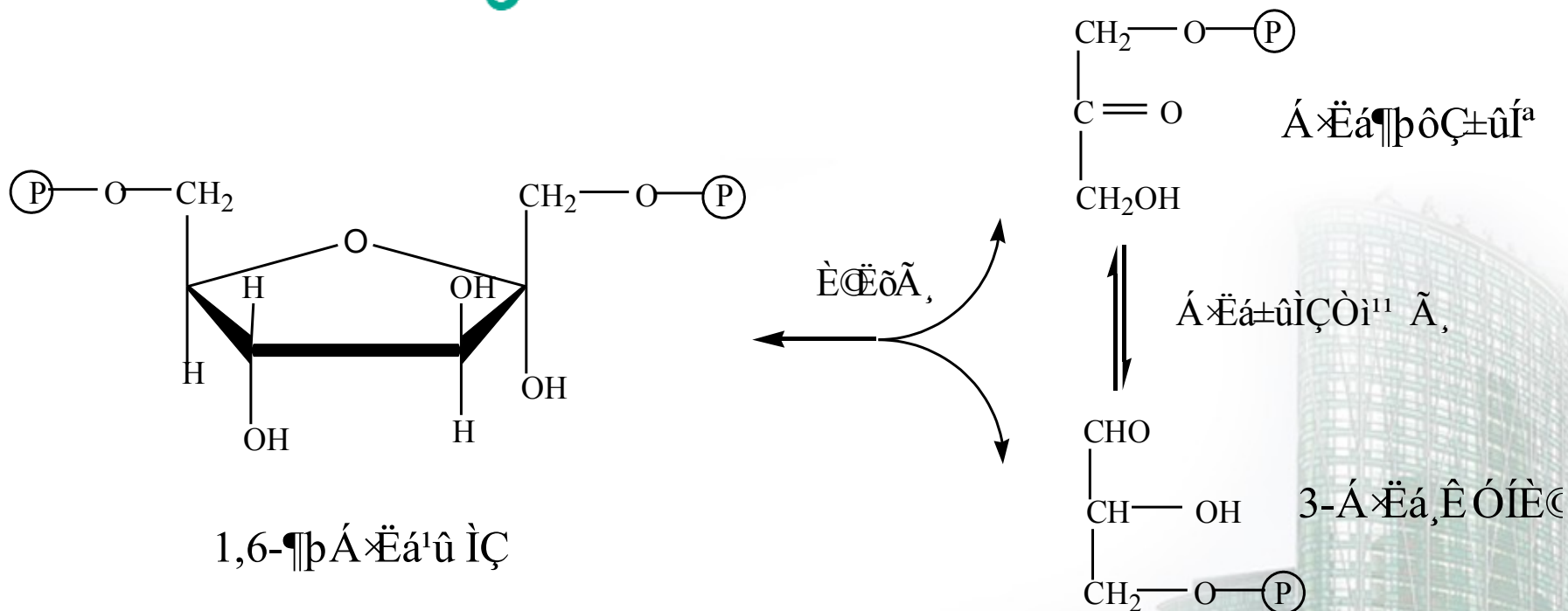
3. 6- 磷酸果糖磷酸化生成 1, 6- 二磷酸果糖



特点：不可逆、-1ATP

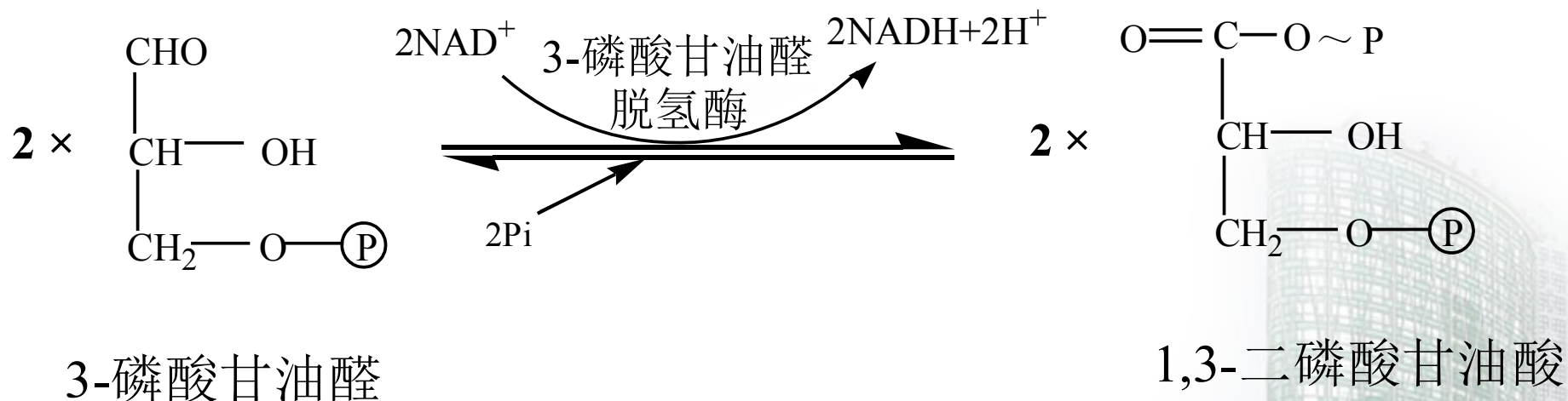
磷酸果糖激酶为第 2 个关键酶

4. 裂解、互变



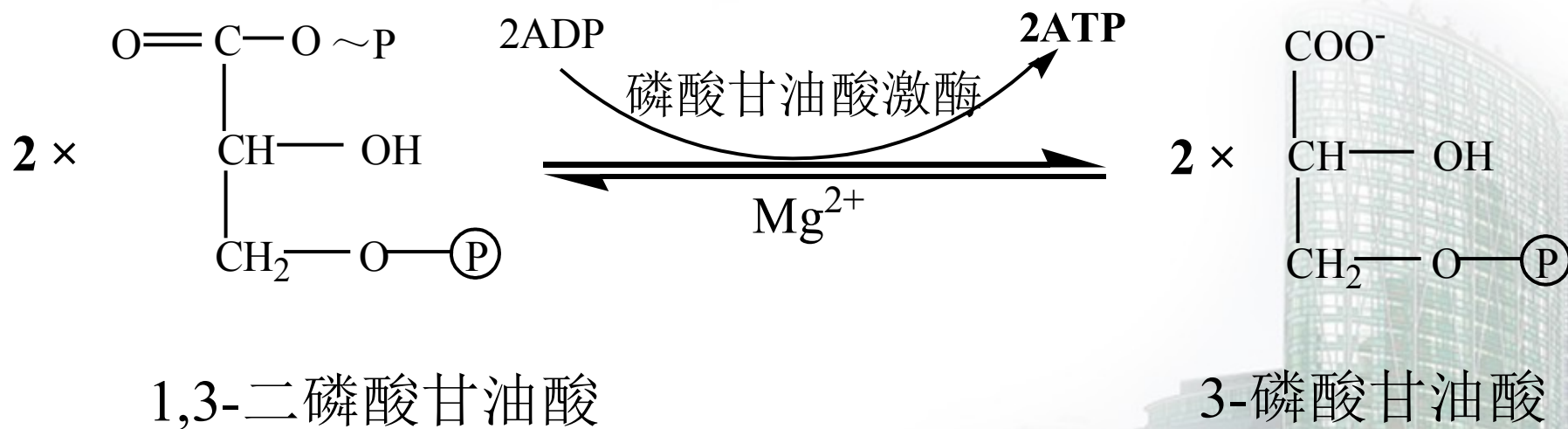
5. 3- 磷酸甘油醛氧化生成 1, 3- 二磷酸甘油酸

BACK



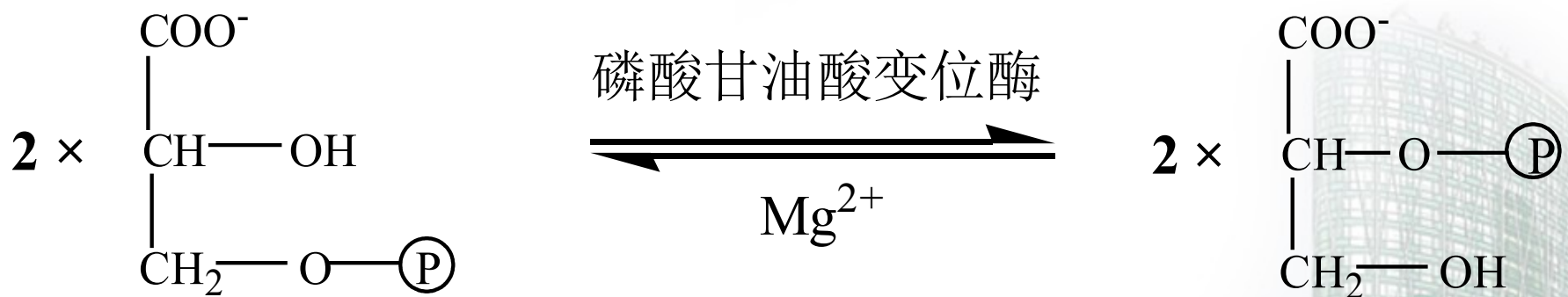
特点：脱氢生成 NADH+H⁺、生成高能化合物

6. 1, 3- 二磷酸甘油酸转变为 3- 磷酸甘油酸



特点：底物水平磷酸化、 2×1ATP

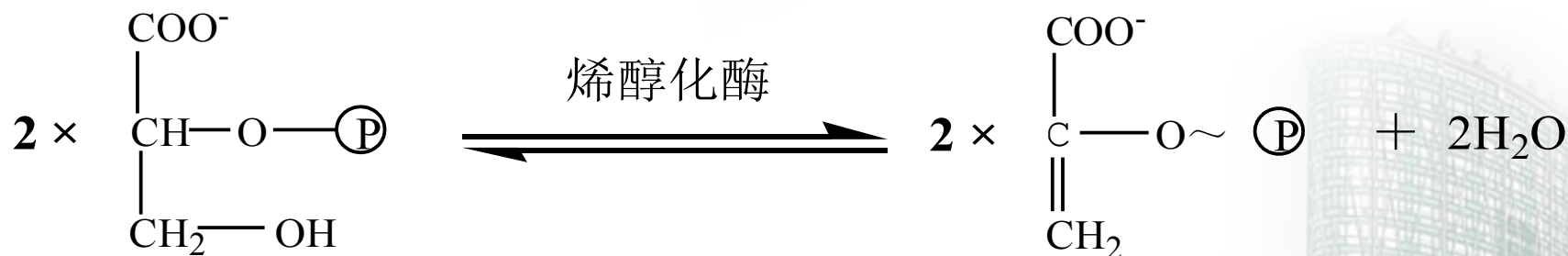
7. 3- 磷酸甘油酸转变为 2- 磷酸甘油酸



3-磷酸甘油酸

2-磷酸甘油酸

8. 生成磷酸烯醇式丙酮酸

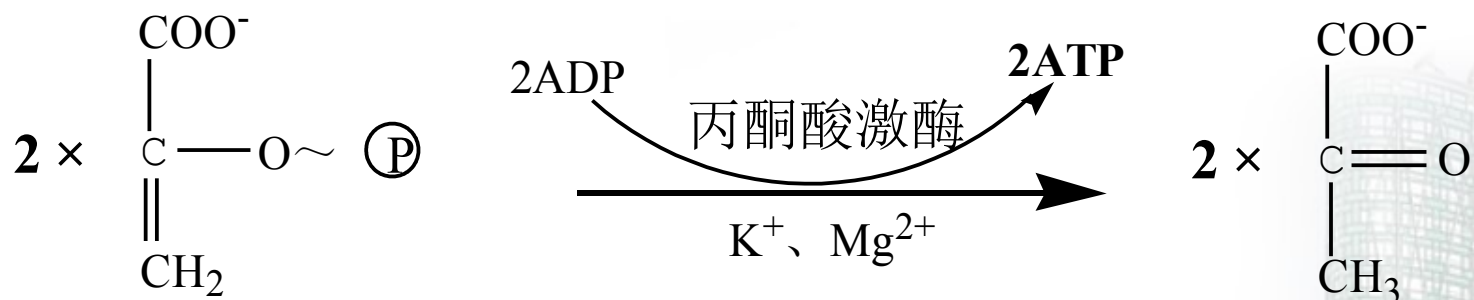


2-磷酸甘油酸

磷酸烯醇式丙酮酸

特点：生成高能磷酸化合物

9. 丙酮酸的生成



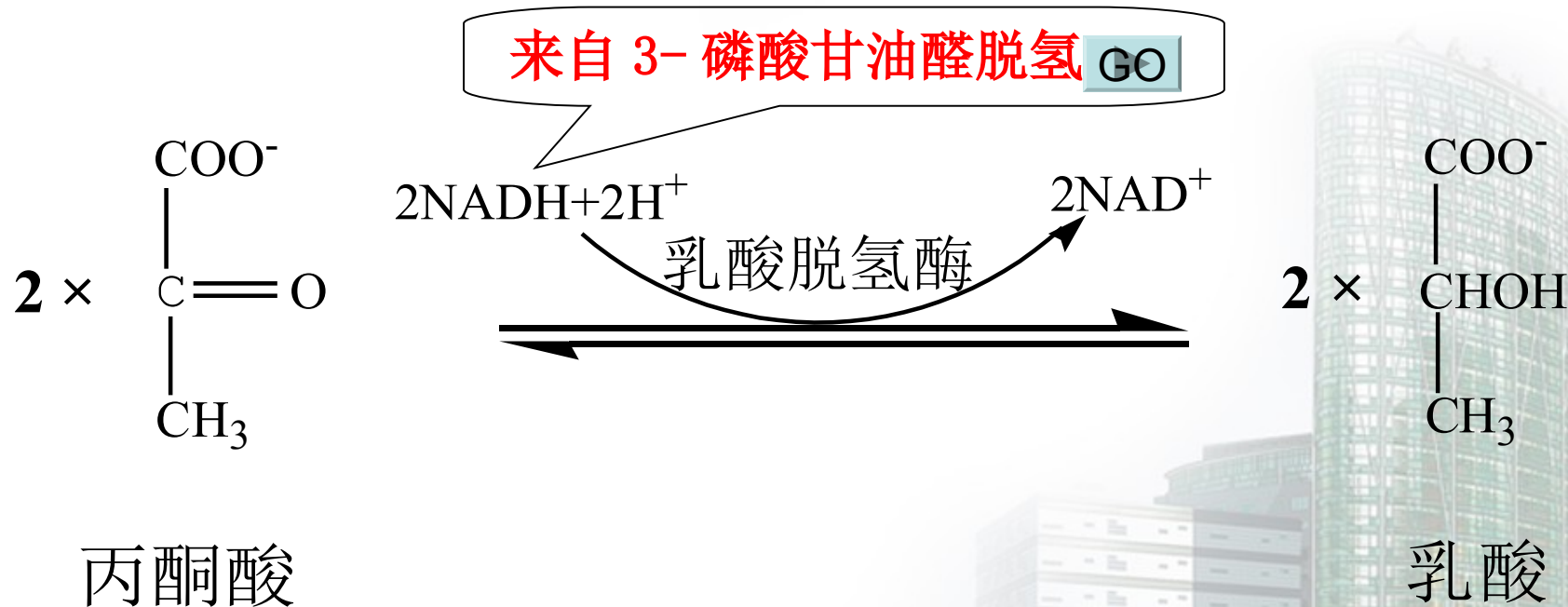
磷酸烯醇式丙酮酸

丙酮酸

特点：底物水平磷酸化反应

不可逆，丙酮酸激酶为第 3 个关键酶

10. 丙酮酸还原为乳酸



课堂活动

为什么剧烈运动后，肌肉常有酸疼的感觉？



(二) 糖酵解的生理意义

- 无氧或缺氧时迅速提供能量。
- 成熟红细胞无线粒体，完全依赖糖酵解供能；存在 2, 3- 二磷酸甘油酸支路调节血红蛋白携带氧功能。
- 视网膜、睾丸、白细胞、肿瘤细胞等，有氧时也以糖酵解为主要供能方式。

糖酵解过程中 ATP 的生成 (底物水平磷酸化)



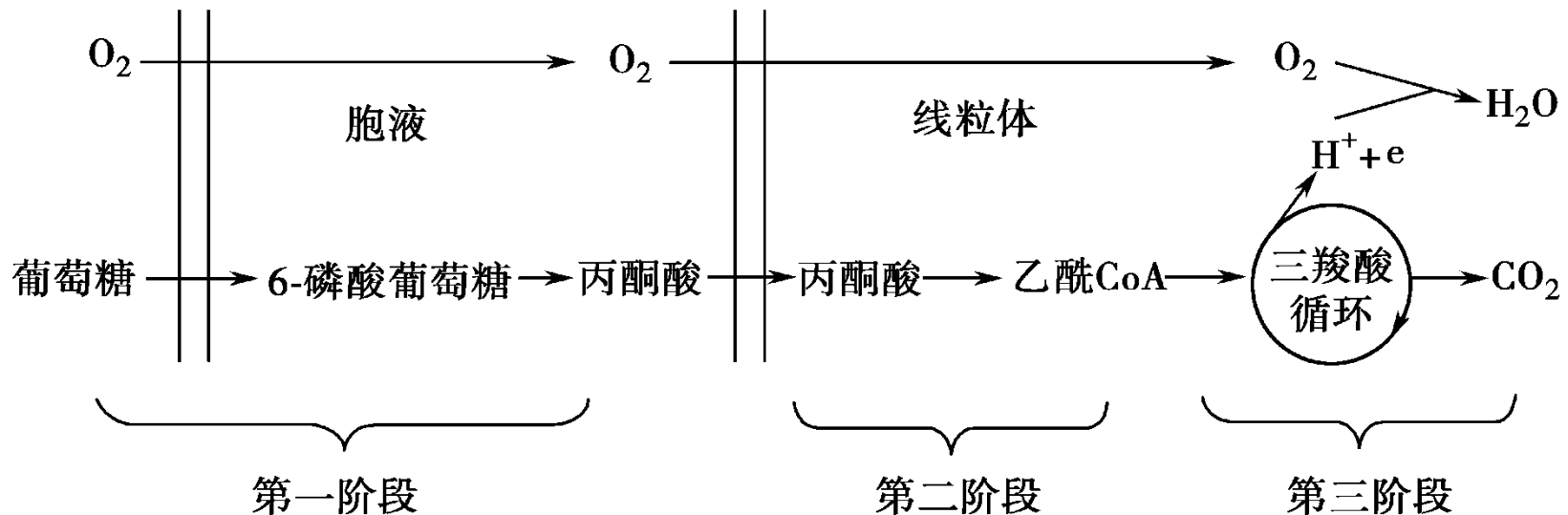
反应	生成 ATP 数
葡萄糖 → 6- 磷酸葡萄糖	-1
6- 磷酸果糖 → 1, 6- 二磷酸果糖	-1
2×1, 3- 二磷酸甘油酸 → 2×3- 磷酸甘油酸	2×1
2× 磷酸烯醇式丙酮酸 → 2× 烯醇式丙酮酸	2×1
净生成	2

糖原的 1 葡萄糖残基 → 2 ATP

二、糖的有氧氧化

定义 葡萄糖在有氧情况下，彻底分解为 CO_2 和 H_2O 并产生大量 ATP 的过程，称有氧氧化。

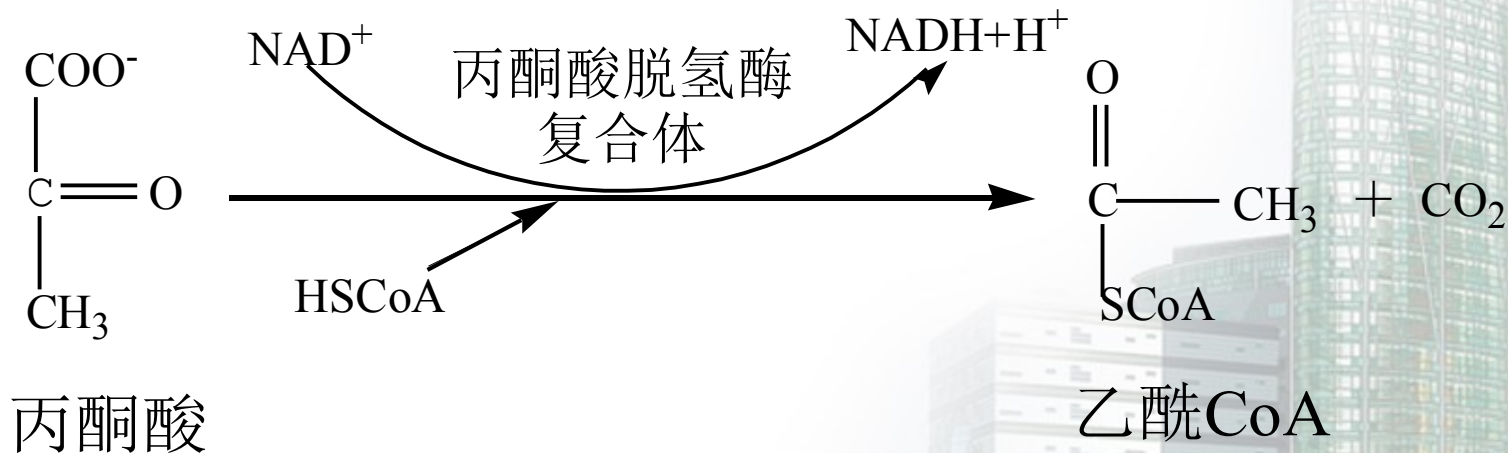
场所 胞液和线粒体



(一) 有氧氧化反应过程

1. 丙酮酸的生成：糖酵解途径

2. 丙酮酸氧化脱羧生成乙酰 CoA：



关键酶，反应不可逆

丙酮酸脱氢酶系：多酶复合体

酶

辅酶（所含维生素）

丙酮酸脱氢酶

TPP(V.B₁)

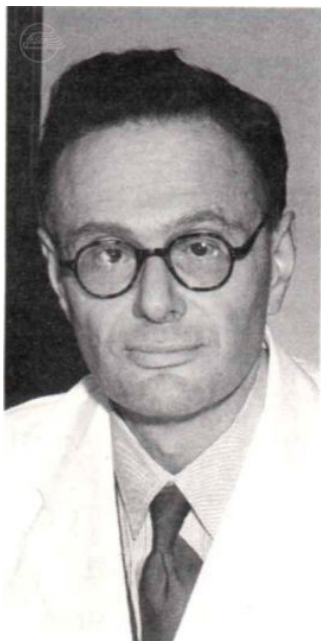
二氢硫辛酸转乙酰基酶

硫辛酸、**HSCoA(泛酸)**

二氢硫辛酸脱氢酶

FAD (V.B₂) 、 NAD⁺ (V.PP)

3. 乙酰 CoA 进入 **三羧酸循环**：



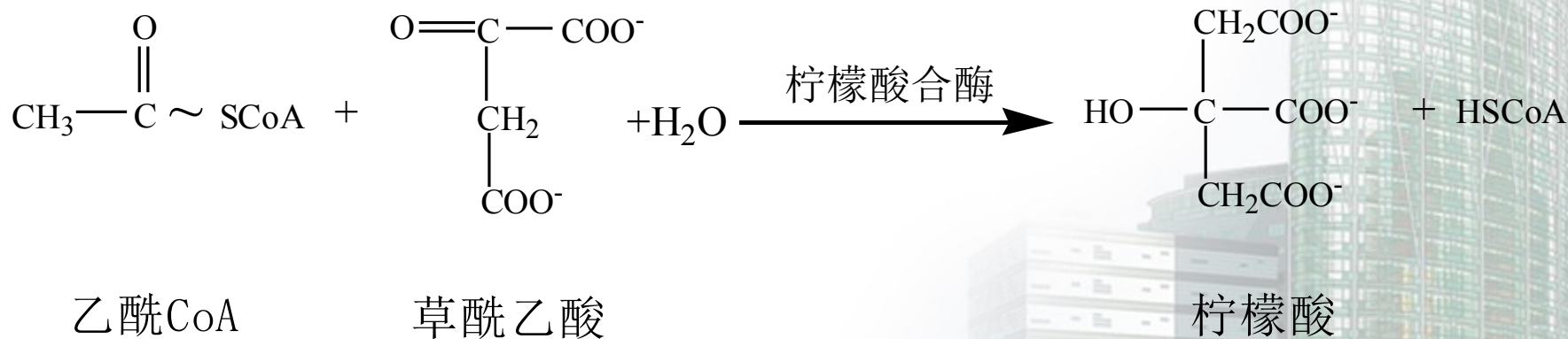
Hans Krebs
1900–1981

Hans Adolf Krebs，英籍德裔生物化学家。提出了“三羧酸循环 (tricarboxylic acid cycle，**TCA 循环**)”学说，并因此于 1953 年获得诺贝尔生理学医学奖。

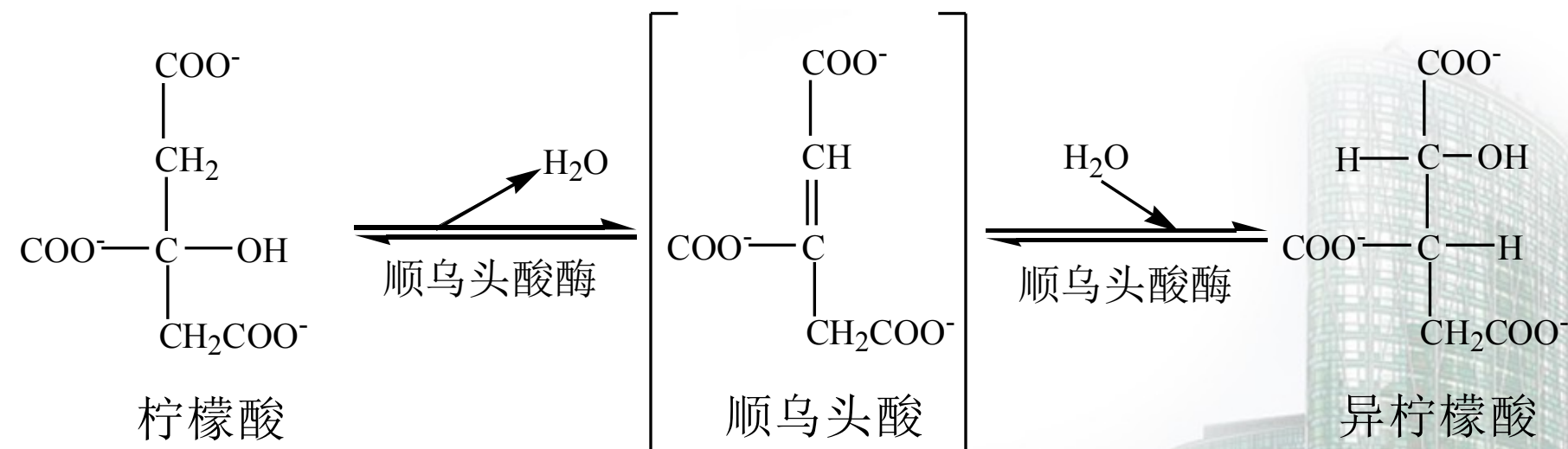
反应场所：线粒体

(1) 柠檬酸的生成

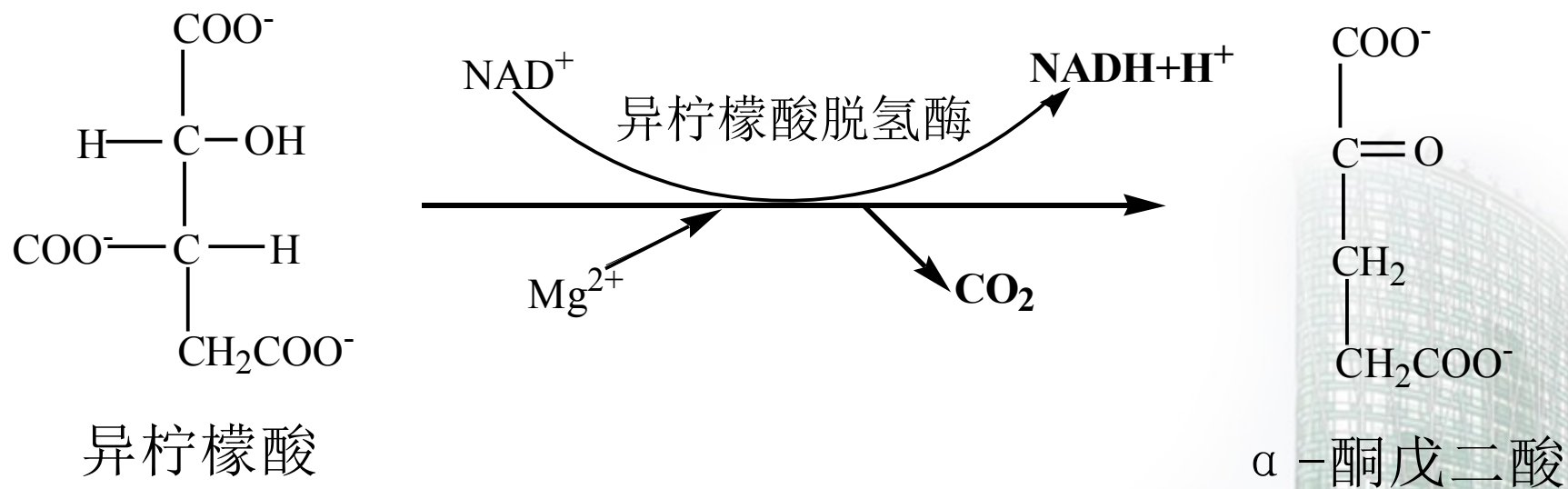
柠檬酸合酶为关键酶、反应不可逆



(2) 柠檬酸异构

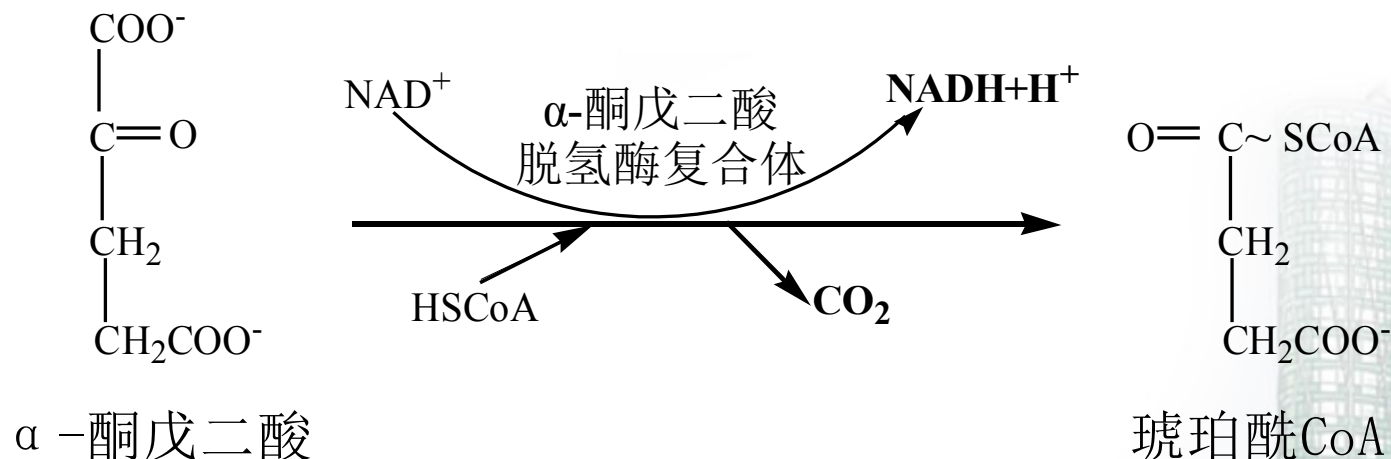


(3) 异柠檬酸氧化脱羧



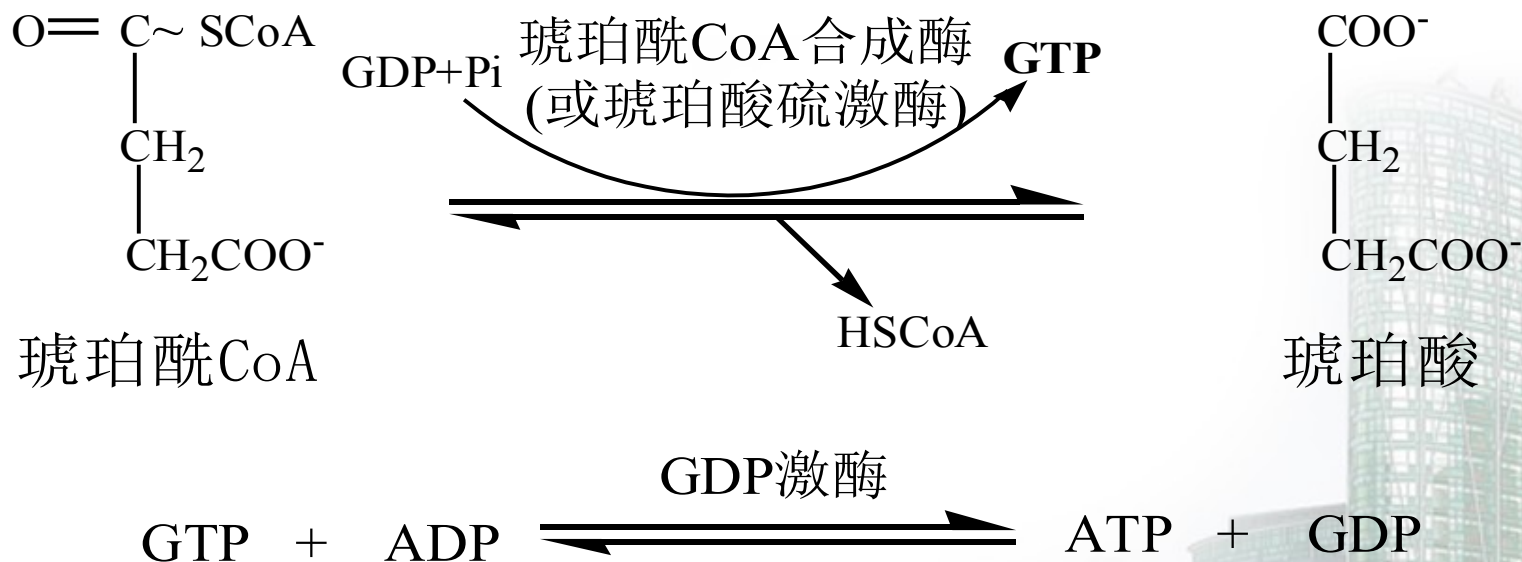
特点：关键酶、不可逆、脱氢氧化、脱羧

(4) α - 酮戊二酸氧化脱羧



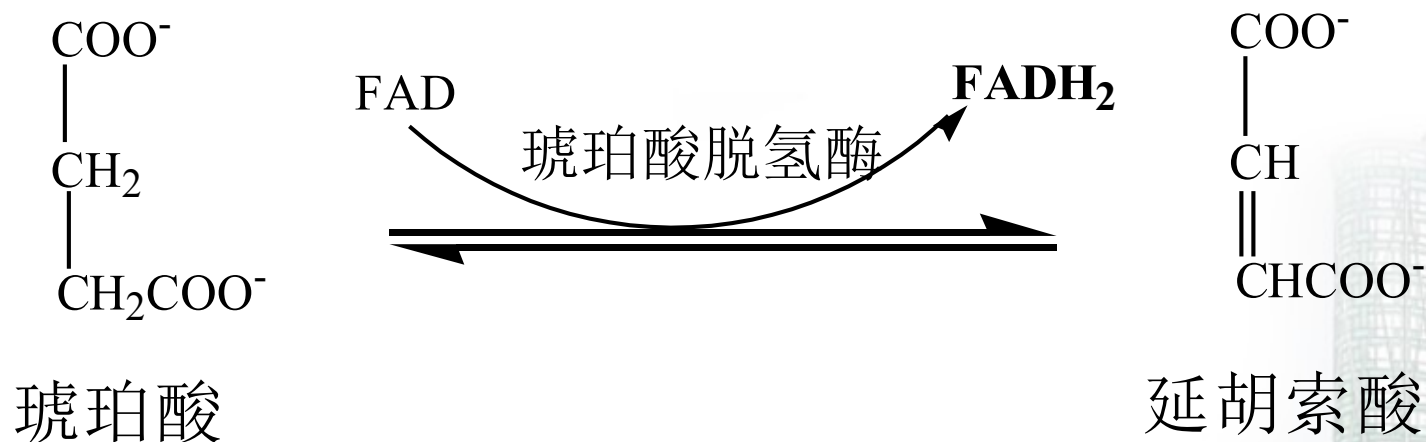
特点：关键酶、不可逆、脱氢氧化、脱羧
产物——高能硫酯键的高能化合物

(5) 琥珀酰 CoA 转变为琥珀酸



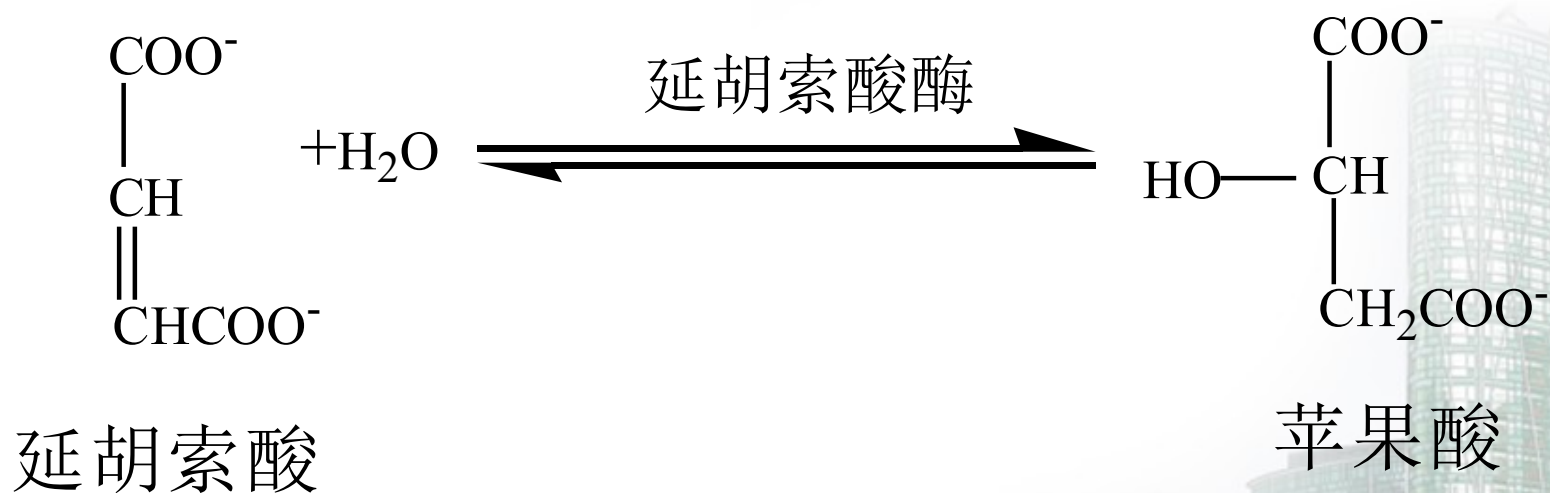
特点：底物水平磷酸化（唯一）

(6) 琥珀酸脱氢

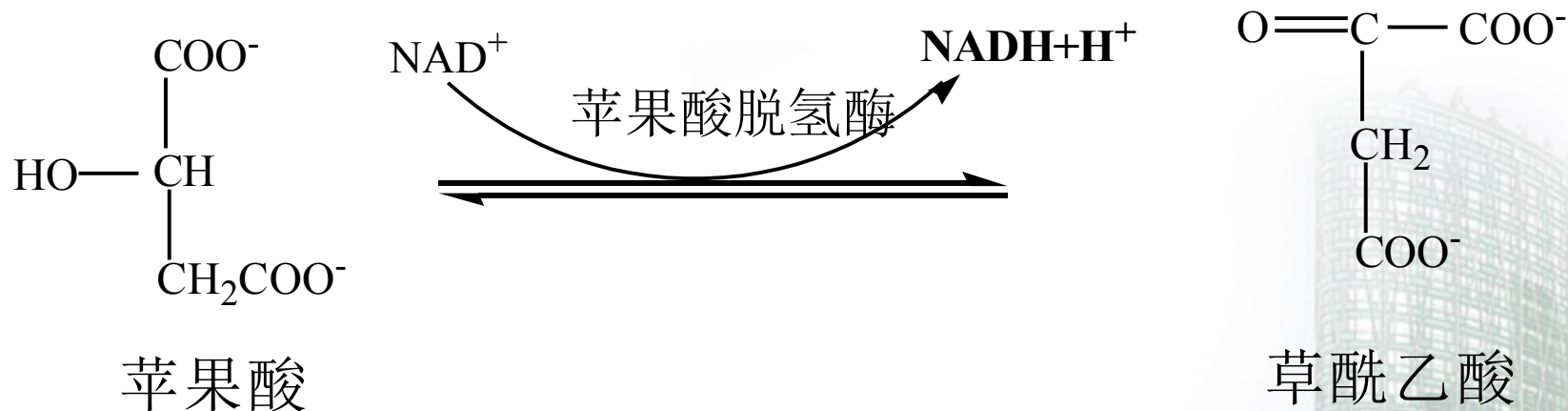


特点：琥珀酸脱氢酶的辅酶为 FAD

(7) 延胡索酸生成苹果酸

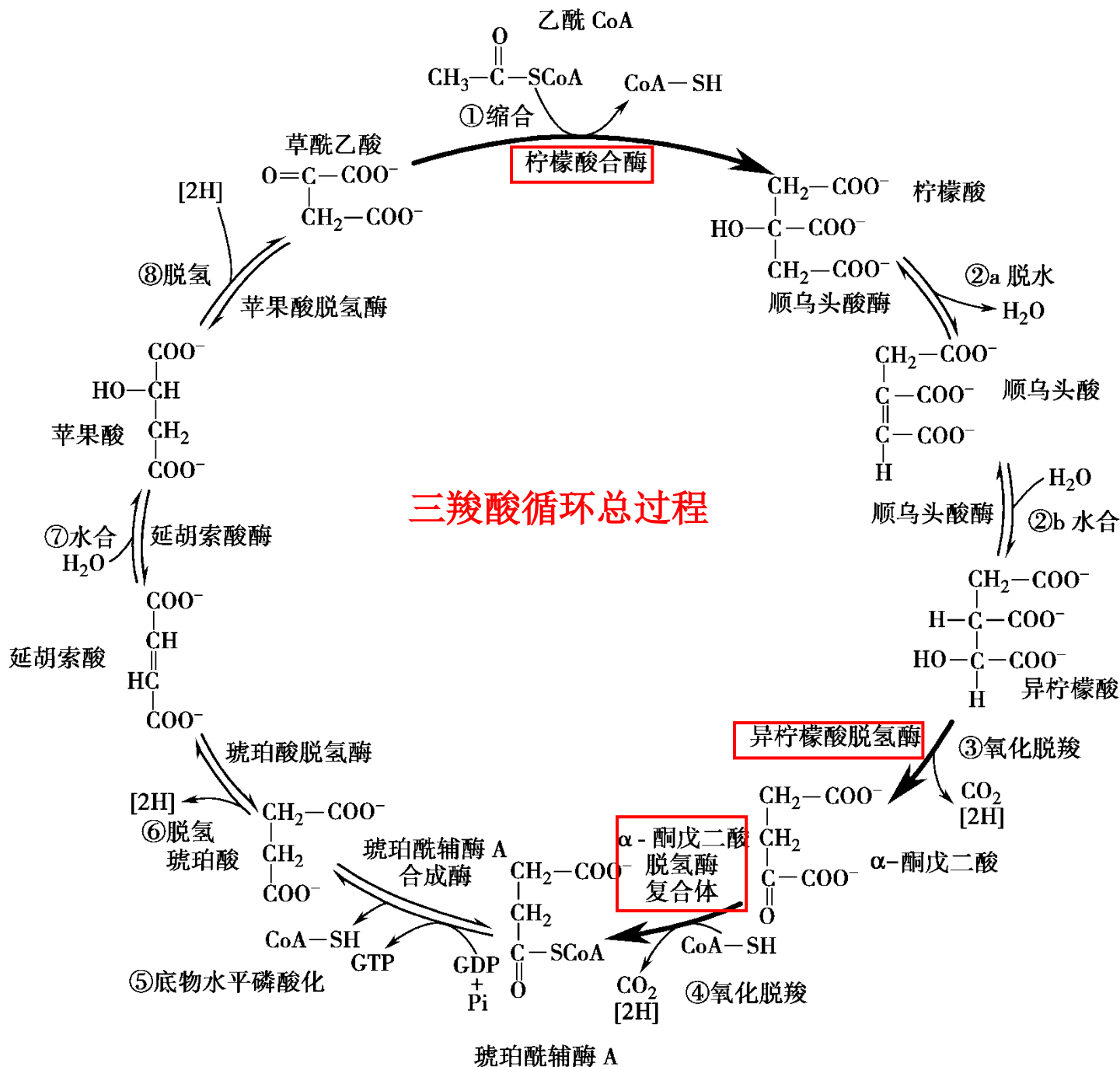


(8) 苹果酸脱氢



特点：脱氢

产物——草酰乙酸，参与下一轮循环



小结：三羧酸循环特点

(1) TCA循环**有氧时进行**。

有氧时，丙酮酸进入 TCA 循环彻底氧化，
无氧氧化被抑制，巴士德效应 (Pasteur effect)。

(2) TCA循环是产生 ATP 的主要途径

每次循环共进行 4 次脱氢。

3 次脱氢，由 $\text{NAD} \rightarrow \text{NADH} + \text{H}^+$ 氧化生成 3×2.5 个 ATP

；

1 次脱氢，由 $\text{FAD} \rightarrow \text{FADH}_2$ 氧化生成 1.5 个 ATP ；

1 次底物水平磷酸化生成 1 个 ATP ；

每分子乙酰 CoA 氧化共生成：

$2.5 \times 3 + 1.5 \times 1 + 1 = 10$ 个 ATP。

(3) TCA循环是**不可逆的 (单向的)**。

关键酶：柠檬酸合酶、**异柠檬酸脱氢酶**、

α - 酮戊二酸脱氢酶

(4) TCA循环的**中间物质补充是必须的**。

草酰乙酸 → 天冬氨酸 → 蛋白质

琥珀酰 CoA → 血红素

(二) 有氧氧化的生理意义

1. 在有氧条件下**释放大量能量**供机体利用。

反 应	ATP
糖酵解	+2
3- 磷酸甘油醛脱氢生成的 NADH 经磷酸甘油穿梭 (或苹果酸穿梭)	2×1.5 (或 2×2.5)
丙酮酸 → 乙酰 CoA	
乙酰 CoA → $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	2×2.5 2×10
1分子葡萄糖共计	30 (或 32)



2. **三羧酸循环**是糖、脂肪和氨基酸在体内氧化分解的共同通路。
3. 也是它们的互变枢纽。



三、磷酸戊糖途径

- **定义**：以 6- 磷酸葡萄糖开始，因在代谢过程中有磷酸戊糖的产生，所以称磷酸戊糖途径。
- **反应部位**：肝脏、脂肪组织等的**胞液**。
- **生理意义**：产生 **NADPH+H** 和 **5- 磷酸核糖**。

(一) 反应过程

1. 磷酸戊糖的生成

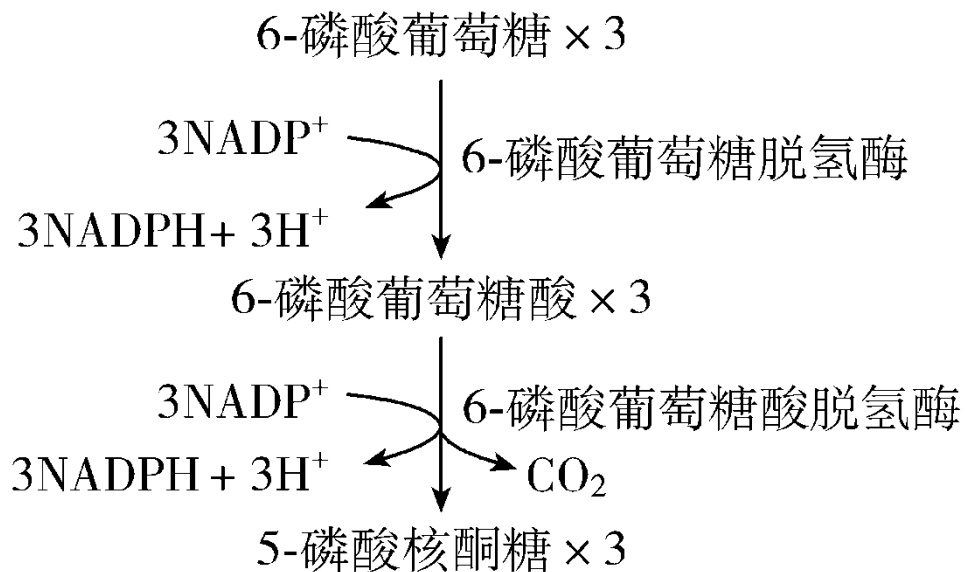
6- 磷酸葡萄糖脱氢酶是此代谢途径的关键酶。

2. 基团移换反应阶段

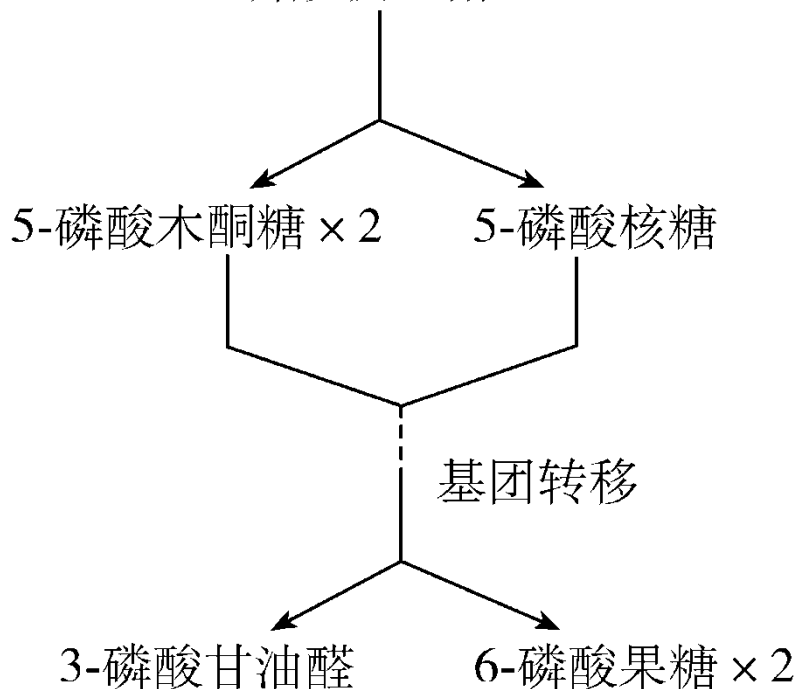
异构酶、转酮基酶、转醛基酶等。



第一阶段



第二阶段



(二) 生理意义

1. 提供 **5- 磷酸核糖**，参与核苷酸和核酸合成。
2. 提供 **NADPH+H⁺**。
 - 1) NADPH是体内许多合成代谢的供氢体
 - 2) NADPH参与体内的羟化反应
 - 3) NADPH可维持 GSH的还原性

点滴积累

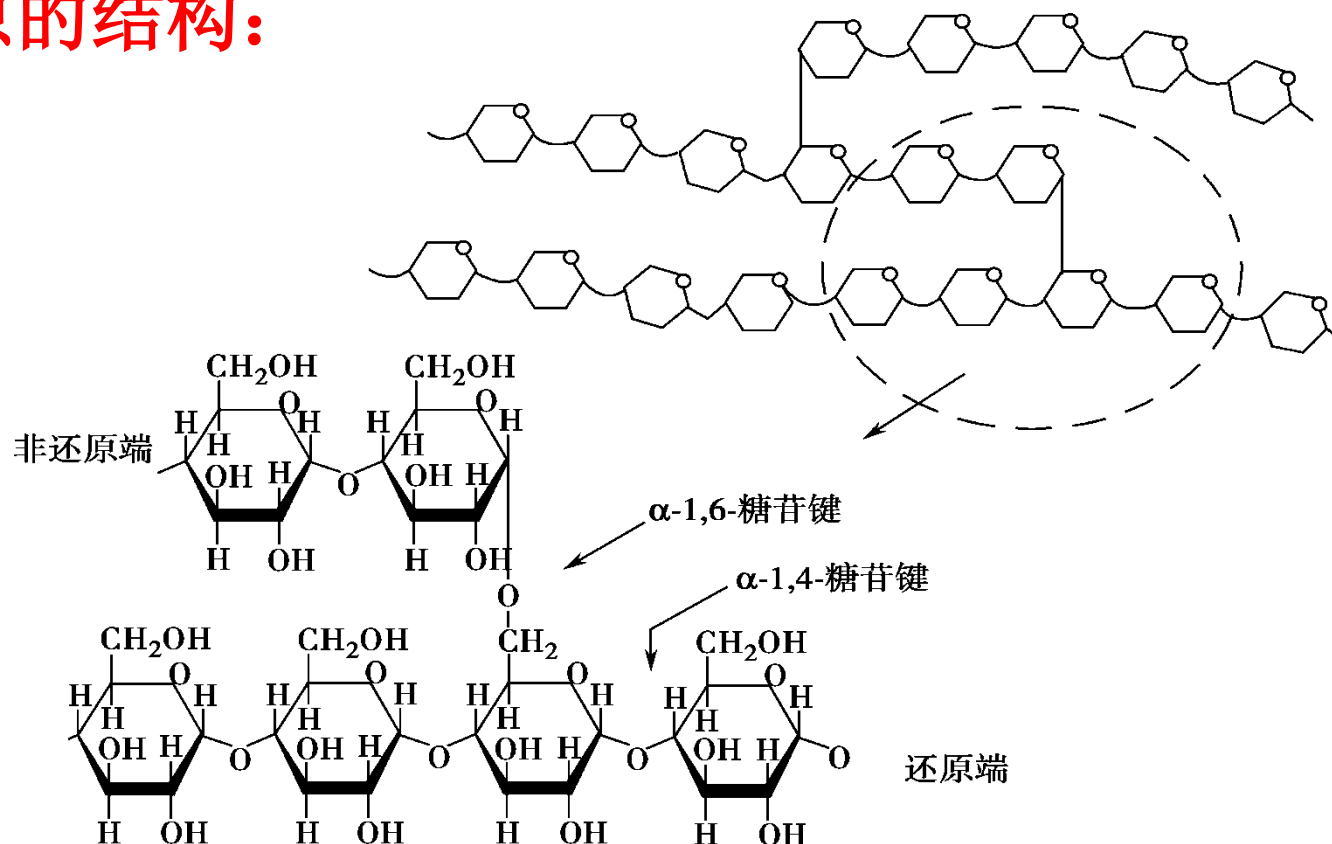
- 1. 糖酵解在胞液中进行，由葡萄糖或糖原产生乳酸和 ATP，1mol 葡萄糖净生成 2mol ATP
1 分子葡萄糖净生成 **2 个 ATP**，
糖原葡萄糖单位净生成 **3 个 ATP**。
- 2. 三羧酸循环在线粒体中进行，经过 **4 次脱氢**，**2 次脱羧**，**1 次底物水平磷酸化**，**3 个关键酶**。
1 分子乙酰 CoA 经三羧酸循环产生 **10 个 ATP**



3. 三羧酸循环是糖、脂肪和氨基酸代谢联系的枢纽，也是糖、脂肪、蛋白质最终代谢通路。
4. 有氧氧化是机体供能的主要方式，1分子葡萄糖经有氧氧化生成 CO_2 和 H_2O ，净生成 30 或 32 个 ATP。
5. 磷酸戊糖途径主要提供 5- 磷酸核糖和 $\text{NADPH}+\text{H}^+$

第三节 糖原的合成与分解

糖原的结构:



一、糖原的合成代谢

(一) **定义**：单糖（主要是葡萄糖）合成糖原的过程。

特点：消耗 **ATP、UTP**

糖原合成的器官和部位：主要是肝脏和肌肉，胞液。

- **反应特性：**

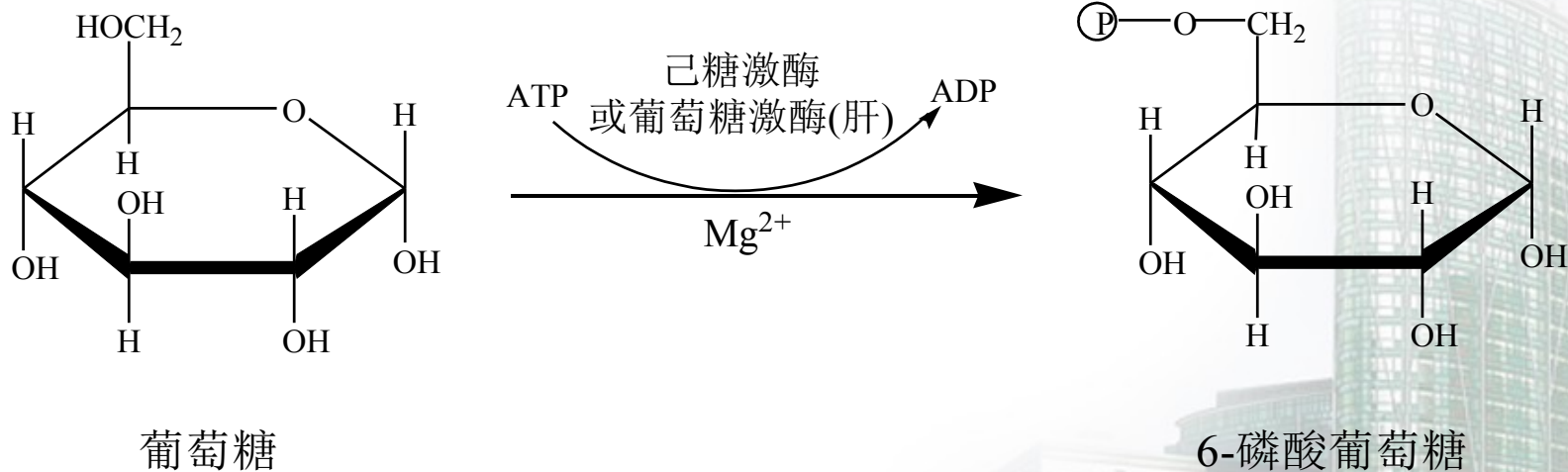
糖原合成是耗能过程，需要糖原引物分子，单个葡萄糖分子需要活化为活性葡萄糖（UDP G）。

- **反应的关键酶：**
糖原合酶

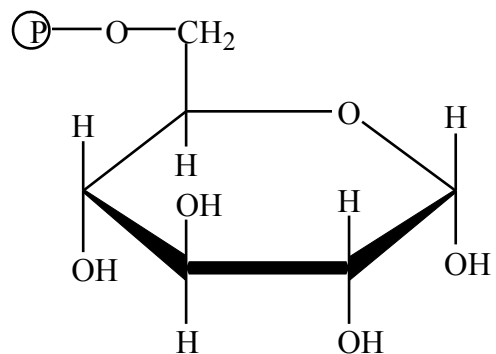


(二) 糖原合成的基本反应过程

1. 葡萄糖磷酸化生成 6- 磷酸葡萄糖

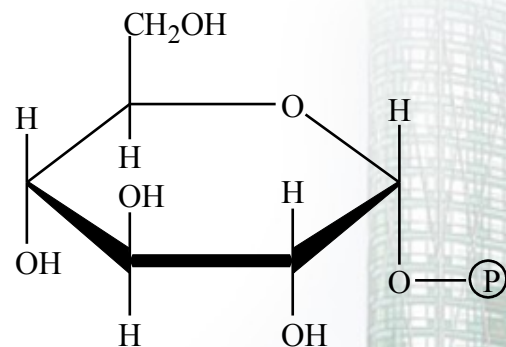


2. 6- 磷酸葡萄糖转变为 1- 磷酸葡萄糖



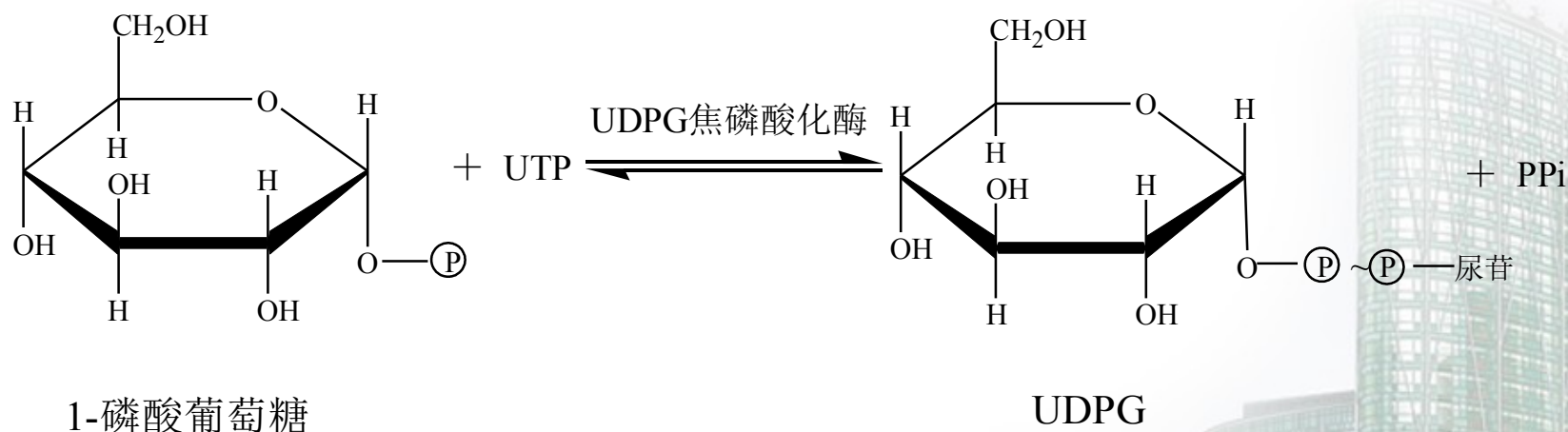
6-磷酸葡萄糖

磷酸葡萄糖变位酶



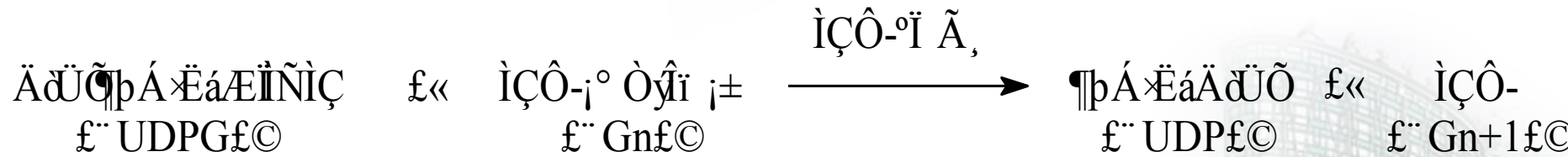
1-磷酸葡萄糖

3. 1- 磷酸葡萄糖生成二磷酸尿苷葡萄糖 (UDPG)



UDPG : 糖原合成中 G 供体或 “活性 G 单位”

4、从 UDPG 合成糖原



指细胞内原有的较小的糖原分子。

以 α -1,4-糖苷键相连



糖原合酶只能延长糖链，不能形成分支。

当糖链达到 12~18 个葡萄糖残基时，**分支酶**将一段（6-7 个葡萄糖单位）转移到邻近的糖链上，以 α -1, 6-糖苷键相连而形成分支。

二、糖原的分解代谢 (glycogenolysis)

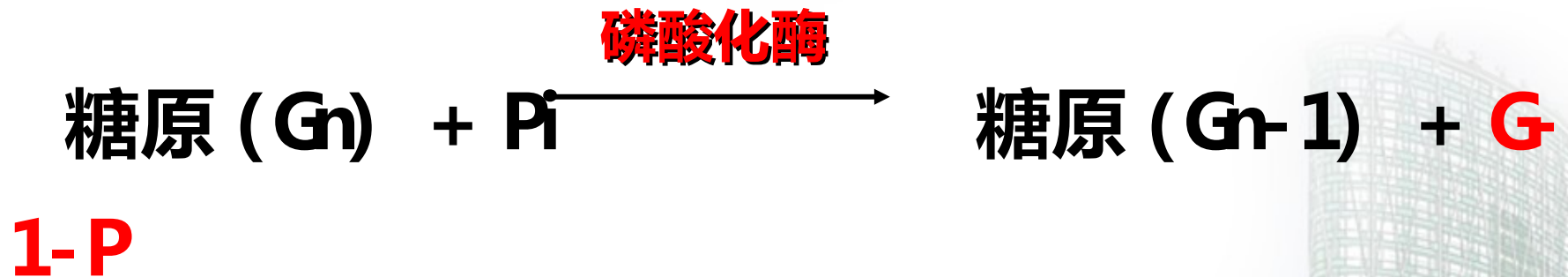
- **定义**：肝糖原分解为葡萄糖以补充血糖的过程。
- **作用器官和部位**：肝和肾

肌肉缺乏**葡萄糖 6- 磷酸酶**，肌糖原不能分解为葡萄糖，产生的 6- 磷酸葡萄糖可经糖酵解转变为乳酸。

- **关键酶**：磷酸化酶

反应过程

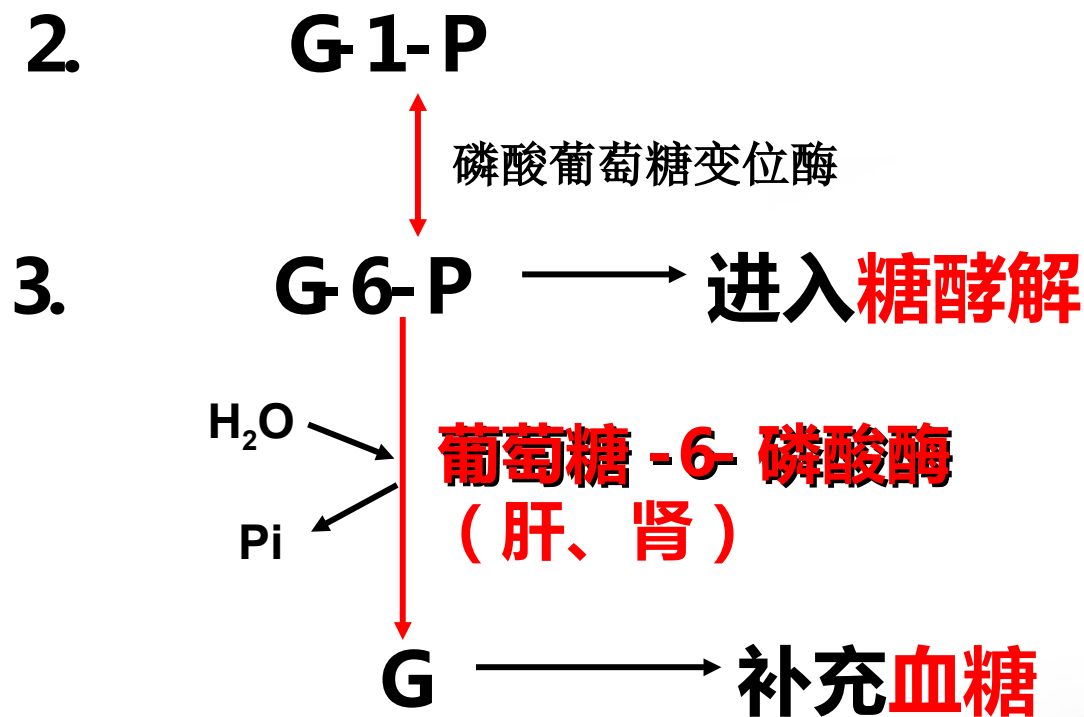
1. 糖原磷酸解为 1- 磷酸葡萄糖



当距分支点 4 个葡萄糖残基时，糖原磷酸化酶不

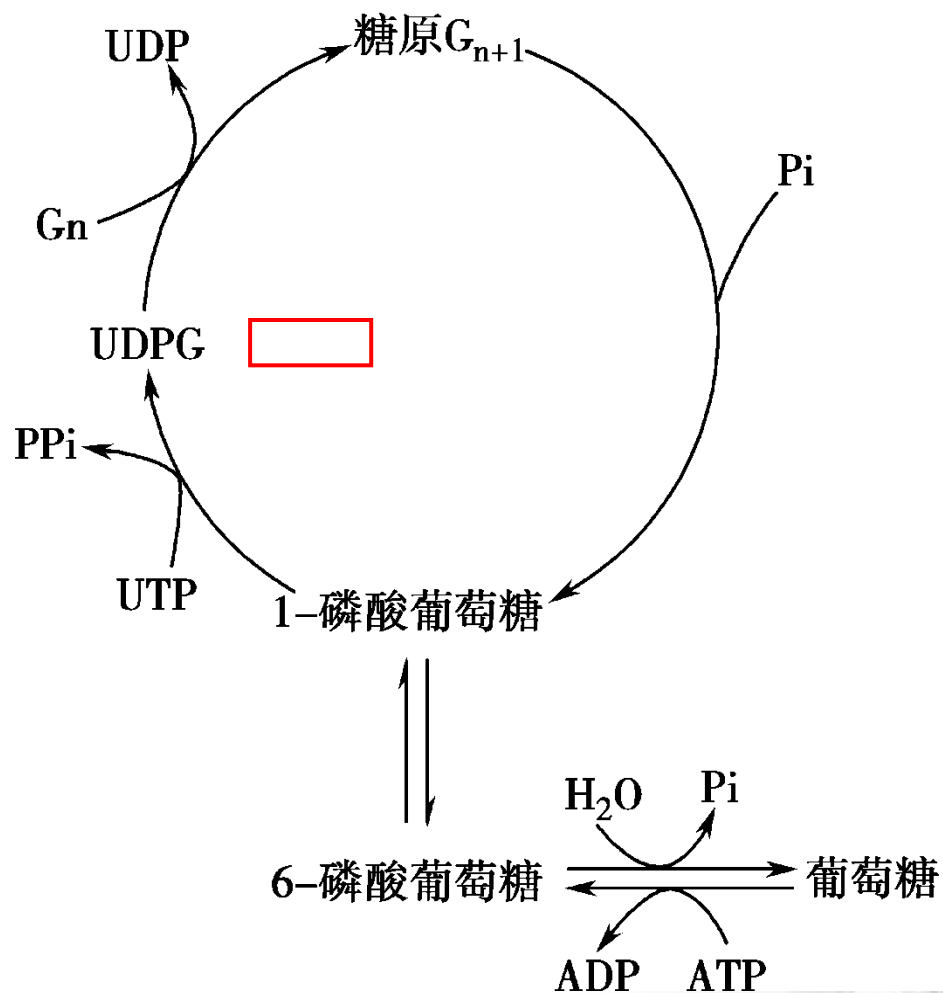
再

起作用。由脱支酶（双功能酶，转移酶、糖苷酶的合



肌肉缺乏葡萄糖 -6- 磷酸酶，肌糖原只能酵解或有氧氧化，不能直接补充血糖。

糖原的合成和分解总结图



点滴积累

- 1. 肝糖原分解为葡萄糖的过程称为糖原分解，因肌肉中缺乏葡萄糖-6-磷酸酶，故**肌糖原不能直接分解为葡萄糖**。
- 2. 由单糖合成糖原的过程称为糖原的合成。 **UDPG**为糖原合成时活性葡萄糖供体。
- 3. 糖原合成与分解的**关键酶分别为糖原合酶和磷酸化酶**。

第四节 糖异生作用

定义：由非糖物质转变为葡萄糖或糖原的过程，称为糖异生。

原料：甘油、丙酮酸、乳酸、三羧酸循环的中间产物、
生糖氨基酸。

部位：肝脏（主要）肾脏（次要，酸中毒时加强）。

一、糖异生途径

- 糖酵解中三步“**能障**”由另外**四种酶**（糖异生的关键酶）催化完成。

糖酵解关键酶

- 己糖激酶
- 磷酸果糖激酶
- 丙酮酸激酶

糖异生关键酶

- 葡萄糖 - 6- 磷酸酶
- 果糖 - 1. 6- 二磷酸酶
- 丙酮酸羧化酶
- 磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶

1. 丙酮酸羧化支路



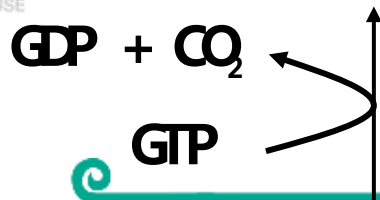
丙酮酸羧化酶仅存在于线粒体；

磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶主要存在于胞液中；

消耗 2 分子 ATP，不可逆。

磷酸烯醇式丙酮酸

磷酸烯醇型丙酮酸羧激酶



胞液

天冬氨酸

草酰乙酸

苹果酸

天冬氨酸

苹果酸

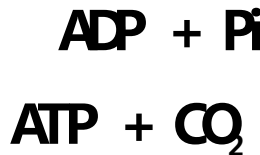
α -酮戊二酸

谷氨酸

草酰乙酸

NAD^+

$\text{NADH} + \text{H}^+$



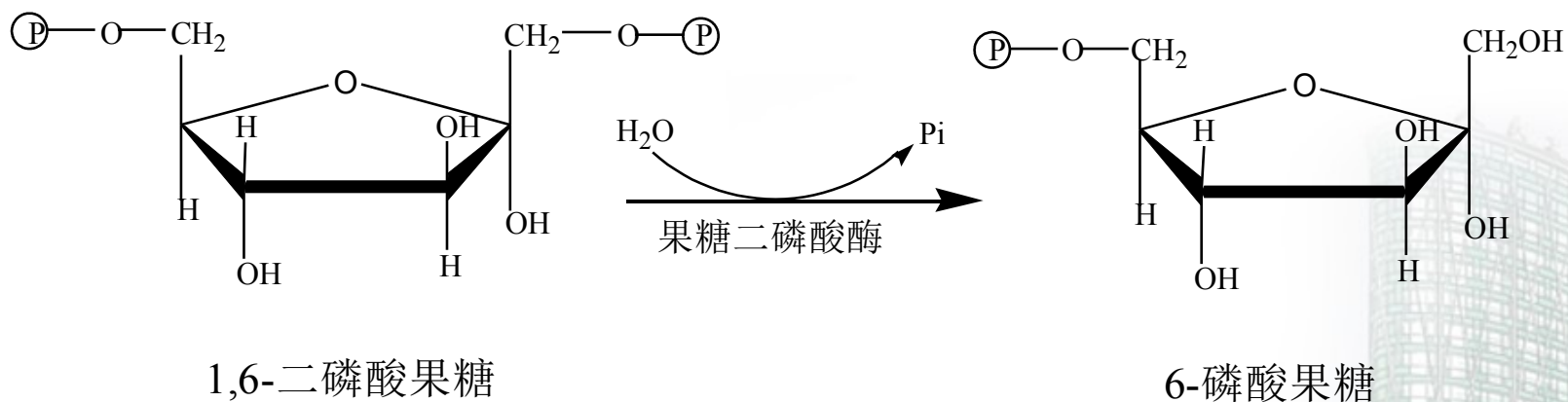
丙酮酸羧化酶

丙酮酸

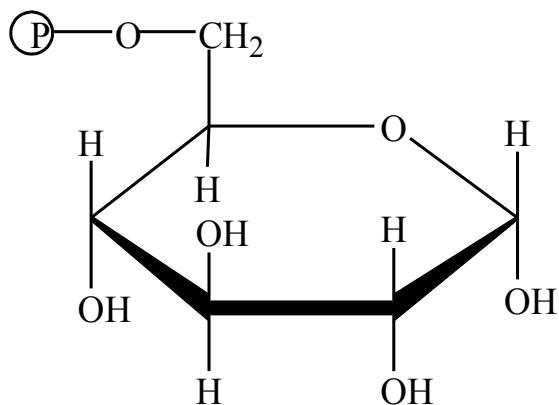
丙酮酸

线粒体

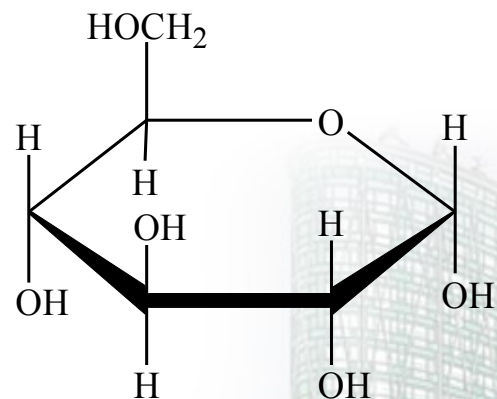
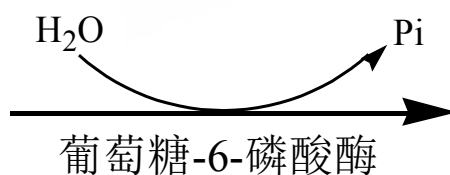
2.1.6 二磷酸果糖转变为 6-磷酸果糖



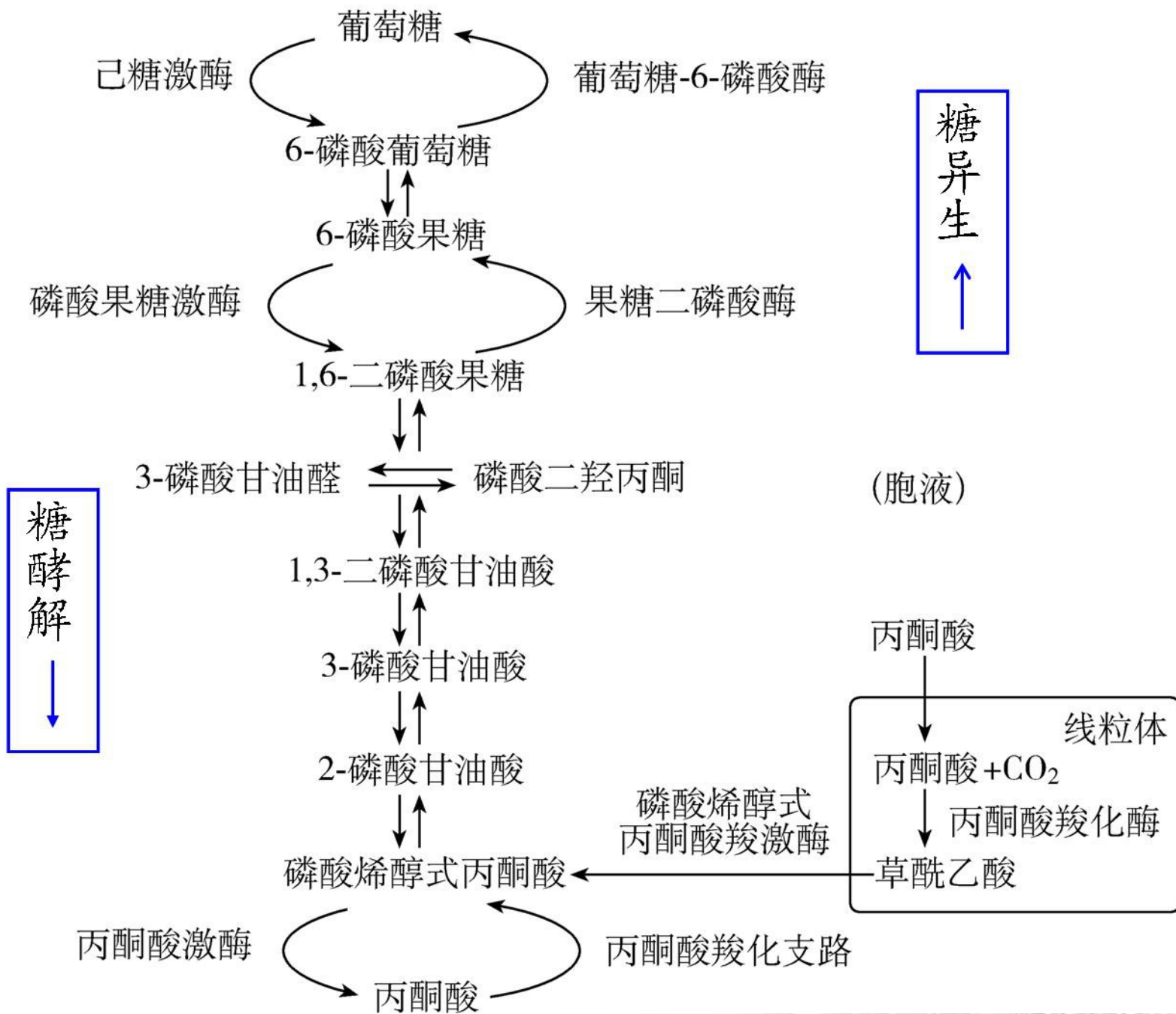
3. 6- 磷酸葡萄糖水解生成葡萄糖



6-磷酸葡萄糖



葡萄糖



(二) 甘油和乳酸的糖异生途径

甘油： α - 磷酸甘油激酶；

以磷酸二羟丙酮的方式进入糖异生途径。

乳酸：乳酸脱氢酶；

丙酮酸 → 进线粒体
糖异生的方式生成葡萄糖。

三、糖异生的生理意义



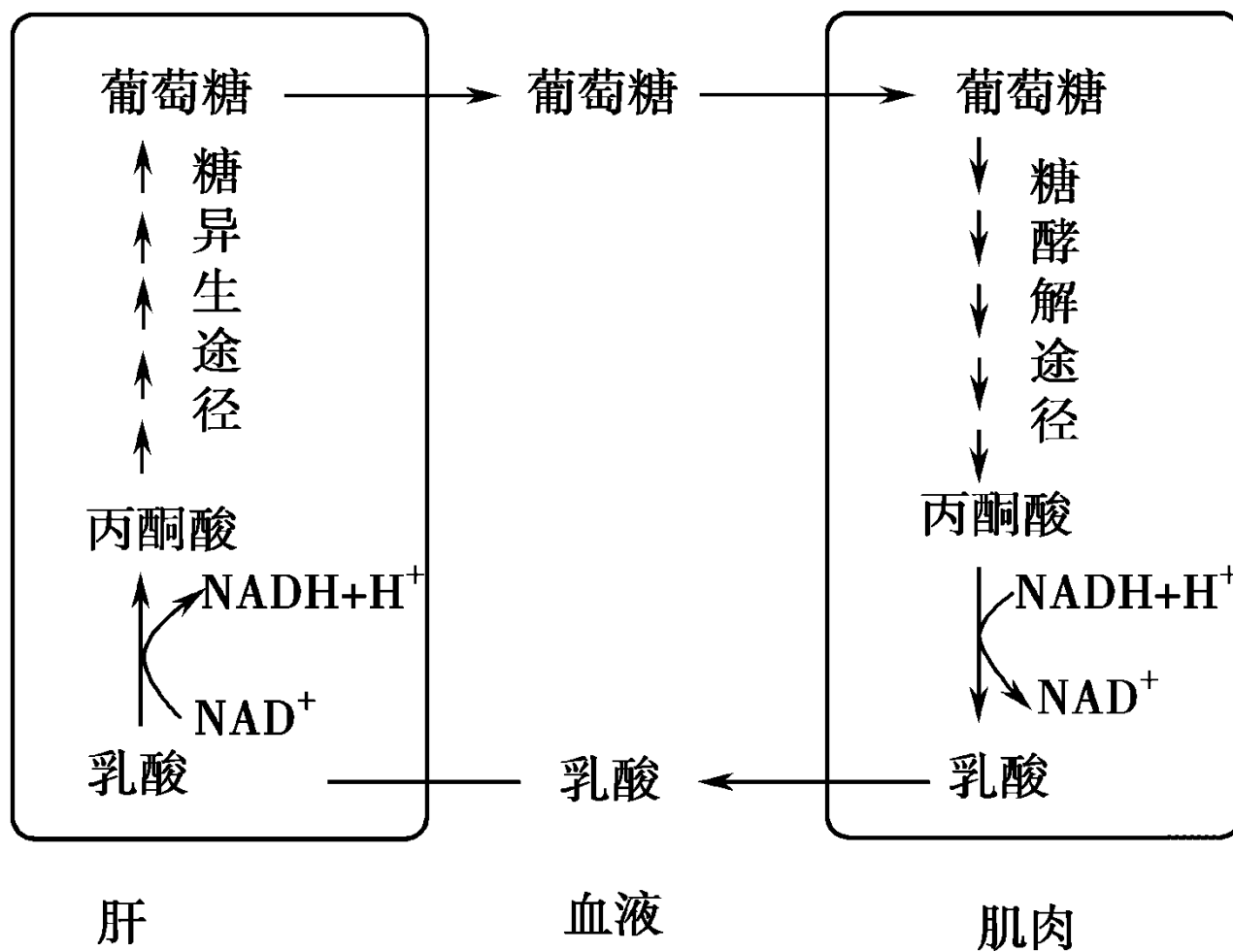
(一) 维持**血糖浓度恒定** (长期饥饿)

(二) 利于乳酸的再利用

乳酸循环 (Cori 循环)

(三) 协助氨基酸代谢





乳酸循环

点滴积累

1. **肝脏**是糖异生的主要场所，其次是肾脏。
2. 糖异生的途径与糖酵解途径互为“可逆”，糖酵解中 3 个关键步骤分别由**糖异生的 4 个关键酶**催化。
3. 糖异生最主要的生理意义是在**饥饿时维持血糖浓度的相对恒定**，其次是回收乳酸能量、补充肝糖原和参与酸碱平衡调节。

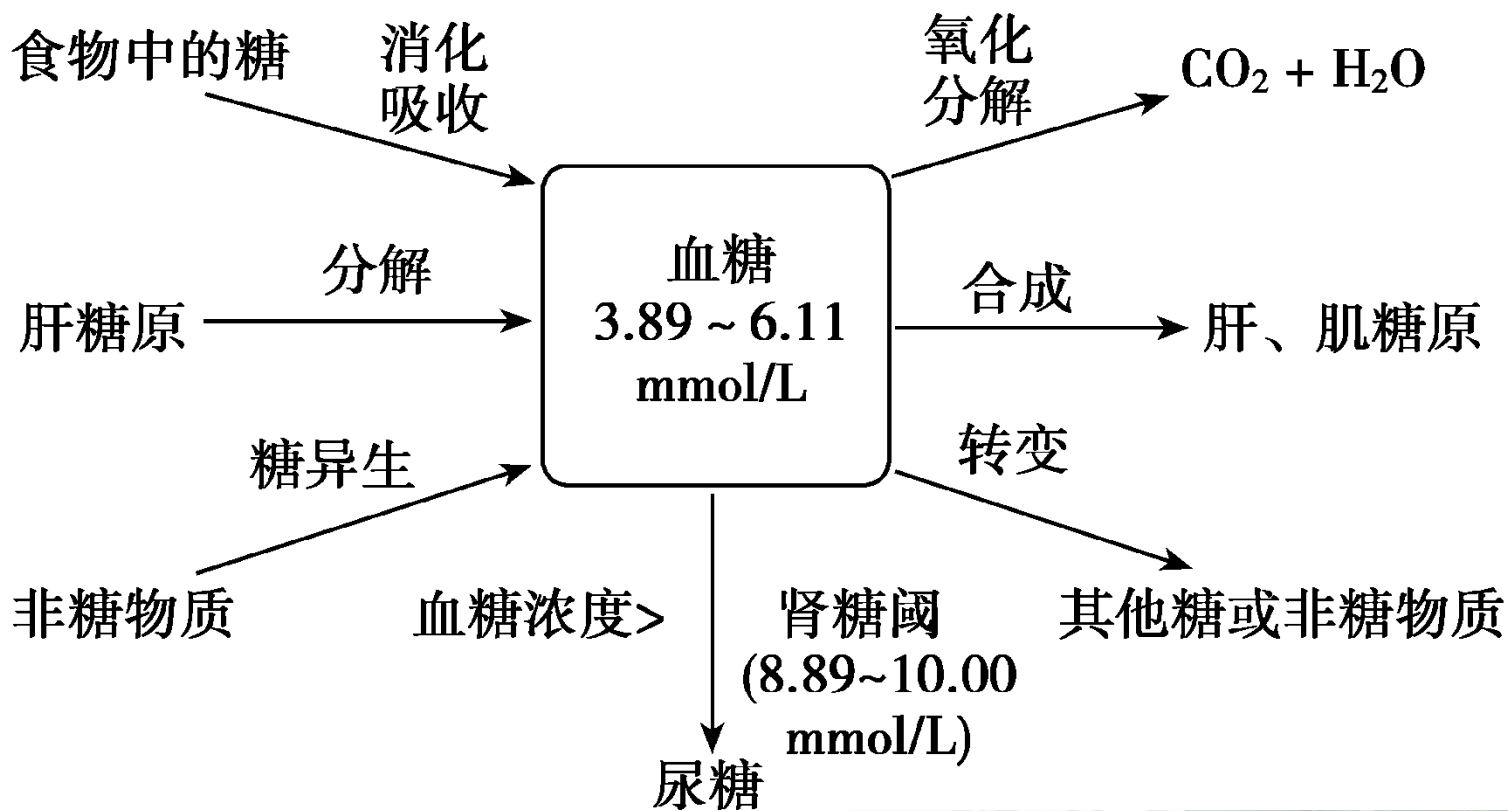
第五节 血糖及其调节

一、血糖：指血液中的葡萄糖。

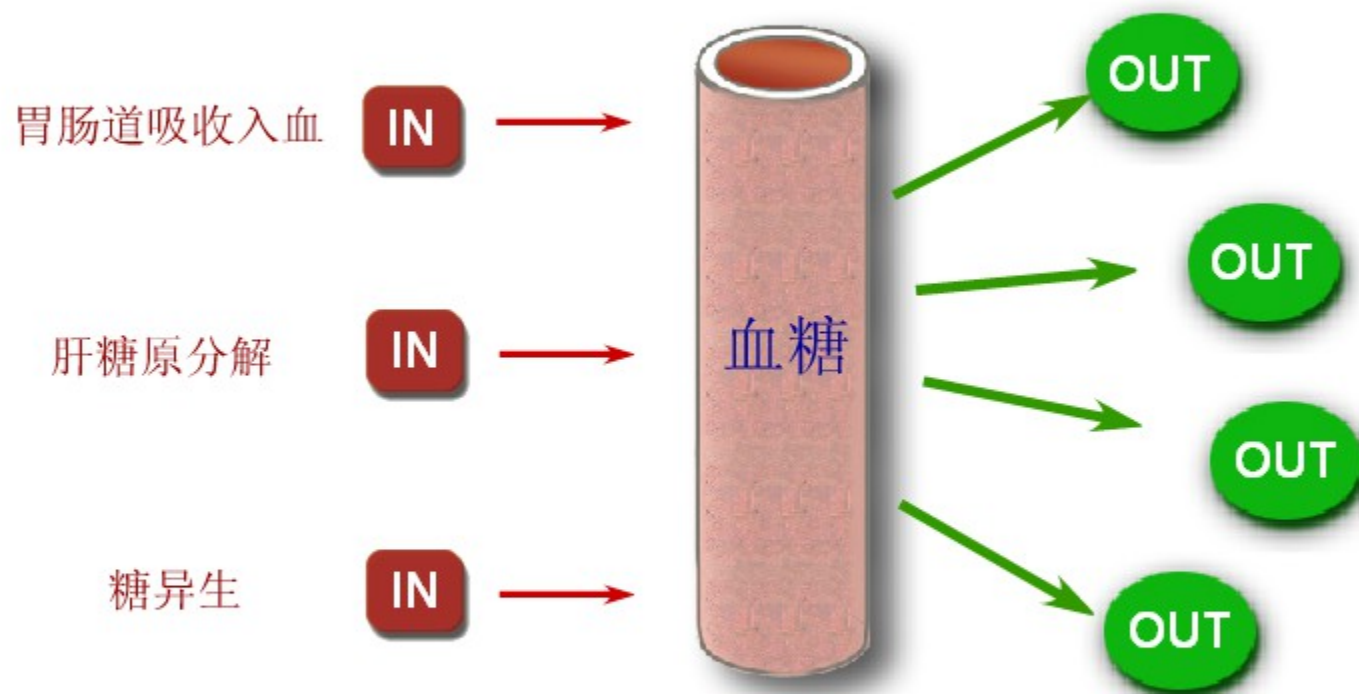
正常人空腹血糖水平恒定
维持在 $3.89 \sim 6.11 \text{ mmol/L}$ 。



血糖的来源与去路：



血糖代谢过程示意图



播放 停止

二、血糖浓度的调节

1. 肝对血糖的调节

进食后血糖**升高**，肝细胞**合成**糖原；

饥饿时血糖**降低**，肝糖原**分解**提供葡萄糖，糖异生亦可补充血糖。



2. 血糖的激素调节

• 升高血糖的激素

胰高血糖素
糖皮质激素
肾上腺素

• 降低血糖激素

胰岛素



三、血糖水平的异常

1. 高血糖

指空腹血糖高于

7.0mmol /L (130mg/dL) 时称为高血糖。

(1) 生理性高血糖与糖尿

- * 一次摄入大量糖 (饮食性糖尿)
- * 情绪激动 (情感性性糖尿)



**(2) 病理性高血糖与糖尿
常见于内分泌功能紊乱。**

(3) 肾性糖尿：肾小管重吸收 G 障碍。



2. 低血糖



空腹血糖低于 3.0mmol /L 时称为低血糖。

- * 饥饿**
- * 严重肝病**
- * 激素分泌异常**
- * 控制糖代谢因素异常**



3. 糖尿病及常用药物

(1) 糖尿病

根据其病因目前分为 1 型、 2 型、其他特殊类型糖尿病和妊娠期糖尿病。

- **1 型，胰岛素依赖型（胰岛素分泌不足）**
- **2 型，非胰岛素依赖型（胰岛素受体敏感性降低或缺陷）**

(2) 治疗糖尿病的药物

- 口服降血糖药

目前有四大类：

即磺脲类、双胍类、 α -葡萄糖苷酶抑制剂及噻唑烷二酮（胰岛素增敏剂）。

- 胰岛素

主要有两种：

按来源分为动物胰岛素、人胰岛素和胰岛素类似物。

根据起效快慢和维持时间分为短效、中效、长效

案例分析

案例

- 患者，男性，59岁，已婚。于4个月前开始自觉口渴、多饮、多尿，不伴有尿急、尿痛及血尿。无明显多食，也无饥饿感。当时未重视，也未检查治疗；近一个月上述症状明显加重，并出现严重乏力、消瘦（一月内体重下降4kg），故前来就诊。

案例分析

体格检查：

体温 36.5°C ，脉搏 74 次 / 分，呼吸 20 次 / 分，
血压 120/80mmHg，身高 170cm，体重 80kg，肥胖
体型。

实验室检查：

尿常规：糖（ - ），酮体（ - ），蛋白（ - ），隐
血（ - ）。空腹血糖 7.0mmol/L 。

分析：2型糖尿病？依据是什么？

点滴积累

- 1. 血糖的**三个主要来源**肠道消化吸收、肝糖原分解、糖异生。**三个主要去路**氧化分解、合成糖原、转变成其他糖类及非糖物质。
- 2. 调节血糖的激素：**胰岛素是降血糖激素**，而胰高血糖素、肾上腺素、糖皮质激素和生长素是升血糖激素。
- 3. 血糖浓度异常：有高血糖、低血糖、糖尿病等。

目标检测

1. 三羧酸循环有何特点？
2. 试从以下几方面列表比较糖酵解和有氧氧化的异同。
 - (1) 代谢部位
 - (2) 反应条件
 - (3) 生成 ATP 的方式及产生 ATP 的数量
 - (4) 终产物
 - (5) 生理意义
3. 简述 6- 磷酸葡萄糖在糖代谢中的作用。

目标检测

1. 合成糖原时，葡萄糖的供体是 ()

A G-1-P

B G-6-P

C

UDPG

D CDPG

2. 磷酸戊糖途径是在细胞的哪个部位进行的 ()

A 细胞核

B 线粒体

C 胞液

D 微粒体

3. 肌糖元不能直接补充血糖，是因肌肉组织中含 ()

A 磷酸化酶

B 己糖激酶

C 6-磷酸葡萄糖脱氢酶

D 葡萄糖-6-磷酸酶

4. 成熟红细胞的能源主要来自 ()

A 糖的有氧氧化途径

B 磷酸戊糖途径

C 糖酵解途径

D 糖异生途径

目标检测

5. 三羧酸循环的第一步反应产物是：()

- A 柠檬酸 B 草酰乙酸 C 乙酰 CoA D CO_2

6. 三羧酸循环中主要的限速酶是 ()

- A 苹果酸脱氢酶 B α 酮戊二酸脱氢酶
C 异柠檬酸脱氢酶 D 琥珀酸脱氢酶

7. 下列哪个激素可使血糖浓度下降？()

- A 肾上腺素 B 胰高血糖素 C 胰岛素 D 糖皮质激素

8. 1分子乙酰 CoA彻底氧化可生成的 ATP 数是 ()

- A 12 B 10 C 8 D 2