

第6单元 糖代谢

(一) 名词解释

1. 糖酵解； 2. 三羧酸循环； 3. 糖异生； 4. 乳酸循环； 5. 巴斯德效应

(二) 填空

1. 糖酵解途径中三个酶所催化的反应是不可逆的，这三个酶依次是_____、_____和_____。
2. 1 摩尔葡萄糖酵解能净生成_____摩尔 ATP，而 1 摩尔葡萄糖在有氧条件下彻底氧化成二氧化碳和水可产生摩尔 ATP_____。
3. 组成丙酮酸脱氢酶系的三种主要酶是_____、_____、_____、五种辅酶是_____、_____、_____、_____、_____。
4. 三羧酸循环每循环一周，共进行_____次脱氢，其中 3 次脱氢反应的辅酶是_____、1 次脱氢反应的辅酶是_____。
5. 糖酵解过程中产生的 $\text{NADH} + \text{H}^+$ 必须依靠_____穿梭系统或_____穿梭系统才能进入线粒体，分别转变成线粒体中的_____和_____。
6. 乙醛酸循环不同于三羧酸循环的两个关键酶是_____和_____。
7. 在外周组织中，葡萄糖转变成乳酸，乳酸经血液循环到肝脏，经糖异生作用再转变成葡萄糖这个过程称为_____循环，该循环净效应是_____能量的。
8. 糖原合成的关键酶是_____，糖原分解的关键酶是_____。

(三) 选择题（在备选答案中选出 1 个或多个正确答案）

1. 缺氧条件下，糖酵解途径生成的 NADH 代谢去路是
- A. 进入呼吸链供应能量 B. 丙酮酸还原为乳酸
- C. 甘油酸-3-磷酸还原为甘油醛-3-磷酸
- D. 在醛缩酶的作用下合成果糖-1, 6-二磷酸
- E. 以上都不是
2. 糖原分子中 1 摩尔葡萄糖残基转变成 2 摩尔乳酸，可净产生多少摩尔 ATP?
- A. 1 B. 2 C. 3 D. 4 E. 5
3. 下列哪种情况可导致丙酮酸脱氢酶系活性升高?
- A. ATP/ADP 比值升高 B. $\text{CH}_3\text{COCOA/CoA}$ 比值升高 C. NADH/NAD^+ 比值升高
- D. 能荷升高 E. 能荷下降
4. 在肝脏中 2 摩尔乳酸转变成 1 摩尔葡萄糖，需要消耗多少摩尔的高能化合物?
- A. 2 B. 3 C. 4 D. 5 E. 6
5. 在三羧酸循环中，下列哪个反应不可逆?
- A. 柠檬酸→异柠檬酸 B. 琥珀酸→延胡索酸 C. 延胡索酸→苹果酸
- D. 苹果酸→草酰乙酸 E. 草酰乙酸+乙酰辅酶 A→柠檬酸
6. 关于磷酸戊糖途径的叙述，哪一项是错误的?
- A. 碘乙酸及氟化物可抑制其对糖的氧化 B. 6-磷酸葡萄糖脱氢的受体是 NADP^+
- C. 转酮醇酶需要 TPP 作为辅酶 D. 在植物体中，该反应与光合作用碳代谢相通
- E. 核糖-5-磷酸是联系糖代谢和核酸代谢的关键分子
7. 下列哪种酶既在糖酵解中发挥作用，又在糖异生作用中发挥作用？（武汉大学 2001 考研题）
- A. 3-磷酸甘油醛脱氢酶 B. 丙酮酸脱氢酶 C. 丙酮酸激酶
- D. 己糖激酶 E. 果糖-1, 6-二磷酸酶

(四) 判断题

1. 肝脏果糖磷酸激酶 (PFK) 受 F-2, 6-BP 的抑制。
2. 沿糖酵解途径逆行，可将丙酮酸、乳酸等小分子前体物质转化为葡萄糖。
3. 所有来自磷酸戊糖途径的还原能都是在该循环途径的前三步反应中产生的。
4. 乙醛酸循环作为三羧酸循环的补充，广泛存在于动物、植物和微生物体内。
5. 人和动物体内，肝糖原降解可以使血糖水平升高，而肌糖原分解不能直接补充血糖。
6. 磷酸戊糖途径本身不涉及氧的参与，故该途径是一种无氧途径。
7. 柠檬酸循环是分解与合成的两用途途。

(五) 分析和计算

1. 计算由 2 摩尔丙酮酸转化成 1 摩尔葡萄糖需要提供多少摩尔的高能磷酸化合物？
2. 简要说明甘油彻底氧化成 CO_2 和 H_2O 的过程，并计算 1 摩尔甘油彻底氧化成 CO_2 和 H_2O 净生成多少摩尔的 ATP？
3. 为什么说葡萄糖-6-磷酸是各个糖代谢途径的交叉点？
4. 简述血糖的来源和去路，人体如何维持血糖水平的恒定？
5. 在 EMP 途径中，磷酸果糖激酶受 ATP 的反馈抑制，而 ATP 却又是磷酸果糖激酶的一种底物，试问为什么在这种情况下并不使酶失去效用？
6. 如何理解三羧酸循环的双重作用？三羧酸循环中间体草酰乙酸消耗后必须及时进行回补，否则三羧酸循环就会中断，植物体内草酰乙酸有哪几种回补途径？

参考答案

(一) 名词解释

1. 指糖原或葡萄糖分子在无氧条件下氧化分解成为乳酸并产生 ATP 的过程，由于该过程与酵母菌、细菌在厌氧条件下生醇发酵的过程相似，故之称为。
2. 又称柠檬酸循环、Krebs 循环。即在线粒体中，糖、脂、氨基酸等有机物代谢的共同中间体乙酰辅酶 A 首先与草酰乙酸合成柠檬酸，再经过脱氢、脱羧等一系列的酶促反应，将乙酰辅酶 A 转变成 CO_2 并生成 NADH 和 FADH_2 的过程。它是生物体内糖、脂、氨基酸等有机物代谢的枢纽。
3. 在糖异生途径中，由丙酮酸羧化酶和磷酸稀醇式丙酮酸羧激酶催化丙酮酸经草酰乙酸转变成磷酸稀醇式丙酮酸的过程称为丙酮酸羧化支路，丙酮酸羧化支路消耗 ATP 使丙酮酸绕过“能障”生成磷酸稀醇式丙酮酸进入糖异生途径。乳酸、丙酮酸、甘油、脂肪酸、及某些氨基酸在生物体内可以通过糖异生作用转化成葡萄糖或糖原。
4. 动物体肌肉组织在缺氧条件下进行糖酵解作用，产生大量乳酸，少部分乳酸随尿液排除体外，但大部分乳酸经血液循环运至肝脏，在肝细胞内通过糖异生途径转变成葡萄糖，葡萄糖随血液循环供给肌肉、脑等组织利用。这种乳酸被再次利用的过程称为乳酸循环，又称克立氏循环。
5. 氧降低兼性厌氧微生物对葡萄糖的消耗，并加快细胞生长速度的现象称为巴斯德效应。

(二) 填空

1. 己糖激酶，果糖磷酸激酶，丙酮酸激酶； 2. 2, 32； 3. 丙酮酸脱氢酶，硫辛酸乙酰移换酶，二氢硫辛酸脱氢酶，TPP，硫辛酸，CoASH，NAD，FAD； 4. 4, NAD^+ ，FAD； 5. 甘油-3-磷酸，苹果酸-天冬氨酸， FADH_2 ，NADH； 6. 异柠檬酸裂解酶，苹果酸合成酶； 7. 克立氏循环 (Cori 循环)，消耗； 8. 糖原合成酶，糖原磷酸化酶；

(三) 选择题

1. (B) 糖酵解过程是在细胞质中进行的，在缺氧条件下，产生的胞质 NADH 无法将电子

交给 O_2 ，故不可能进入呼吸链氧化供能。甘油酸-3-磷酸不能直接转变为甘油醛-3-磷酸。醛缩酶的辅助因子为 Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 等无机离子。所以酵解过程产生的胞质 NADH 只有一条去路，还原丙酮酸生成乳酸。

2. (C) 糖原在体内磷酸解得到的产物为葡萄糖-1-磷酸，经磷酸葡萄糖变位酶作用生成葡萄糖-6-磷酸，它进入酵解途径先生成 2 摩尔丙酮酸、3 摩尔 ATP、2 摩尔 $NADH + H^+$ ，2 摩尔丙酮酸随后在乳酸脱氢酶作用下还原成乳酸，使 2 摩尔 $NADH + H^+$ 转化为 NAD^+ 。

3. (E) 由于丙酮酸脱氢酶系受产物抑制、能荷控制、磷酸化共价调节，因此 $CH_3-CO-CoA/CoA$ 比值升高， $NADH/NAD^+$ 比值升高，ATP/ADP 比值升高（即能荷升高）都导致丙酮酸脱氢酶系活性降低，而 ATP/ADP 比值下降，丙酮酸脱氢酶系活性增强。

4. (E) 在肝脏中，2 摩尔乳酸在乳酸脱氢酶作用下生成 2 摩尔丙酮酸和 2 摩尔 NADH，2 摩尔丙酮酸沿糖异生途径转变成 1 摩尔葡萄糖时，需要消耗 2 摩尔 GTP、4 摩尔 ATP、2 摩尔 NADH，因此 2 摩尔乳酸转变成 1 摩尔葡萄糖需要消耗 6 摩尔高能化合物。

5. (E) 在三羧酸循环中，有两步反应是不可逆的，一是柠檬酸合成酶催化的由草酰乙酸和乙酰辅酶 A 生成柠檬酸的反应，另一个是 α -酮戊二酸脱氢酶系催化的由 α -酮戊二酸氧化脱羧生成琥珀酰 CoA 的反应。由于这两步反应不可逆，三羧酸循环不能逆转。

6. (A) 碘乙酸及氟化物是巯基酶的不可逆抑制剂，糖代谢中甘油醛-3-磷酸脱氢酶可被其抑制，从而抑制糖酵解、丙酮酸的生成及三羧酸循环途径，但磷酸戊糖途径无巯基酶，故该途径不受抑制。转酮醇酶一般需要 TPP 作为辅酶。答案 B、D、E 也是正确的。

7. (A) 在糖酵解、糖异生作用都没有丙酮酸脱氢酶。糖酵解作用中，己糖激酶、酶丙酮酸激酶催化的反应均为不可逆反应。果糖-1, 6-二磷酸属于酯酶只存在于糖异生中。

(四) 判断题

1. 错。果糖-2, 6-二磷酸 (F-2, 6-BP) 是糖酵解过程的一个重要调节物。它是果糖磷酸激酶强有力的别构激活剂。在肝脏中，通过它控制果糖磷酸激酶的构象，调节糖酵解的速率。

2. 错。将丙酮酸、乳酸等小分子前体物质合成葡萄糖即糖异生，其途径基本按糖酵解逆行过程，但糖酵解中的 3 处不可逆反应需要其它酶来完成。

3. 对。磷酸戊糖途径分为氧化阶段和非氧化阶段，氧化阶段的三步反应中，在葡萄糖-6-磷酸脱氢酶和葡萄糖酸-6-磷酸脱氢酶的作用下生成 NADPH，为生物体内的物质合成准备了还原能。

4. 错。乙醛酸循环只存在于植物和某些微生物体内。动物体缺乏异柠檬酸裂解酶和苹果酸合成酶，因此没有乙醛酸循环途径。

5. 对。肝糖原降解后生成的葡萄糖-1-磷酸经变位酶的作用生成葡萄糖-6-磷酸，再在葡萄糖-6-磷酸酶（酯酶）作用下转变成葡萄糖，直接补充血糖。而肌肉组织缺乏葡萄糖-6-磷酸酶，它只能进行糖酵解生成乳酸，在肝脏中通过糖异生作用，间接转化成血糖。

6. 错。磷酸戊糖途径本身不涉及氧的参与，但该途径产生大量的 NADPH，NADPH 可以将电子最终交给 O_2 ，使 $NADP^+$ 得到再生，以维持磷酸戊糖途径的持续进行。

7. 对。柠檬酸循环具有双重作用，一方面它是绝大多数生物体进行氧化供能的主要途径，另一方面柠檬酸循环中的各种中间体为细胞进行物质合成提供碳骨架。

(五) 分析和计算

1. 首先， $2 \text{ 摩尔丙酮酸} + 2CO_2 + 2ATP \rightarrow 2 \text{ 草酰乙酸} + 2ADP + 2Pi$ ； $2 \text{ 草酰乙酸} + 2GTP \rightarrow 2 \text{ 磷酸稀醇式丙酮酸} + 2GDP + 2CO_2$ ；其次，2 摩尔磷酸稀醇式丙酮酸沿糖酵解途径逆行至转变成 2 摩尔甘油醛-3-磷酸，其中在甘油酸-3-磷酸转变成甘油酸-1, 3-二磷酸过程中，消耗 2 摩尔 ATP；甘油酸-1, 3-二磷酸转变成甘油醛-3-磷酸中，必须供给 2 摩尔的 $NADH \cdot H^+$ 。最后，2 摩尔的磷酸丙糖先后在醛缩酶、果糖-1, 6-二磷酸酶、异构酶、葡萄糖-6-磷酸酶作用下，生成 1 摩尔葡萄糖，该过程无能量的产生与消耗。从上述三阶段可看出，2 摩尔丙酮酸转化成 1 摩

尔葡萄糖需要提供 6 摩尔高能磷酸化合物，其中 4 摩尔为 ATP，2 摩尔为 GTP。

2. 甘油 + ATP → α -磷酸甘油 + ADP; α -磷酸甘油 + NAD⁺ → NADH · H⁺ + 磷酸二羟丙酮; 磷酸二羟丙酮 → 甘油醛-3-磷酸; 甘油醛-3-磷酸 + NAD⁺ + Pi → 甘油酸 1,3-二磷酸 + NADH · H⁺; 甘油酸 1,3-二磷酸 + ADP → 甘油酸-3-磷酸 + ATP; 甘油酸-3-磷酸 → 甘油酸-2-磷酸 → 磷酸稀醇式丙酮酸; 磷酸稀醇式丙酮酸 + ADP → 丙酮酸 + ATP; 丙酮酸 + NAD⁺ → 乙酰辅酶 A + NADH · H⁺ + CO₂; 然后进入乙酰辅酶 A 三羧酸循环彻底氧化，经过 4 次脱氢反应生成 3 摩尔 NADH · H⁺、1 摩尔 FADH₂、以及 2 摩尔 CO₂，并发生一次底物水平磷酸化，生成 1 摩尔 GTP。依据生物氧化时每 1 摩尔 NADH · H⁺和 1 摩尔 FADH₂ 分别生成 2.5 摩尔、1.5, 1 摩尔甘油彻底氧化成 CO₂和 H₂O 生成 ATP 摩尔数为 6 × 2.5 + 1 × 1.5 + 3 - 1 = 18.5。

3. 葡萄糖经过激酶的催化转变成葡萄糖-6-磷酸，可进入糖酵解途径氧化，也可进入磷酸戊糖途径代谢，产生核糖-5-磷酸、赤鲜糖-4-磷酸等重要中间体和生物合成所需的还原性辅酶 II；在糖的合成方面，非糖物质经过一系列的转变生成葡萄糖-6-磷酸，葡萄糖-6-磷酸在葡萄糖-6-磷酸酶作用下可生成葡萄糖，葡萄糖-6-磷还可在磷酸葡萄糖变位酶作用下生成葡萄糖-1-磷酸，进而生成糖原。由于葡萄糖-6-磷酸是各糖代谢途径的共同中间体，由它沟通了糖代谢分解与合成代谢的众多途径，因此葡萄糖-6-磷酸是各糖代谢途径的交叉点。

4. (1) 血糖的来源：食物淀粉的消化吸收，为血糖的主要来源；贮存的肝糖原分解，是空腹时血糖的主要来源；非糖物质如甘油、乳酸、大多数氨基酸等通过糖异生转变而来。

(2) 血糖的去路：糖的氧化分解供能，是糖的主要去路；在肝、肌肉等组织合成糖原，是糖的贮存形式；转变为非糖物质，如脂肪、非必需氨基酸等；转变成其他糖类及衍生物如核糖、糖蛋白等；血糖过高时可由尿排出。(3) 人体血糖水平的稳定：主要靠胰岛素、胰高血糖素、肾上腺素等激素来调节。血糖水平低时，刺激胰高血糖素、肾上腺素的分泌，促进糖原分解和糖异生作用、抑制葡萄糖的氧化分解，使血糖水平升高。当血糖水平较高时，刺激胰岛素分泌，促进糖原合成、抑制糖异生作用，加快葡萄糖的氧化分解，从而使血糖水平下降。

5. 磷酸果糖激酶 (PFK) 是一种调节酶，又是一种别构酶。ATP 是磷酸果糖激酶的底物，也是别构抑制剂。在磷酸果糖激酶上有两个 ATP 的结合位点，即底物结合位点和调节位点。当机体能量供应充足 (ATP 浓度较高) 时，ATP 除了和底物结合位点结合外，还和调节位点结合，是酶构象发生改变，使酶活性抑制。反之机体能量供应不足 (ATP 浓度较低)，ATP 主要与底物结合位点结合，酶活性很少受到抑制。

6. ①在绝大多数生物体内，糖、脂肪、蛋白质、氨基酸等营养物质，都必须通过三羧酸循环进行分解代谢，提供能量。所以它是糖、脂肪、蛋白质、氨基酸等物质的共同分解途径。另一方面三羧酸循环中的许多中间体如 α -酮戊二酸、琥珀酸、延胡索酸、苹果酸、草酰乙酸等又是生物体进行物质合成的前体。所以三羧酸循环具有分解代谢和合成代谢的双重作用。②植物体内，草酰乙酸的回补是通过以下四条途径完成的：a. 通过丙酮酸羧化酶的作用，使丙酮酸和 CO₂ 结合生产草酰乙酸：丙酮酸 + CO₂ + ATP + H₂O → 草酰乙酸 + ADP + Pi; b. 通过苹果酸酶的作用，使丙酮酸和 CO₂ 结合生产苹果酸，苹果酸再在苹果酸脱氢酶作用下生成草酰乙酸：丙酮酸 + CO₂ + NADPH → 苹果酸 + NADP⁺, 苹果酸 + NAD⁺ → 草酰乙酸 + NADH · H⁺; c. 通过乙醛酸循环将 2 摩尔乙酰辅酶 A 生成 1 摩尔的琥珀酸，琥珀酸再转变成苹果酸，进而再生成草酰乙酸；d. 通过磷酸稀醇式丙酮酸羧化酶的作用，使磷酸稀醇式丙酮酸羧化酶和 CO₂ 直接生成草酰乙酸：磷酸稀醇式丙酮酸 + CO₂ + H₂O → 草酰乙酸 + Pi