

Tổng hợp kiến thức: Hô hấp tế bào (Chu trình Krebs và Chuỗi chuyển electron)

Hô hấp tế bào là quá trình phân giải các hợp chất hữu cơ (chủ yếu là glucose) thành các chất đơn giản hơn (CO_2 , H_2O) và giải phóng năng lượng dưới dạng ATP. Quá trình này gồm 3 giai đoạn chính: Đường phân, Chu trình Krebs, và Chuỗi chuyển electron. Bài viết này tập trung vào hai giai đoạn cuối diễn ra trong ti thể.

I. Chu trình Krebs (Chu trình Citric Acid)

Chu trình Krebs là một chuỗi các phản ứng oxy hóa-khử diễn ra trong chất nền của ti thể, nhằm oxy hóa hoàn toàn Acetyl-CoA thành CO_2 , đồng thời tạo ra các chất mang năng lượng như ATP, NADH và FADH_2 .

1. Vị trí diễn ra

Chu trình Krebs diễn ra tại **chất nền ti thể (matrix)** ở tế bào nhân thực.

2. Nguyên liệu và Sản phẩm

Trước khi đi vào chu trình Krebs, phân tử Pyruvic acid (sản phẩm của đường phân) phải được chuyển hóa thành Acetyl-CoA. Quá trình này cũng tạo ra 1 NADH và giải phóng 1 CO_2 cho mỗi phân tử Pyruvic acid.

Vì 1 phân tử glucose tạo ra 2 Pyruvic acid, nên sẽ có 2 phân tử Acetyl-CoA đi vào chu trình Krebs.

Bảng tổng kết nguyên liệu và sản phẩm của Chu trình Krebs (tính cho 1 phân tử Acetyl-CoA):

Nguyên liệu (Input)	Sản phẩm (Output)
1 Acetyl-CoA	2 CO ₂
3 NAD ⁺	3 NADH
1 FAD	1 FADH ₂
1 ADP + P _i	1 ATP

Lưu ý: Từ 1 phân tử glucose ban đầu, chu trình Krebs sẽ diễn ra 2 lần. Do đó, tổng sản phẩm từ 1 glucose là: **4 CO₂, 6 NADH, 2 FADH₂, 2 ATP.**

3. Diễn biến chính của Chu trình Krebs

Chu trình Krebs là một chuỗi phản ứng phức tạp, có thể tóm tắt qua các bước chính sau:

- 1. Khởi đầu:** Phân tử Acetyl-CoA (2 carbon) kết hợp với Oxaloacetate (4 carbon) để tạo thành Citrate (6 carbon).
- 2. Oxy hóa và khử Carboxyl lần 1:** Citrate bị biến đổi và oxy hóa, giải phóng 1 phân tử CO₂, đồng thời khử 1 NAD⁺ thành 1 NADH. Hợp chất còn lại là một phân tử 5 carbon.
- 3. Oxy hóa và khử Carboxyl lần 2:** Hợp chất 5 carbon tiếp tục bị oxy hóa, giải phóng 1 phân tử CO₂ và tạo thêm 1 NADH. Hợp chất còn lại là một phân tử 4 carbon.

4. **Tổng hợp ATP:** Phân tử 4 carbon trải qua một loạt biến đổi, giải phóng đủ năng lượng để tổng hợp 1 phân tử ATP từ ADP và P_i (phosphoryl hóa mức độ cơ chất).
5. **Tái tạo Oxaloacetate:** Phân tử 4 carbon tiếp tục bị oxy hóa, tạo ra 1 $FADH_2$ và 1 NADH. Cuối cùng, Oxaloacetate (4 carbon) được tái tạo để bắt đầu một chu trình mới với một phân tử Acetyl-CoA khác.

II. Chuỗi chuyển electron (Electron Transport Chain - ETC)

Đây là giai đoạn cuối cùng và cũng là giai đoạn tạo ra nhiều ATP nhất trong quá trình hô hấp tế bào. Tại đây, năng lượng được lưu trữ trong các phân tử NADH và $FADH_2$ (tạo ra từ đường phân và chu trình Krebs) sẽ được chuyển đổi thành năng lượng ATP.

1. Vị trí diễn ra

Chuỗi chuyển electron diễn ra tại **màng trong của ti thể**. Màng này có diện tích lớn do gấp nếp tạo thành các mào (cristae), chứa nhiều phức hệ protein cần thiết cho quá trình.

2. Thành phần

Chuỗi chuyển electron bao gồm nhiều phức hệ protein và các phân tử vận chuyển nhỏ:

- **Phức hệ I (NADH dehydrogenase):** Nhận electron từ NADH.
- **Phức hệ II (Succinate dehydrogenase):** Nhận electron từ $FADH_2$.
- **Phức hệ III (Cytochrome bc1 complex):** Vận chuyển electron.

- **Phức hệ IV (Cytochrome c oxidase):** Vận chuyển electron đến oxygen.
- **Ubiquinone (Q) và Cytochrome c (Cyt c):** Các phân tử vận chuyển electron di động, kết nối các phức hệ protein với nhau.
- **ATP synthase:** Một phức hệ enzyme đặc biệt, hoạt động như một động cơ quay để tổng hợp ATP.

3. Hoạt động và Cơ chế hóa thẩm (Chemiosmosis)

Quá trình tổng hợp ATP ở giai đoạn này tuân theo cơ chế hóa thẩm, diễn ra qua các bước sau:

1. **Nhường electron:** Các phân tử NADH và FADH_2 từ các giai đoạn trước di chuyển đến màng trong ti thể và nhường electron (bị oxy hóa). NADH nhường electron cho phức hệ I, còn FADH_2 nhường cho phức hệ II.
2. **Chuyển electron:** Electron được chuyển từ phức hệ protein này sang phức hệ protein khác trong chuỗi (từ mức năng lượng cao đến thấp hơn). Năng lượng được giải phóng từ từ qua mỗi bước chuyển.
3. **Bơm proton (H^+):** Năng lượng giải phóng từ dòng electron được các phức hệ I, III, và IV sử dụng để bơm các ion H^+ từ chất nền ti thể ra **khoang gian màng**. Điều này tạo ra sự chênh lệch nồng độ H^+ và điện thế qua màng trong, gọi là **gradient proton** (lực vận động proton).
4. **Tổng hợp ATP:** Gradient proton tạo ra một thế năng lớn. Các ion H^+ có xu hướng khuếch tán trở lại chất nền ti thể. Chúng chỉ có thể đi qua kênh protein đặc biệt là **ATP synthase**. Dòng chảy của H^+ qua ATP synthase cung cấp năng lượng làm cho enzyme này quay và gắn kết ADP với P_i để tạo

thành một lượng lớn ATP.

4. Vai trò của Oxygen

Oxygen là chất nhận electron cuối cùng trong chuỗi chuyển electron.

- Sau khi đi hết chuỗi, các electron có mức năng lượng thấp sẽ kết hợp với các ion H^+ và nguyên tử oxygen.
- **Công thức:** $O_2 + 4e^- + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$
- Nếu không có oxygen, chuỗi chuyển electron sẽ ngừng hoạt động vì không có nơi để "đổ" electron cuối cùng. Các phân tử NADH và $FADH_2$ sẽ không thể bị oxy hóa trở lại thành NAD^+ và FAD. Điều này sẽ làm ngưng trệ cả chu trình Krebs và quá trình hô hấp hiếu khí nói chung.

III. Tổng kết hiệu suất năng lượng

Quá trình oxy hóa hoàn toàn 1 phân tử glucose qua hô hấp hiếu khí tạo ra một lượng lớn ATP. Hiệu suất có thể thay đổi tùy thuộc vào loại tế bào và điều kiện cụ thể.

Giai đoạn	Sản phẩm trung gian	Số ATP tạo ra (ước tính)
Đường phân	2 ATP (trực tiếp) 2 NADH	2 ATP ~ 3-5 ATP
Oxy hóa Pyruvate (x2)	2 NADH	~ 5 ATP
Chu trình Krebs (x2)	2 ATP (trực tiếp) 6 NADH 2 FADH ₂	2 ATP ~ 15 ATP ~ 3 ATP
TỔNG CỘNG		~ 30-32 ATP

Ghi chú: Hiệu suất chuyển đổi từ NADH và FADH₂ sang ATP không phải là một con số cố định. Thường 1 NADH tạo ra khoảng 2.5 ATP và 1 FADH₂ tạo ra khoảng 1.5 ATP.