

现代生物学导论

IV 细胞-2 代谢 (书上第四章)

闫永彬
Yong-Bin YAN, Ph.D.
清华大学 生命科学学院



1

4.1 细胞呼吸 (重点)

- 4.1.1 细胞的能量通货—ATP (重点)
- 4.1.2 细胞呼吸产生能量
- 4.1.3 线粒体的结构与功能定位 (重点)
- 4.1.4 细胞呼吸的化学过程 (重点)
- 4.1.5 ATP形成机理

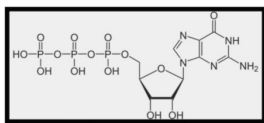
(书上4.1-4.4, 其它部分内容自学/复习)



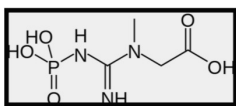
2

细胞内的其它高能磷酸化合物

高能磷酸键的键能高于 5 kcal/mol (20.92 kJ/mol) 的化合物



GTP
G是啥?

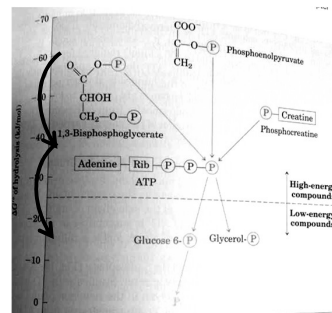


PCr
Phosphocreatine
磷酸肌酸



3

细胞内的其它高能磷酸化合物

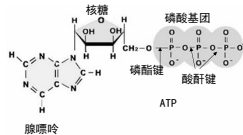


4

4.1.1 细胞的能量通货——ATP

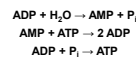
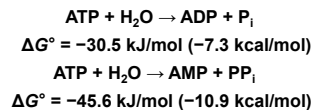
腺嘌呤核苷三磷酸(也叫腺苷三磷酸, adenosine triphosphate, ATP), 是高能磷酸化合物的代表。

ATP是由一分子腺嘌呤、一分子核糖和3个相连的磷酸基团构成的核苷酸。



5

More about ATP...



P_i: 磷酸; PP_i: 焦磷酸

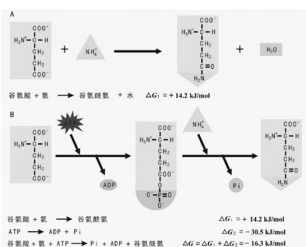


6

ATP作为细胞能量的通货是如何工作的?

吸能反应和ATP的分解相偶联, 放能反应和ATP的合成相偶联。

ATP是转移磷酸基团的“共同中间体”



7

More about ATP...

□ ATP (或其它类型的高能化合物) 提供能量并不是直接水解放能, 而通常是以转移磷酸基团、焦磷酸基团、核苷等来实现的——能量代谢总是与物质代谢相耦合的

□ 体内ATP的半衰期在分钟水平

□ 细胞内各个区域的ATP浓度通常是一个稳定值, 局部ATP、ADP和AMP浓度以及ATP/ADP比例等的变化已被发现是影响很多代谢过程的重要调控因子

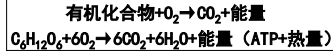


8

4.1.2 细胞呼吸产生能量

细胞呼吸基本概念

- 细胞呼吸是生物细胞消耗氧气来分解食物分子并获得能量的过程，是生物体获得能量的主要代谢途径，是一种典型的生物氧化。



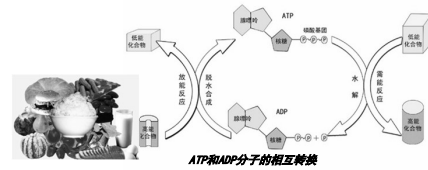
- 在温和条件下进行（体温、生理pH）；
- 发生在活细胞中，有多种酶的参与和调控；
- 复杂的氧化还原过程，包括电子转移和质子的转移；
- 能量的释放是可控的，以ATP为能量通货。



ZHEJIU-SLS
YAN

9

- 动物细胞呼吸的“燃料”：“燃料”包括糖类、脂肪、蛋白质等。



有氧呼吸和无氧呼吸



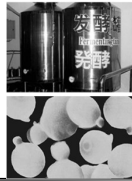
ZHEJIU-SLS
YAN

10

酵母菌发酵与细胞呼吸

- 发酵是典型的细胞呼吸过程

- 在有氧环境中，酵母细胞消耗氧气来分解葡萄糖并获得能量，同时产生二氧化碳和水。
- 在缺氧环境中，酵母菌将葡萄糖分解成酒精（乙醇）和二氧化碳。
- 在有氧环境中，食物分子被充分氧化，可产生比无氧环境更多的能量。



ZHEJIU-SLS
YAN

11

■ 人体细胞的呼吸过程

- 慢跑，细胞消耗氧气来分解葡萄糖并获得能量，同时产生二氧化碳和水；
- 快跑，细胞将葡萄糖分解成乳酸和二氧化碳。

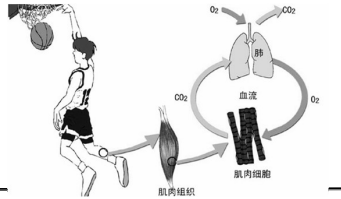


ZHEJIU-SLS
YAN

12

■ 呼吸运动与细胞呼吸

- 细胞呼吸定义为生物细胞消耗氧气来分解食物分子并获得能量的过程。
- 通常意义的呼吸运动与细胞呼吸是相互关联的。

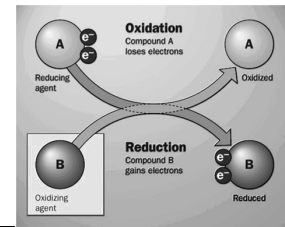


ZHEJIU-SLS
YAN

13

➤ 氧化还原反应

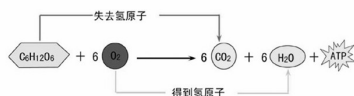
获得电子—还原反应；失去电子—氧化反应。



ZHEJIU-SLS
YAN

14

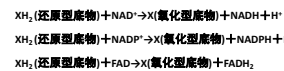
- 生物体内的氧化反应——细胞中氢及其电子从一个化合物向另一个化合物转移；
- 氧化还原反应是呼吸作用和光合作用等代谢中最基本的反应。



ZHEJIU-SLS
YAN

15

➤ 被转移的氢原子所携带的能量储藏在新化学键中



- 还原态的NADH和FADH₂等还可将所接受的电子和氢传递给其他传递体如细胞色素、辅酶Q等。

NAD⁺: 尼克腺酸腺嘌呤二核苷酸，辅酶I
 NADP⁺: 尼克腺酸腺嘌呤二核苷酸磷酸，辅酶II
 FAD: 黄素腺嘌呤二核苷酸



ZHEJIU-SLS
YAN

16

4.1.3 线粒体的结构与功能定位

■ 线粒体的研究历史

➢ 1840s, 在细胞中发现了可能是线粒体的颗粒状结构

➢ 1890, 德国科学家理查德·阿尔特曼将这些颗粒命名为“原生粒”（bioblast）并猜测这些颗粒可能是共生于细胞内的独立生活的细菌；

➢ 1898, 德国科学家卡尔·本达, 因这些结构时而呈线状时而呈颗粒状, 所以用希腊语中“线”和“颗粒”对应的两个词——“mitos”和“chondros”——组成“mitochondrion”来为这种结构命名;

➢ 1913, 德国生物化学家奥托·海因里希·沃伯格 Warburg 成功完成线粒体的粗提取

ZHEU-SLS

YAN

17

4.1.3 线粒体的结构与功能定位

■ 线粒体的研究历史

➢ 1913-1925, 分离得到一些催化与氧有关的反应的呼吸酶

➢ 1939-1941, Lipmann 发现了 ATP 的重要性

➢ 1940s, Eugene Kennedy and Albert Lehninger, 线粒体氧化磷酸化

➢ 1952, 第一张线粒体的电镜照片

➢ 1957, Philip Siekevitz, 称线粒体为 "powerhouse of the cell"

➢ 1960, 线粒体中含有 ATP 合成酶

➢ 1963, 线粒体中含有 DNA

➢ 1967, 线粒体中含有核糖体

ZHEU-SLS


YAN

18

The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1953

"for his discovery of the citric acid cycle"

"for his discovery of co-enzyme A and its importance for intermediary metabolism"



Hans Adolf Krebs

© 1/2 of the prize


United Kingdom

Sheffield University

Sheffield, United Kingdom

b. 1900 (in Hildesheim, Germany)

d. 1981



Fritz Albert Lipmann

© 1/2 of the prize

USA

Harvard Medical School

Massachusetts General Hospital

Boston, MA, USA

b. 1899 (in Koenigsberg, then Germany)

d. 1986


ZHEU-SLS

YAN

19

The Nobel Prize in Chemistry 1978

"for his contribution to the understanding of biological energy transfer through the formulation of the chemiosmotic theory"



Peter D. Mitchell

United Kingdom

Glynn Research Laboratories

Bodmin, United Kingdom

b. 1920

d. 1992

ZHEU-SLS

YAN

20

2024/3/17

4.1.3 线粒体的结构与功能定位

线粒体是细胞呼吸和能量代谢中心，产能车间。

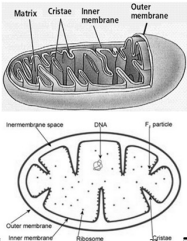
■ 线粒体的结构

➢ 由内膜和外膜包裹的囊状结构，囊内是液态的基质；

➢ 外膜平整，内膜向内折入形成一些嵴，内膜上面有 ATP 复合体；

➢ 线粒体分为外膜、内膜、膜间隙和基质四个功能区。

➢ 线粒体含有环状 DNA。可以进行半自我复制。



ZHEU-SLS

YAN

21

4.1.3 线粒体的结构与功能定位

➢ 线粒体可以运动，可以融合和分裂

➢ 糖类、脂类和氨基酸等最终氧化的场所

➢ 细胞呼吸和能量代谢中心，产能车间

➢ 氧自由基的生产

➢ 细胞程序性死亡

➢ 细胞信号转导

➢ 离子稳态

➢ 线粒体异常会导致疾病的发生

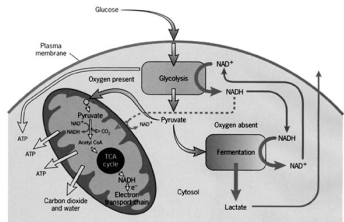
ZHEU-SLS

YAN

22

■ 细胞呼吸的功能定位

对于有氧呼吸来说，包括三个阶段，即糖酵解、三羧酸循环以及电子传递与 ATP 的合成。



ZHEU-SLS

YAN

23

➢ 糖酵解的酶是在细胞质中，细胞质是糖酵解进行的场所；

➢ 三羧酸循环的酶大部分在线粒体基质中（琥珀酸脱氢酶是唯一嵌入到线粒体内膜的酶），三羧酸循环发生在线粒体的基质中；

➢ 线粒体的内膜上含有电子传递链及 ATP 复合体，电子传递过程及 ATP 的合成发生在线粒体内膜的表面。

ZHEU-SLS

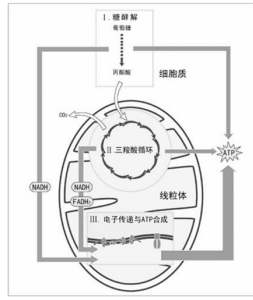
YAN

24

4.1.4 细胞呼吸的化学过程

概述

- 细胞呼吸是由一系列化学反应组成的一个连续完整的代谢过程；
- 细胞呼吸的3个阶段：
即糖酵解、三羧酸循环以及电子传递与ATP的合成。
- 每一步化学反应都需要特定的酶参与才能完成。

ZHU-SLS
YAN

25

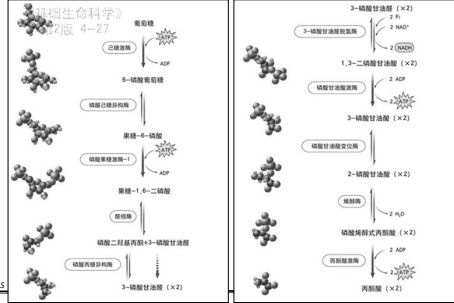
糖酵解 (glycolysis)

- 淀粉、葡萄糖或其它六碳糖在无氧条件下分解成丙酮酸的过程，通称为糖酵解。它是一种在不需要氧气供应的条件下，产生ATP的一种供能方式；
- 它是动物、植物和微生物细胞中葡萄糖分解的共同代谢途径；
- 由葡萄糖到丙酮酸的糖酵解过程中，所有的中间产物都是以磷酸化化合物的形式来实现的。

ZHU-SLS
YAN

26

糖酵解反应

ZHU-SLS
YAN

27

- 糖酵解发生在细胞质中的10步反应，前5步为准备阶段，需要消耗2分子ATP来启动，后5步为产生ATP的产能阶段，共产出4分子ATP，还形成2个高能化合物NADH。
- 糖酵解将六碳的葡萄糖分解成2个三碳的丙酮酸，净产生2个ATP，生成2分子NADH。
- 参与化合物是①葡萄糖，②ADP和磷酸，③NAD⁺。
- 需要10种酶的参与，大部分酶需要Mg²⁺作为辅助因子。

ZHU-SLS
YAN

28

复习一下有氧呼吸和无氧呼吸，并比较丙酮酸的去路：

无氧条件下：

- 丙酮酸转化为乳酸、乙醇；

有氧条件下：

- 丙酮酸在有氧条件下继续氧化生成CO₂和水。

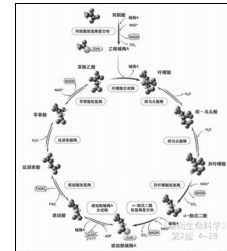
所以无氧和有氧呼吸只有在形成丙酮酸以后才有差异。

ZHU-SLS
YAN

29

- Krebs循环 (1937, Hans. Krebs, 1953生理或医学诺贝尔奖)
(三羧酸循环, Tricarboxylic acid cycle, TCA)

- 三羧酸循环发生在线粒体基质中，但丙酮酸需先转变成乙酰辅酶A后才进入三羧酸循环。
- 该循环过程中的第一个化合物为柠檬酸；循环的最后产物是草酰乙酸。
- 分解1分子丙酮酸形成3分子CO₂、4分子NADH和1分子FADH₂及1分子ATP。

ZHU-SLS
YAN

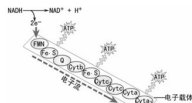
30

电子传递链和氧化磷酸化

Electron transport and oxidative phosphorylation

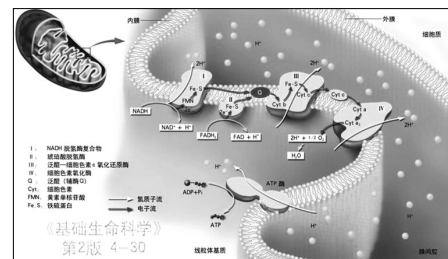
- 电子传递链又称呼吸链，主要成分为线粒体内膜上的蛋白复合物，这些复合物包含了一系列的电子传递体。
- 电子传递链就是通过一系列的氧化还原反应，将高能电子从NADH和FADH₂最终传递给分子氧，生成水。
- 随着电子能量水平的逐步下降，高能电子所释放的化学能就通过磷酸化途径贮存到ATP分子中，这个过程也被称为氧化磷酸化过程。

即：与生物氧化所起始的电子传递过程相偶联的ATP形成过程。

ZHU-SLS
YAN

31

电子传递链(electron transfer chain, ETC)

ZHU-SLS
YAN

32

了解

线粒体功能的结构基础

ZHU-SLS

YAN

33

了解

2005, 清华大学饶子和院士研究组:
由4种不同蛋白质组成的膜蛋白复合体I的晶体结构

ZHU-SLS

YAN

34

了解

2017年8月24日, 清华大学杨茂君研究组
人源线粒体呼吸链超超级复合物I2III12IV2的结构

ZHU-SLS

YAN

35

了解

2018年5月11日, yeast ATPase, finally!!!

ZHU-SLS

YAN

36

4.1.5 ATP形成机理

底物水平的磷酸化

在磷酸化过程中, 相关的酶将底物分子上的磷酸基团直接转移到ADP分子上。

ZHU-SLS

YAN

37

与电子传递链相偶联的磷酸化

1961年, 英国科学家Mitchell提出化学渗透学说, 由此荣获1978年的诺贝尔化学奖。

跨膜的质子梯度(浓度差), 导致化学渗透发生;
质子顺梯度从外腔经ATP合成酶而回到线粒体的基质中;
所释放的能使ADP与磷酸结合生成ATP。

ZHU-SLS

YAN

38

生物体内的代谢网络

ZHU-SLS

YAN

39

细胞呼吸与光合作用为细胞代谢提供能量

ZHU-SLS

YAN

40

4.2 光合作用

1. 光合作用的基本概念及早期研究
2. 光合自养生物是生物圈的生产者
3. 叶绿体结构与功能定位 (重点)
4. 光的性质与叶绿素
5. 光系统与光反应 (重点)
6. 暗反应与葡萄糖的形成



YAN

41

4.2.1 光合作用的基本概念及早期研究

■ 光合作用的基本概念

- 绿色植物(生物)吸收太阳能,同化二氧化碳,并利用水及一些简单的无机物,制造有机物并释放出氧气的过程,称为光合作用(photosynthesis)。
- 光合作用产生的有机物主要是糖类,贮存着能量。是地球上进行的最大的有机合成反应。
- 所以绿色植物的光合作用是地球上有机体生存、繁殖和发展的根本源泉。



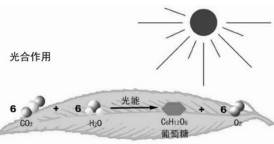
YAN

42

历经218年

得出结论:植物生长(合成糖类、蛋白质、核酸和脂类)必须依赖于水、泥土(其中的氮、磷及其它元素)、空气和阳光。

植物的光合作用可以用下面的方程式表示(1860):



YAN

43

4.2.2 光合自养生物是生物圈的生产者(自学)

■ 光合自养生物是太阳能的储蓄者

- 光合自养生物通过光合作用将光能转变为化学能,是能源的主要来源途径。每天从太阳到地球的能量约为 $1.5 \times 10^{22} \text{kJ}$,其中约1%被光合生物吸收、转化;
- 我们所利用能源,包括煤炭、天然气、石油、木材等都是现在或过去的植物通过光合作用形成的;
- 因此,光合自养生物是太阳能的储蓄者,生命世界最初的能量都是来源于太阳能。



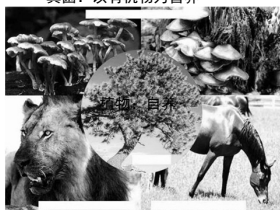
YAN

44

■ 光合自养生物是生物圈的生产者

真菌:以有机物为营养

- 光合自养生物利用太阳能制造食物分子供自我代谢需要;
- 原料 CO_2 和 H_2O ,且为其它的生命直接或间接地提供了食物,是生物圈的生产者;
- 光合自养生物主要种类:
 - 陆生植物
 - 藻类
 - 光合细菌



食肉动物

食草动物



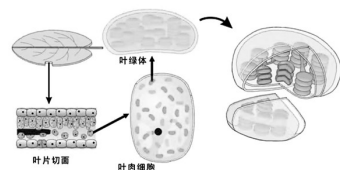
YAN

45

4.2.3 叶绿体结构与功能定位

■ 叶绿体(chloroplast)结构

- 叶片叶绿体 分布于叶肉组织 气孔控制着 CO_2 和 O_2 进出;
- 双层生物膜、基质、类囊体、基粒。并含有环状DNA。可以进行半自我复制。



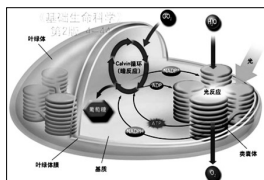
YAN

46

■ 叶绿体的功能定位

6个区域:外膜、内膜、膜间隙(腔)、基质、类囊体膜、类囊体腔。

叶绿体内外膜上不含叶绿素,控制代谢物质进出叶绿体的功能;

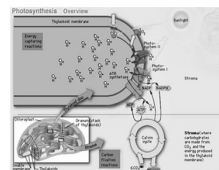


YAN

47

- 类囊体膜含有植物的光合作用的色素和电子传递系统以及ATP酶复合物,所以又称为光合膜,而类囊体腔在光能转化为ATP的过程中起重要作用;发生光反应的位置。

- 叶绿体基质主要成分包括碳同化(暗反应或葡萄糖的形成,或卡尔文循环)相关的酶类。 CO_2 固定反应就发生在叶绿体基质中。

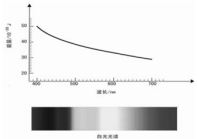


YAN

48

4.2.4 光的性质与叶绿素（复习高中内容）

■ 光的性质



日光经过棱镜折射，形成连续不同波长的光，即可见光谱

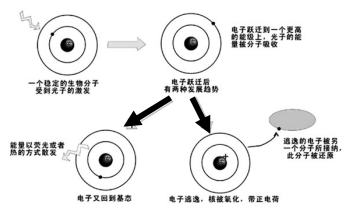
- 光是一种电磁波，具有波—粒二重性；
- 光子的能量与其波长成反比；
- 紫光波长最短，能量最大；红光波长较长，能量小。

ZHEU-SLS

YAN

49

光子照射到某些生物分子 电子跃迁到更高的能量水平 激发态：



一个稳定的基态分子 受到光子的激发
电子跃迁到一个更高的能级上，光子的能量被分子吸收
电子跃迁后，具有较高能量
电子又回到基态
电子传递，传递给氧化，带正电荷
传递的电子填充一个分子的轨道，此分子被还原

- 叶绿素分子是一种可以被可见光激发的色素分子；
- 在光子驱动下发生的得失电子反应是光合作用过程中最基本的反应。

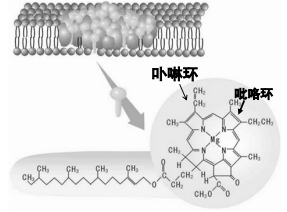
ZHEU-SLS

YAN

50

■ 叶绿素的结构与性质

- 叶绿素分子由碳和氮原子组成的卟啉环与叶醇侧链相连接，叶醇侧链插入到类囊体膜中。
- 光合作用的色素主要有三类，包括叶绿素a、b，类胡萝卜素，藻胆素等。



卟啉环 叶醇侧链

叶绿素分子的头部和尾部具有亲水性和亲脂性的特点；叶绿素具有收集光能的作用。

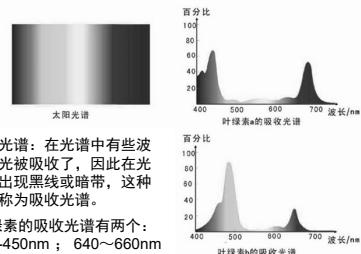
叶绿素a启动光反应

ZHEU-SLS

YAN

51

叶绿素的吸收光谱



百分比
100
80
60
40
20
0
400 500 600 700 波长/nm

太阳光谱

吸收光谱：在光谱中有些波长的光被吸收了，因此在光谱上出现黑线或暗带，这种光谱称为吸收光谱。

叶绿素的吸收光谱有两个：430-450nm；640~660nm

百分比
100
80
60
40
20
0
400 500 600 700 波长/nm

叶绿素a的吸收光谱

百分比
100
80
60
40
20
0
400 500 600 700 波长/nm

叶绿素b的吸收光谱

问题：为什么大多数植物都是绿色的？

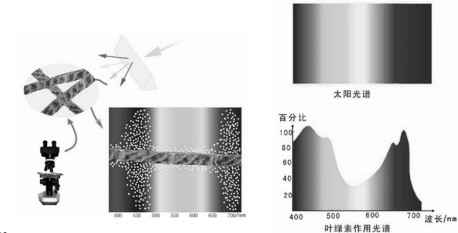
ZHEU-SLS

YAN

52

■ 不同波长光作用下的光合效率称为作用光谱

1883年，德国 Engelmann 水绵 丝状绿藻 螺旋带状叶绿体 好氧游动的细菌 棱镜 不同波长的光 向着红光和蓝光区域聚集



太阳光谱

百分比
100
80
60
40
20
0
400 500 600 700 波长/nm

叶绿素作用光谱

ZHEU-SLS

YAN

53

整个光合作用可分为光反应（light reaction）和暗反应（dark reaction）两个阶段。

- 光反应发生在类囊体膜上，即将光能转化为化学能的过程；
- 暗反应发生在叶绿体的基质中，是植物固定二氧化碳生产葡萄糖的过程。光合产物—淀粉是在基质中形成和贮存起来的。也是将活跃的的化学能转变为稳定的化学能的过程。

ZHEU-SLS

YAN

54

4.2.5 光系统与光反应

■ 光系统

- 由叶绿素分子及其蛋白复合物、天线色素系统和电子受体等组成的单位称为光系统，高等植物和藻类含有光系统I和光系统II，而光合细菌只有一个光系统（P870）；
- 光系统I（PSI）含有被称为“P700”的高度特化的叶绿素a分子（光反应中心叶绿素分子）；
- 光系统II（PSII）含有另一种被称为“P680”高度特化的叶绿素a分子（光反应中心叶绿素分子）。

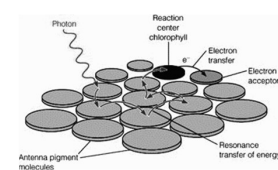
ZHEU-SLS

YAN

55

光合单位=天线色素系统+反应中心色素

天线色素系统，亦称为聚光色素系统，具有收集光能的作用，然后将收集起来的光能传到反应中心色素。包括大部分叶绿素a、全部叶绿素b、胡萝卜素等。反应中心色素，少数特殊状态的叶绿素a分子，既捕捉光能，又可转换光能。



Photon
Reaction center chlorophyll
Electron transfer
Electron acceptor
Antenna pigment molecules
Resonance transfer of energy

光合单位的结构

P700和P680又称为光反应中心叶绿素分子。高度有组织，齐心协力的典范。

ZHEU-SLS

YAN

56

14

■ 光反应

➢ 光反应是将光能转化为化学能的过程，主要由两个光系统及电子传递链来完成，包括：

光能的吸收→ 传递和转换（通过原初反应完成）→ 电能转变为活跃的的化学能（通过电子传递和光合磷酸化完成）。

光合磷酸化（photosynthetic phosphorylation）：

叶绿体在光下把无机磷和ADP转化为ATP，形成高能磷酸键的过程，即与光能起始的电子传递过程相偶联的ATP形成过程。

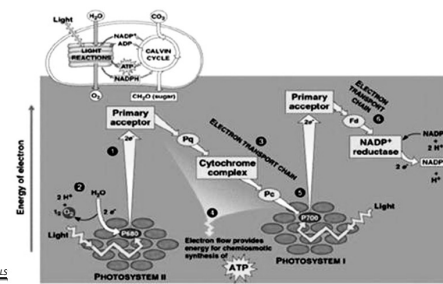
有两种方式：即非环路的光合磷酸化和环路光合磷酸化。



YAN

57

光系统I和光系统II是通过电子传递相连接。



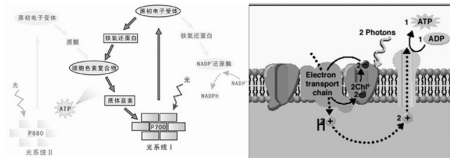
YAN

58

环路光合磷酸化和电子传递链



环路 高能电子 原初电子受体、铁氧还蛋白、细胞色素、质体蓝素 氧化型的P700分子 基态 电子的能量逐渐降低 ATP 不放O₂ 也无NADPH产生。

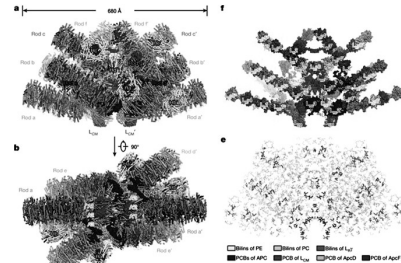


YAN

59

了解

2017年10月19日，隋森芳研究组在《自然》发文报道首个完整藻胆体的冷冻电镜三维结构

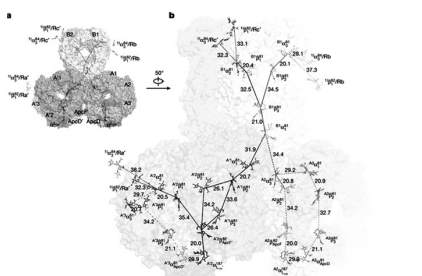


YAN

60

了解

862个蛋白亚基，2048个色素!!!

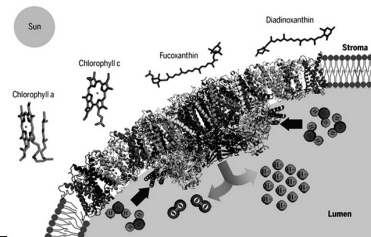


YAN

61

了解

2019年8月2日，清华大学生命科学学院隋森芳院士研究组与中科院植物所沈建仁研究员和匡廷云院士研究组合作在《科学》上在线发表了题为《硅藻光系统II-捕光天线超级复合体的色素-蛋白网络结构》

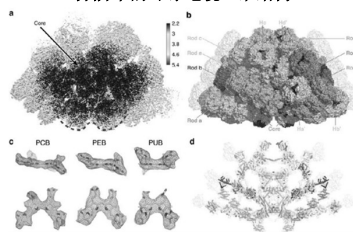


YAN

62

了解

2020年2月19日，清华大学生命科学学院隋森芳院士课题组在《Nature》上报道了盐泽红藻藻胆体的2.8 Å分辨率的冷冻电镜三维结构



YAN

63

■ ATP的形成与化学渗透假说

电子传递过程导致类囊体腔内有较高的H⁺（pH≈5，基质pH≈8），形成质子动力势，H⁺经ATP合酶，渗入基质、推动ADP和P_i结合形成ATP。

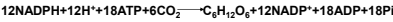
与非环路和环路电子流相偶联的ATP形成过程是否相同？



YAN

64

4.2.6 暗反应（卡尔文循环1961诺贝尔化学奖）与葡萄糖的形成



暗反应：是指叶绿体利用光反应产生的NADPH和ATP的化学能，使CO₂还原成糖的过程。不再需要光的参与，是在叶绿体基质中进行。此过程中不断消耗ATP和NADPH，固定CO₂形成葡萄糖。也是将活跃的化学能转变为稳定的化学能的过程。

没有光反应，暗反应能否发生吗？

卡尔文循环分为三个阶段：即羧化阶段(CO₂固定)、还原阶段和更新（再生）阶段。



YAN



The Nobel Prize in Chemistry 1961

"for his research on the carbon dioxide assimilation in plants"

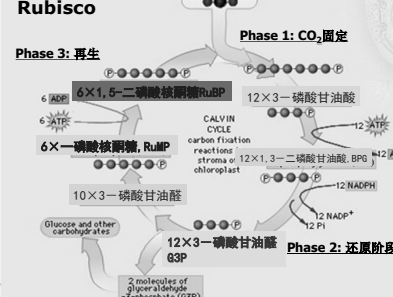


Melvin Calvin
USA
University of California
Berkeley, CA, USA
b. 1911
d. 1997



YAN

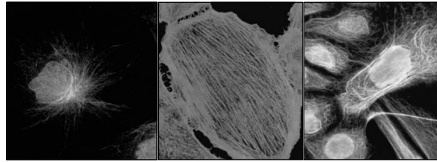
Photosynthesis Carbon Fixation (light-independent) Reactions



YAN

4.3 细胞骨架系统 (cytoskeleton system)

细胞骨架的组成



微管 Microtubules
微丝 Microfilaments
中间纤维 Intermediate filaments



YAN

微丝：又称肌动蛋白纤维，是指真核细胞中由肌动蛋白组成，直径为7nm的骨架纤维。存在于所有真核细胞中，如肌肉细胞。肌肉收缩、细胞分裂、信号传递与运动中起作用；

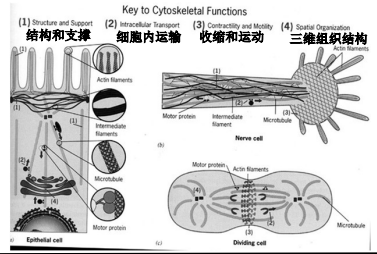
微管：由中微管蛋白组成的长管状细胞器结构，平均直径为约25nm，由两种微管蛋白亚基组成的异二聚体是微管装配的基本单位。存在于所有的真核细胞中。微管参与纺锤体、基粒、中心粒、鞭毛、纤毛以及神经管的组装。在细胞支持、大分子与颗粒的运输、细胞运动和分裂中起作用；

中间丝：直径为10nm，其成分非常复杂，可包括5种以上的蛋白，但多数来自于同一基因家族，高度同源。其功能至今仍很不清楚。



YAN

细胞骨架的特征与功能



YAN

呼吸作用小结

- 细胞呼吸是生物体获得能量的主要代谢途径，主要在线粒体中进行，在温和条件和酶的参与调控下，通过一系列氧化还原反应，将储藏在葡萄糖等中的化学能释放，并以高能磷酸键的形式贮藏在ATP分子中；
- 在细胞呼吸过程中，在有氧条件下，细胞对其燃料物质的彻底氧化形成CO₂和H₂O。糖酵解不产生CO₂，CO₂是通过三羧酸循环形成的；而H₂O则是在电子传递过程的最后阶段生成；
- 三羧酸循环中一系列的脱羧反应是呼吸作用释放CO₂的来源。三羧酸循环过程中释放的CO₂不是直接来自于氧气，而是靠氧化底物中的氢和水分子中的氢来实现的；



YAN

- 电子传递链就是通过一系列的氧化还原反应，将高能电子从NADH 和FADH₂最终传递给分子氧，生成水；
- 生物细胞通过底物水平磷酸化和与电子传递系统偶联的磷酸化2种途径合成ATP。底物水平的磷酸化是相关的酶将底物分子上的磷酸基团直接转移到ADP分子上。与电子传递系统偶联的磷酸化涉及化学渗透过程。
- 通过上述2种磷酸化途径，1分子葡萄糖通过有氧呼吸共形成30或32个ATP；
- 三羧酸循环是糖、脂肪、蛋白质和核酸及其它物质的共同代谢过程。这些物质可以通过三羧酸循环发生代谢上的联系。



YAN

光合作用小结：

- 1. 叶绿素吸收光能并将光能转化为电能，即造成从叶绿素分子起始的电子流动；
- 2. 在电子流动（传递）过程中，形成了类囊体膜两边的质子浓度梯度（或质子浓度差、或pH值梯度）。ATP的形成就是依靠氢质子的化学渗透过程形成的，电能被转化为化学能；
- 3. 一些由叶绿素捕获的光能还被用于水的裂解，又称为水的光解，氧气从水中被释放出来；
- 4. 电子沿传递链最终达到电子受体NADP⁺；



ZHU-SLS
YAN

73

- 5. 光系统I中激发的电子可以有两种去向：一是按非环路电子流途径经过一系列的载体进行传递，最后是催化NADP⁺还原为NADPH；二是环路磷酸化途径，无NADPH和O₂形成；
- 6. 光合作用需要光，但不是光合作用中任何过程都需要光照。光合作用是光反应和暗反应的综合过程，但光合作用必须有光才能起始；
- 7. 卡尔文循环的第一个产物是三碳化合物（3-磷酸甘油酸），用于以后合成葡萄糖的重要分子也是三碳化合物（3-磷酸甘油醛），而循环的最后一个产物是五碳化合物（1,5-二磷酸核酮糖）。



ZHU-SLS
YAN

74

光合作用与细胞呼吸比较

- | 光合作用 | 呼吸作用 |
|---|--|
| 1. 以CO ₂ 和H ₂ O为原料； | 1. 以O ₂ 和有机物为原料； |
| 2. 产生有机物糖类和O ₂ ； | 2. 产生CO ₂ 和H ₂ O； |
| 3. 叶绿素等捕获光能； | 3. 有机物的化学能暂时贮存于ATP中或以热能消失； |
| 4. 通过光合磷酸化把光能转变为ATP； | 4. 通过氧化磷酸化把有机物的化学能转化成ATP； |
| 5. H ₂ O的氢主要转移到NADP ⁺ ，形成NADPH+H ⁺ ； | 5. 有机物的氢主要转移到NAD，形成NADH+H ⁺ ； |
| 6. 糖合成过程主要利用ATP和NADPH+H ⁺ ； | 6. 细胞呼吸是利用ATP做功； |
| 7. 仅有含叶绿素的细胞才能进行光合作用； | 7. 活的细胞都能进行呼吸作用； |
| 8. 只有光照下才能发生； | 8. 在光照下或黑暗里都可发生； |
| 9. 发生于真核细胞的叶绿体中。 | 9. 糖酵解发生在细胞质中，三羧酸循环和生物氧化发生在线粒体中。 |



ZHU-SLS
YAN

选自《植物生理》，潘瑞炽，第4版，高教出版社，2003。

75

homework !

见网络学堂

下节课主要内容：基因的秘密（书5.2-5.3，复习/自学5.1）



ZHU-SLS
YAN

76