

脂质的分类

1. 单纯脂质 (simple lipid)

单纯脂质是由脂肪酸和醇形成的酯，包括甘油三酯和蜡，蜡是长链脂肪酸和长链醇或固醇形成的酯。

2. 复合脂质 (compound lipid)

复合脂质包括磷脂和糖脂。

3. 衍生脂质 (derived lipid)

脂肪酸、高级醇、脂肪醛、脂肪胺、烃；
固醇、胆酸、强心苷、性激素、肾上腺皮质激素、
萜及其它

某些天然存在的脂肪酸

饱和 脂肪酸	系统名	不饱和 脂肪酸	系统名
羊蜡酸	n-癸酸	油酸	十八碳-9-烯酸
月桂酸	n-十二酸	亚油酸	十八碳-9,12-二烯酸
豆蔻酸	n-十四酸	α -亚麻酸	十八碳-9,12,15-三烯酸
棕榈酸	n-十六酸	γ -亚麻酸	十八碳-6,9,12-三烯酸
硬脂酸	n-十八酸	花生四烯酸	二十碳-5,8,11,14-四烯酸
花生酸	n-二十酸	EPA	二十碳-5,8,11,14,17-五烯酸
山萘酸	n-二十二酸	DHA	二十二碳-4,7,10,13,16,19-六烯酸
木蜡酸	n-二十四酸		
蜡酸	n-二十六酸		
褐煤酸	n-二十八酸		

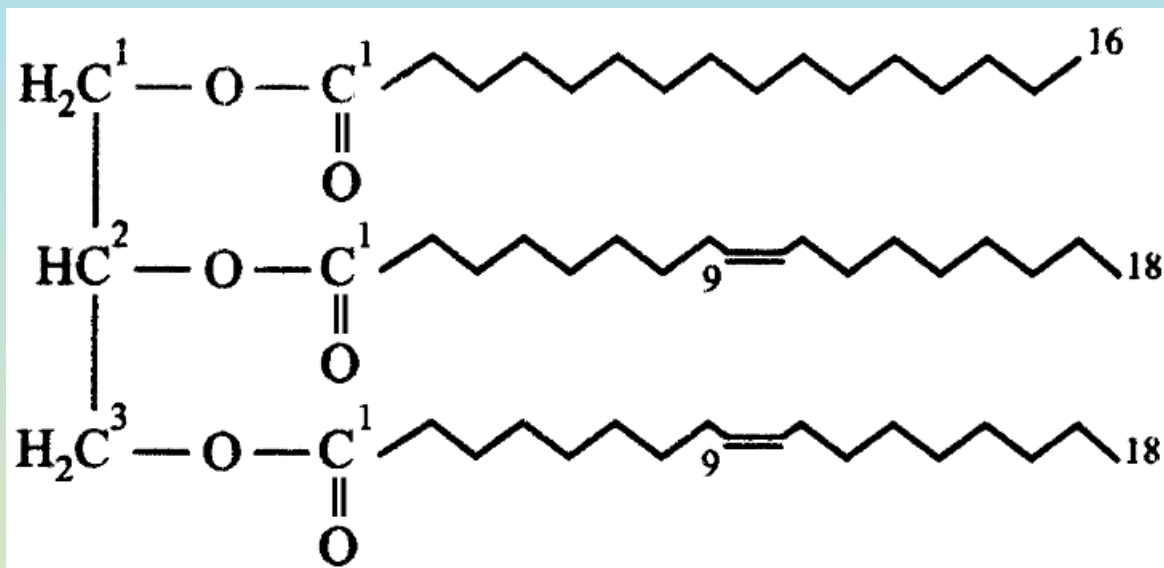
高等生物对脂肪的需求

脊椎动物从食物中获得脂肪，动员贮存在脂肪组织中的脂肪，在肝中将过量的食物中的碳水化合物转变成脂肪运输到其它组织。对于某些器官来说，三酰甘油提供了过半的能量需求，特别是在肝、心和静息的骨骼肌中。在冬眠的动物和迁徙的鸟中，贮存的脂肪实际上是惟一的能量来源。维管植物在种子萌发时动员贮存的脂肪，但其它时候不依赖脂肪提供能量。

一、脂质的消化、吸收和传送

甘油三酯在人类的饮食脂肪中，以及作为代谢能量的主要贮存形式中约占90%。脂肪可完全氧化成 CO_2 和 H_2O ，由于脂肪分子中绝大部分碳原子和葡萄糖相比，都处于较低的氧化状态，因此脂肪氧化代谢产生的能量按同等重量计算比糖类和蛋白质要高出2倍以上。

三脂酰甘油的结构



三脂酰甘油

(三酰甘油)

(甘油三酯)

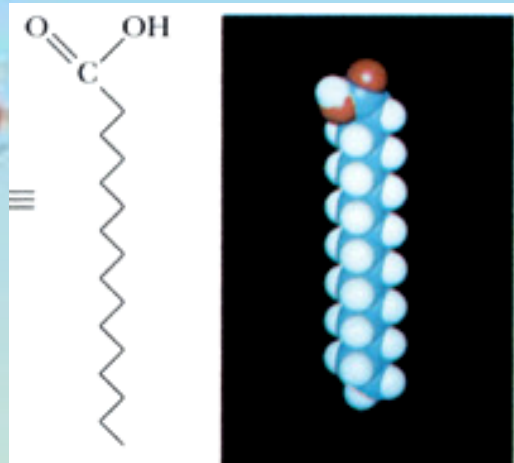
1-软脂酰-2,3-二油酰甘油

当3个脂肪酸都是同一种脂肪酸时，称为简单三脂酰甘油，当3个脂肪酸至少有一个不同时，称为混合三脂酰甘油。

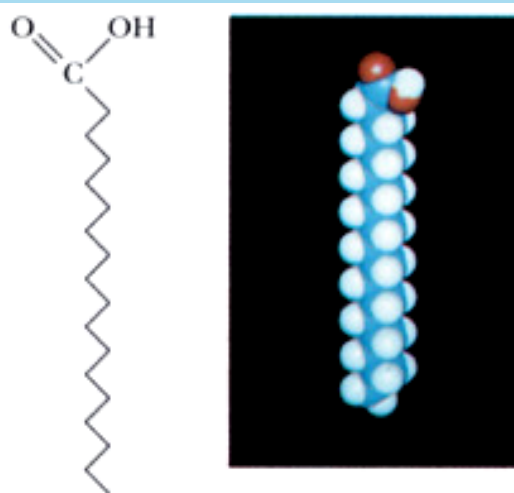
各种脂肪酸的名称和结构见上册P 83 表 2-2

脂肪酸结构与熔点的关系

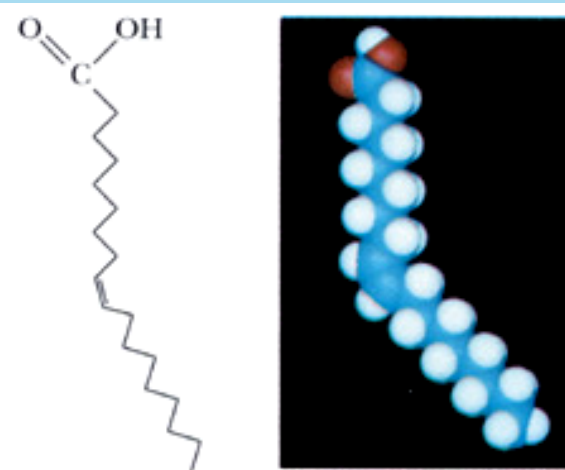
通俗名	系统名	简写符号	熔点
月桂酸	n-十二酸	12:0	44.2
软脂酸 棕榈酸	n-十六酸	16:0	63.1
花生酸	n-二十酸	20:0	76.5
棕榈油酸	十六碳-9-烯酸 (顺)	16:1 Δ^9 C	-0.5~0.5
鳕油酸	二十碳-9-烯酸 (顺)	20:1 Δ^9 C	23~23.5
亚油酸	十八碳-9,12-二烯酸 (顺, 顺)	18:2 Δ^9 C,12C	-5
α -亚麻酸	十八碳-9,12,15-三烯酸 (全顺)	18:3 Δ^9 C,12C,15C	-11
花生四烯酸	二十碳-5,8,11,14-四烯酸 (全顺)	20:4 $\Delta^{5C,8C,11C,14C}$	-49
EPA	二十碳-5,8,11,14,17-五烯酸 (全顺)	cis (顺式)	-54 ~ -53
DHA	二十二碳-4,7,10,13,16,19-六烯酸 (全顺)	trans (反式)	-45.5 ~ -44.1



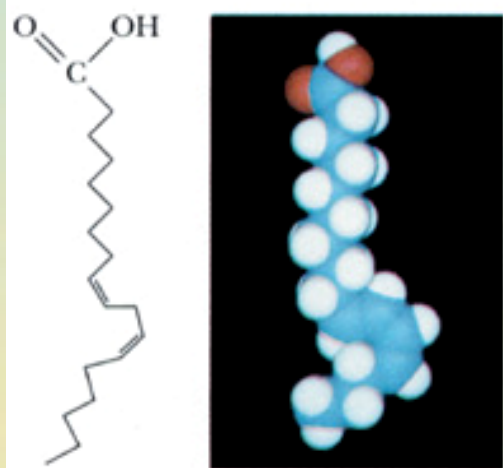
Palmitic acid 棕榈酸



Stearic acid 硬脂酸

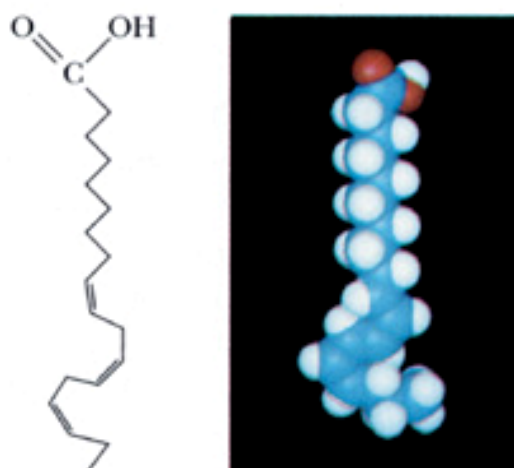


Oleic acid 油酸



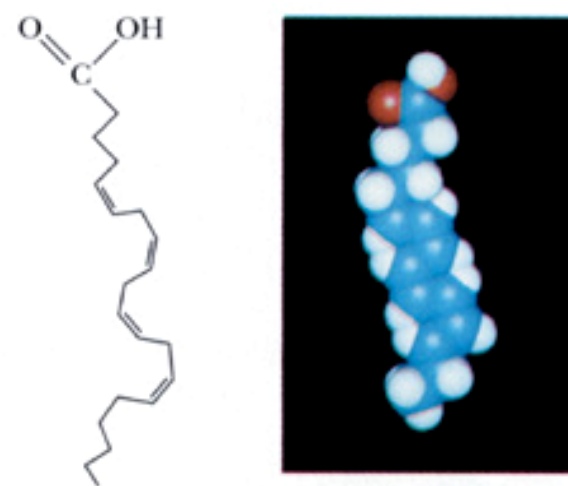
Linoleic acid

亚油酸



α -Linolenic acid

α -亚麻酸



Arachidonic acid

花生四烯酸

食物成分含有的能量

成分	ΔH (kJ/g干重)
糖类	16
脂肪	37
蛋白质	17

$$H=U+PV$$

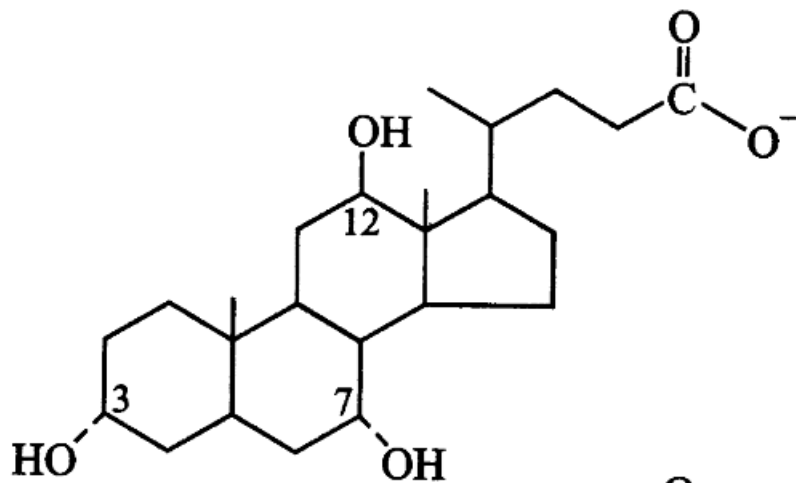
$$\Delta H=\Delta U+P\Delta V = Q_p \text{ (恒压反应热)}$$

脂肪的乳化

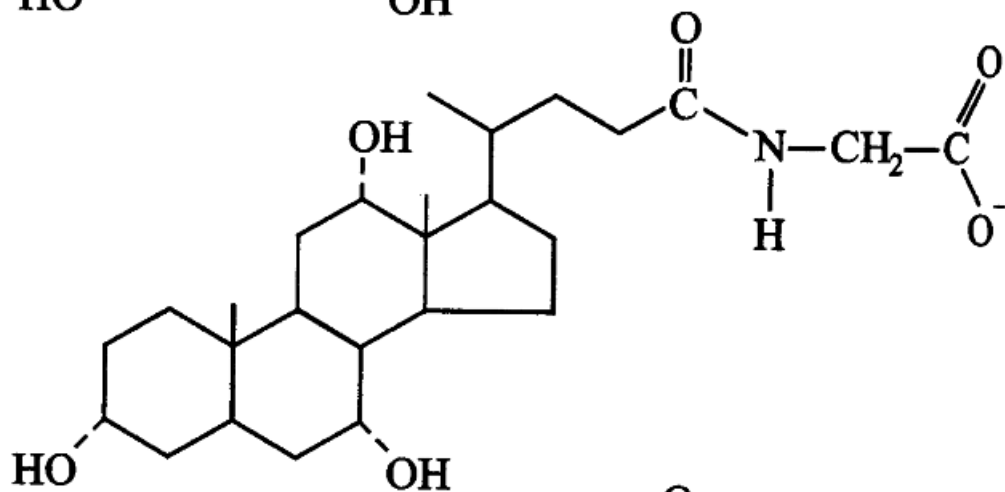
由于三脂酰甘油是水不溶性的，而消化作用的酶却是水溶性的，因此三脂酰甘油的消化是在脂质—水的界面处发生的。若要消化迅速，必须尽量增大脂质—水界面的面积。人摄入的脂肪在肝脏分泌的胆汁盐及磷脂酰胆碱等物质（表面活性剂）的作用下，经小肠蠕动而乳化，大大地增大了脂质—水的界面面积，促进了脂肪的消化和吸收。

胆汁酸的结构

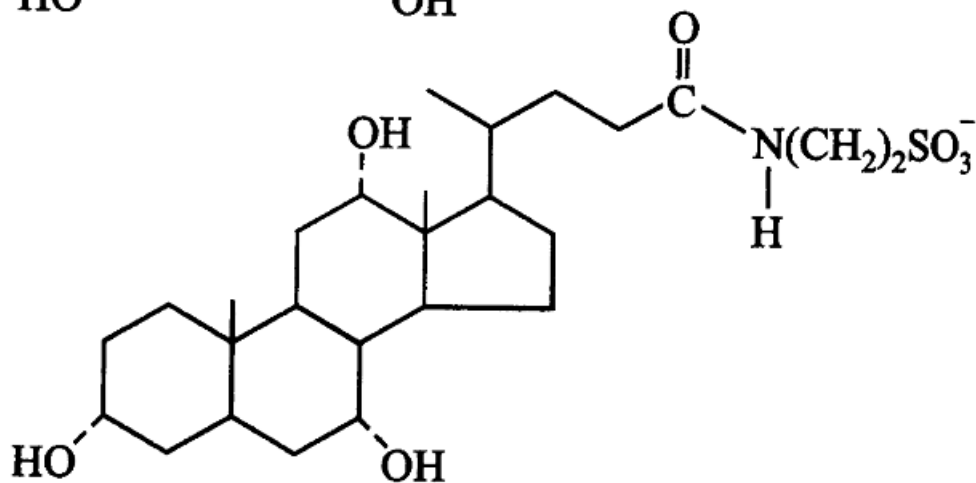
胆酸



甘氨酸胆酸



牛磺胆酸



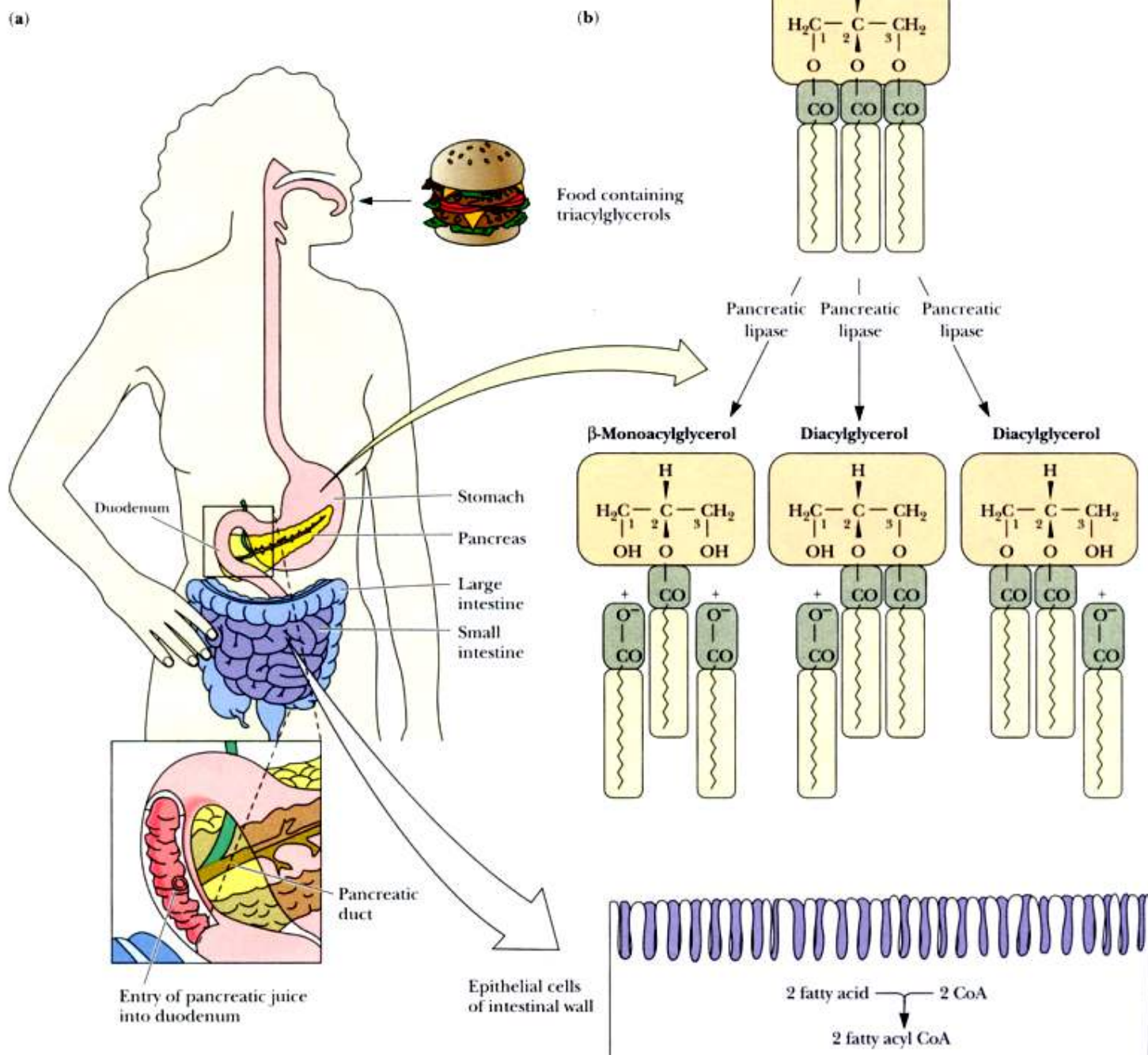
消化脂肪的酶

消化脂肪的酶有胃分泌的胃脂肪酶、胰脏分泌的胰脂肪酶，它们可将三脂酰甘油的脂肪酸水解下来。胰脂肪酶与一个称为辅脂肪酶的小蛋白质在一起，存在于脂质—水界面上。胰脂肪酶催化1—、3—位脂肪酸的水解，生成2—单酰甘油。胰液中还有酯酶，它催化单酰甘油、胆固醇酯和维生素A的酯水解。另外，胰脏还分泌磷脂酶，它催化磷脂的2—酰基水解。

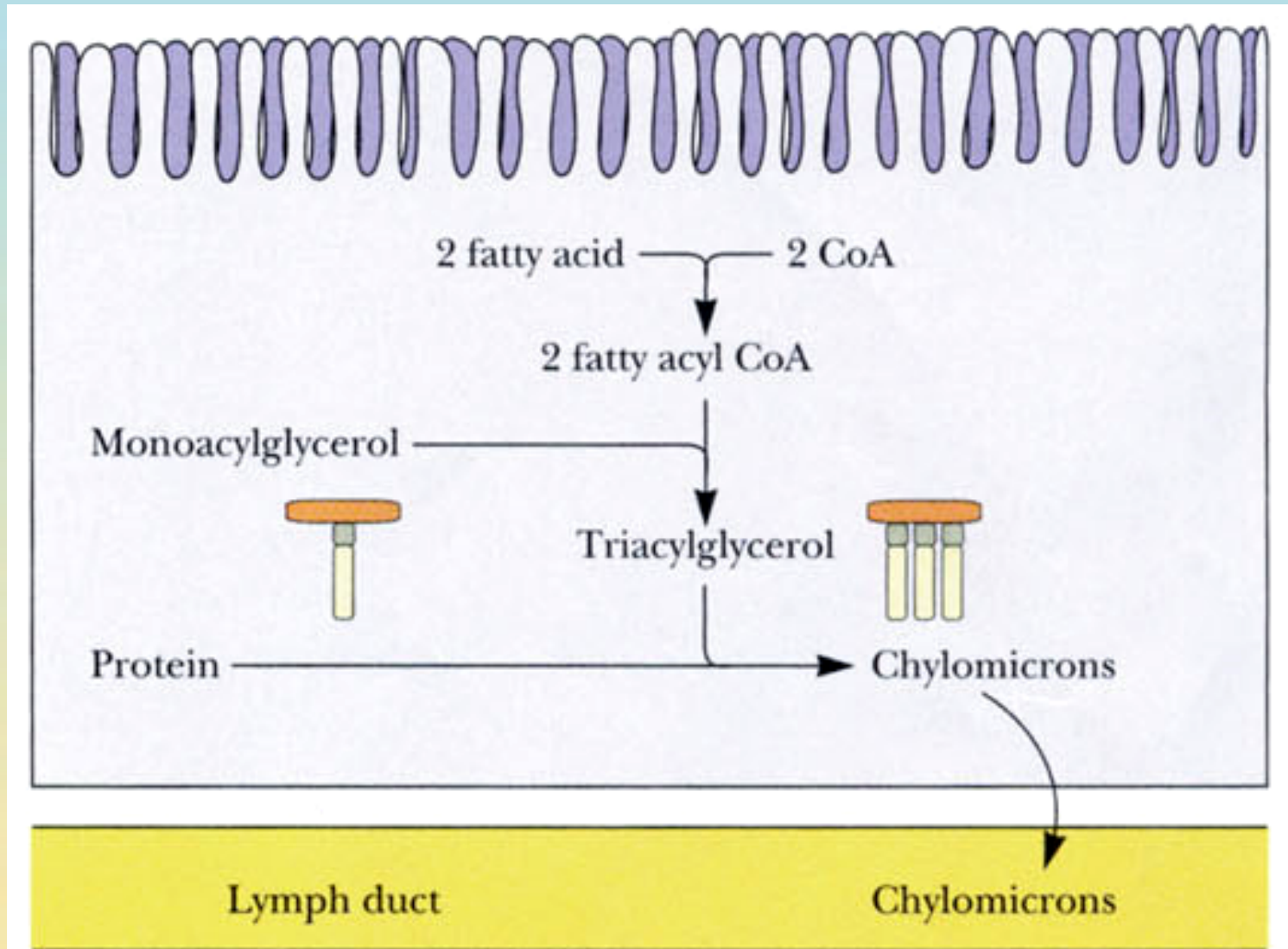
脂肪的消化和吸收

脂肪消化后的产物脂肪酸和2-单酰甘油由小肠上皮粘膜细胞吸收后，又转化为三脂酰甘油，然后与蛋白质一起包装成乳糜微粒，乳糜微粒释放到淋巴管中，再进入血液，运送到肌肉和脂肪组织。短的和中等长度的脂肪酸被吸收进入门静脉血液，直接送入肝脏。

脂肪的消化与吸收图解



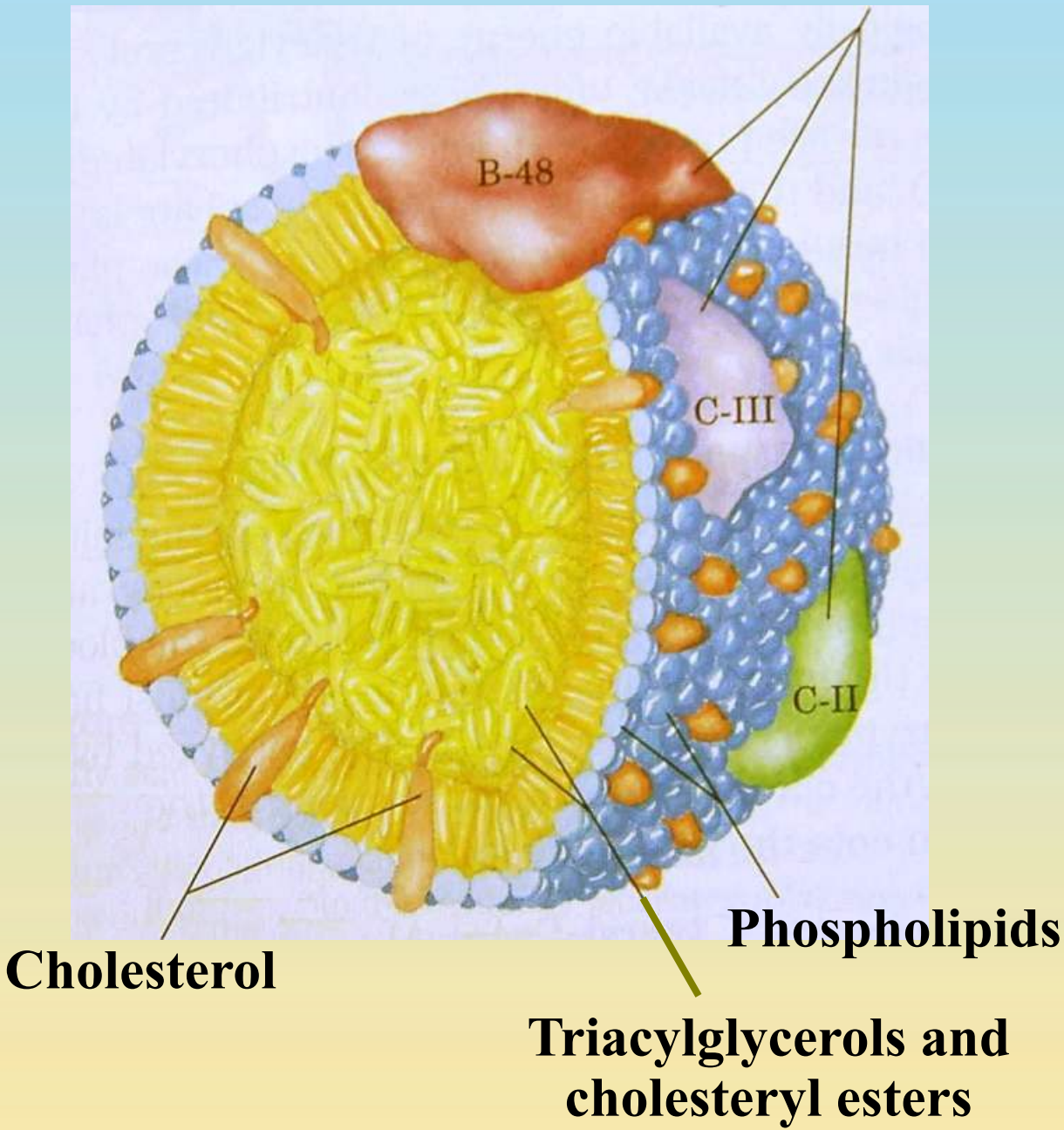
脂肪酸和单酯酰甘油在细胞中重新合成三酯酰甘油



乳糜微粒

Apolipoproteins (载脂蛋白)

乳糜微粒的结构



Cholesterol

**Triacylglycerols and
cholesteryl esters**

Phospholipids

脂肪的消化和吸收

在脂肪组织和骨骼肌毛细血管中，细胞外的脂蛋白脂肪酶（lipoprotein lipase）被载脂蛋白apoC-II活化，催化三脂酰甘油水解成脂肪酸和甘油，产生的脂肪酸由靶组织的细胞吸收。在肌肉中，脂肪酸被氧化以提供能量；在脂肪组织中，它们被重新合成三脂酰甘油贮存起来被这些组织吸收；甘油被运送到肝脏和肾脏，转变成二羟丙酮磷酸（脱氢反应），进入糖酵解途径。

脂肪的消化和吸收

被去除大多数三酰甘油的乳糜微粒仍含有胆固醇和载脂蛋白，随血液运送到肝脏，经apoE受体介导吞入肝细胞，释放出其中的胆固醇，残体在溶酶体中降解。三酰甘油或氧化供能，或作为酮体合成的前体。当食物提供的脂肪酸超过当时氧化供能及合成酮体所需时，肝脏将它们转变成三酰甘油，与特异的载脂蛋白组装成VLDL，经血液运送到脂肪组织贮藏。

脂肪的动员

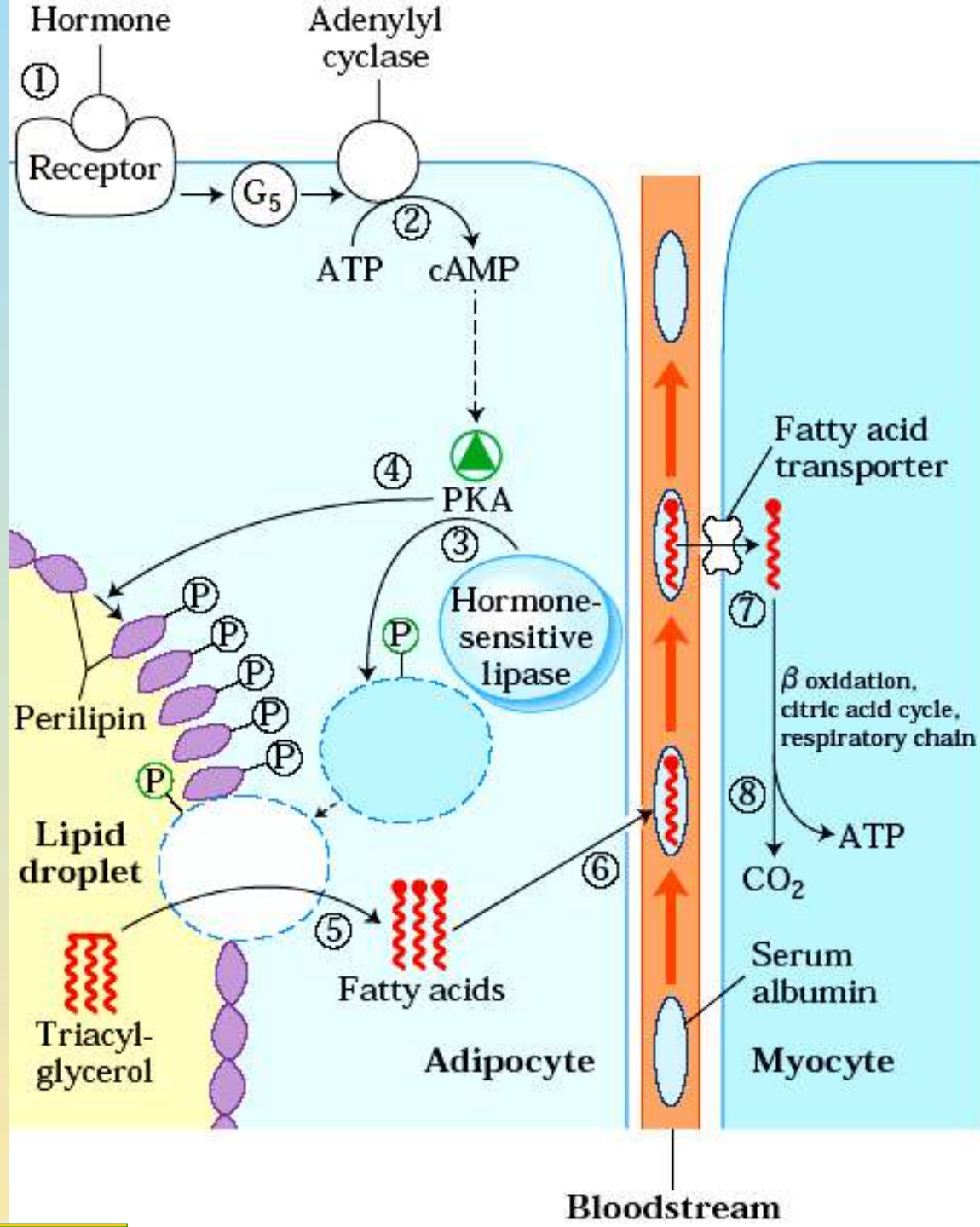
中性脂（neutral lipid）以脂滴的形式贮存在脂肪细胞（以及合成固醇的肾上腺皮质、卵巢、睾丸细胞）中。脂滴的结构是以固醇和三脂酰甘油为核心，外面包裹着一层磷脂。脂滴的表面还覆盖着围脂滴蛋白（perilipin，油滴包被蛋白，围脂素）。围脂滴蛋白能够阻止脂滴被不适时地动员。当需要代谢能量的激素信号到达时，贮存在脂肪组织中的三脂酰甘油被动员，运输到需要的组织（骨骼肌、心脏和肾皮质）中作为燃料。

脂肪的动员

肾上腺素和胰高血糖素通过细胞质膜上的受体、G蛋白、腺苷酸环化酶、蛋白激酶A通路，使围脂滴蛋白及激素敏感的脂肪酶磷酸化，磷酸化的围脂滴蛋白引起磷酸化的脂肪酶运动到脂滴表面，催化三脂酰甘油水解成游离脂肪酸和甘油。激素敏感的脂肪酶被磷酸化后，活性提高1-2倍，同时在磷酸化的围脂滴蛋白作用下，活性提高50倍。围脂滴蛋白基因缺陷的细胞不能对cAMP浓度的增加作出响应，激素敏感的脂肪酶也不能与脂滴结合。

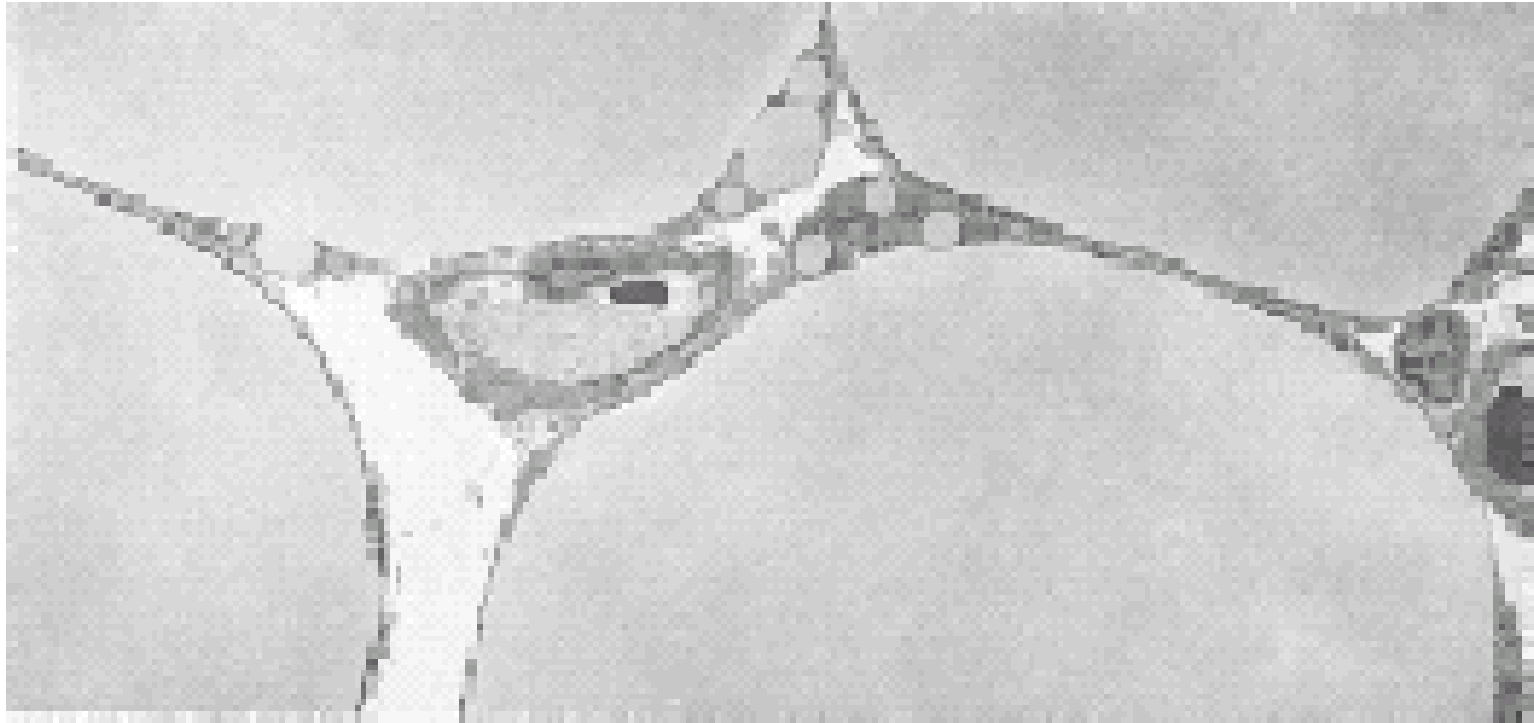
动员产生的脂肪酸的运输

脂肪细胞中的脂肪酸进入血液，与清蛋白非共价键结合运输。清蛋白分子量66000，约占血清总蛋白的50%，每个清蛋白单体分子结合多达10个脂肪酸分子。通过与可溶性的血清清蛋白结合，水不溶性的脂肪酸得以经血液运输。到达靶组织后，脂肪酸与清蛋白解离，进入靶细胞氧化供能。



脂肪动员图解

豚鼠脂肪细胞横切



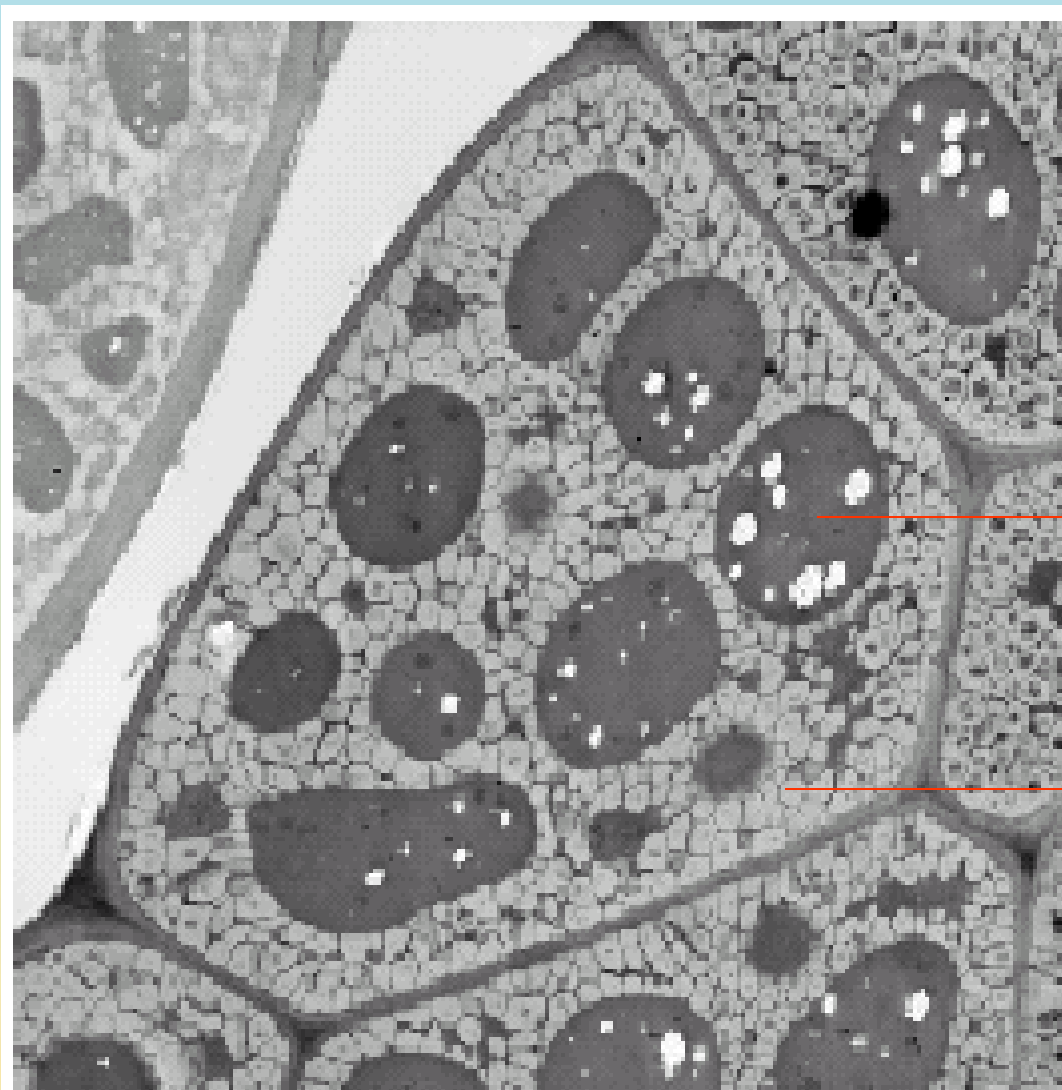
(a)

8 μm

脂肪细胞的电镜扫描照片



拟南芥子叶横切



蛋白体

油体

(b)

3 μm

脂质的运输形式

简单的、非酯化的脂肪酸与血清清蛋白及血浆中的其他蛋白质结合而转运。

磷脂、三脂酰甘油、胆固醇和胆固醇酯是以脂蛋白的形式转运的。在机体的各个部位，脂蛋白与特异的受体和酶作用而被吸收和利用。

脂蛋白的不同密度

大多数蛋白质的密度为，脂的密度一般为。脂蛋白的密度取决于蛋白质和脂质的比例，蛋白质比例越大则密度越大。

主要的人血浆脂蛋白 的组成和性质

脂蛋白类别	密度 (g/cm ³)	颗粒直径 (nm)	主要载脂 蛋白
乳糜微粒 (chylomicrons)	0.92~0.95	100~500	B-48, A,C,E
VLDL (very low density lipoproteins)	0.95~1.006	30~80	B-100,C,E
IDL (intermediate-density lipoproteins)	1.006~1.019	25~50	B-100,E
LDL (low-density lipoproteins)	1.019~1.063	18~28	B-100
HDL (high-density lipoproteins)	1.063~1.21	5~15	A-1,A-2, C,E

也有些书上将IDL和LDL合并为LDL，其密度范围为1.006-1.063。

人血浆脂蛋白中的载脂蛋白

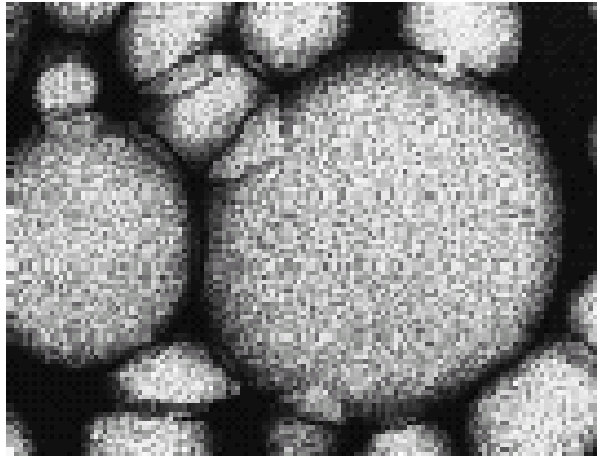
载脂蛋白	分子量	存在于脂蛋白的类型 (功能)
ApoA- I	28,331	HDL Activates LCAT; interacts with ABC transporter
ApoA- II	17,380	HDL
ApoA-IV	44,000	Chylomicrons, HDL
ApoB-48	240,000	Chylomicrons
ApoB-100	513,000	VLDL, LDL Binds to LDL receptor
ApoC- I	7,000	VLDL, HDL
ApoC- II	8,837	Chylomicrons, VLDL, HDL Activates lipoprotein lipase

LCAT: 卵磷脂—胆固醇酰基转移酶

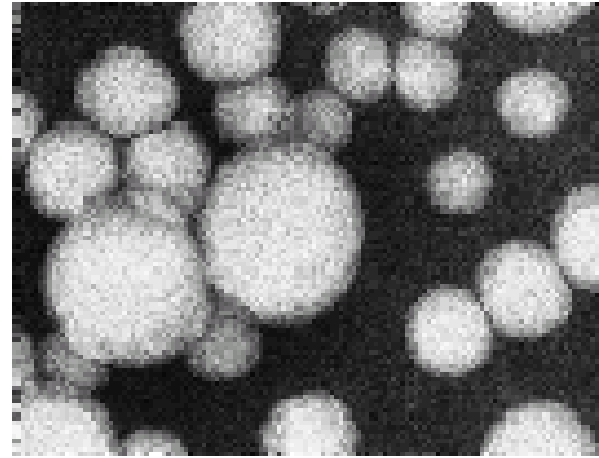
人血浆脂蛋白中的载脂蛋白（续）

载脂蛋白	分子量	存在于脂蛋白的类型（功能）
ApoC-III	8,751	Chylomicrons, VLDL, HDL Inhibits lipoprotein lipase
ApoD	32,500	HDL
ApoE	34,145	Chylomicrons, VLDL, HDL Triggers clearance of VLDL and chylomicron remnants

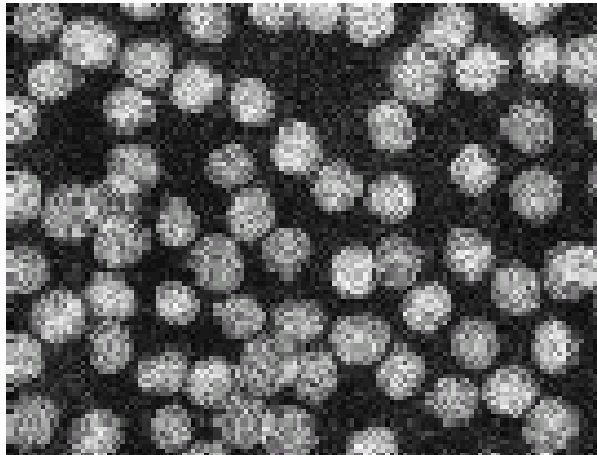
各种脂蛋白的大小



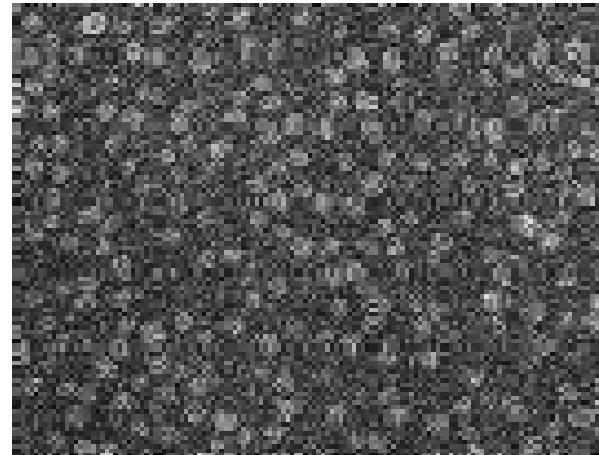
Chylomicrons ($\times 60,000$)



VLDL ($\times 180,000$)



LDL ($\times 180,000$)



HDL ($\times 180,000$)

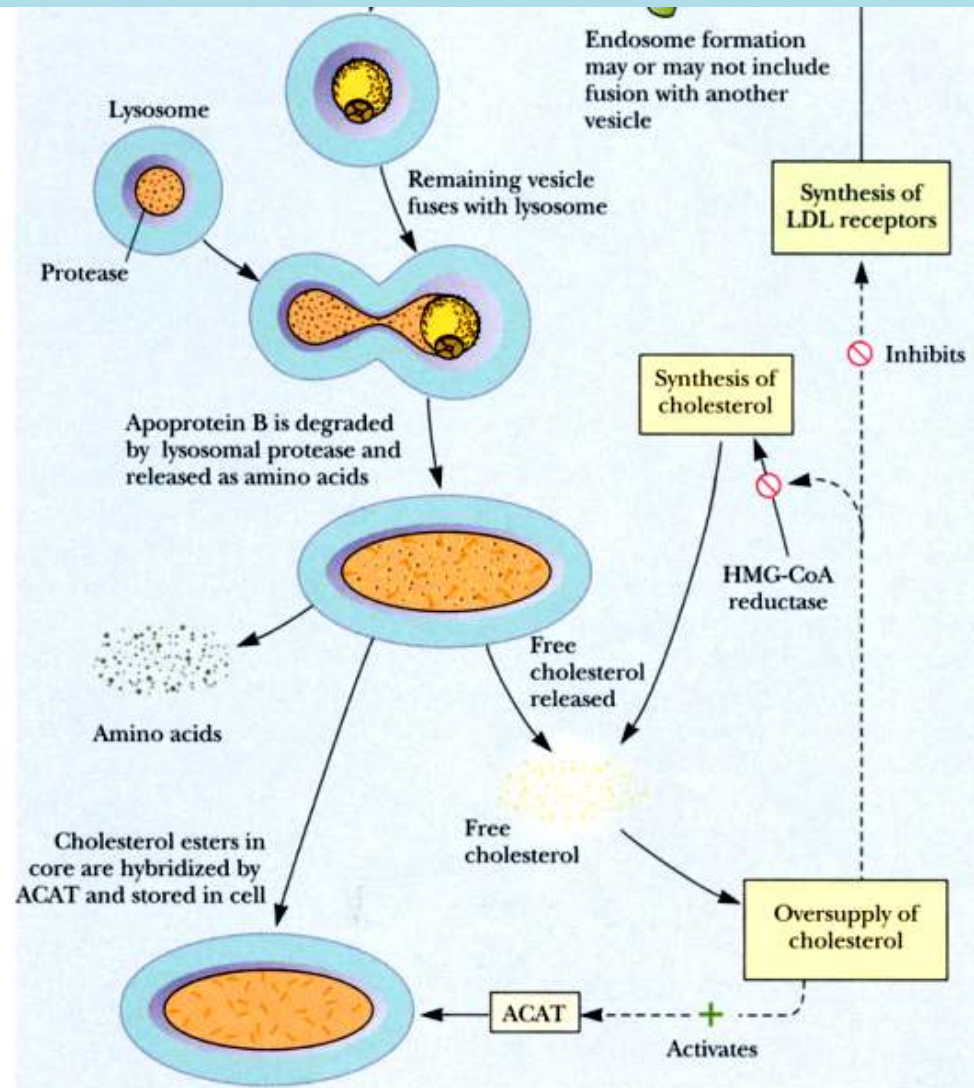
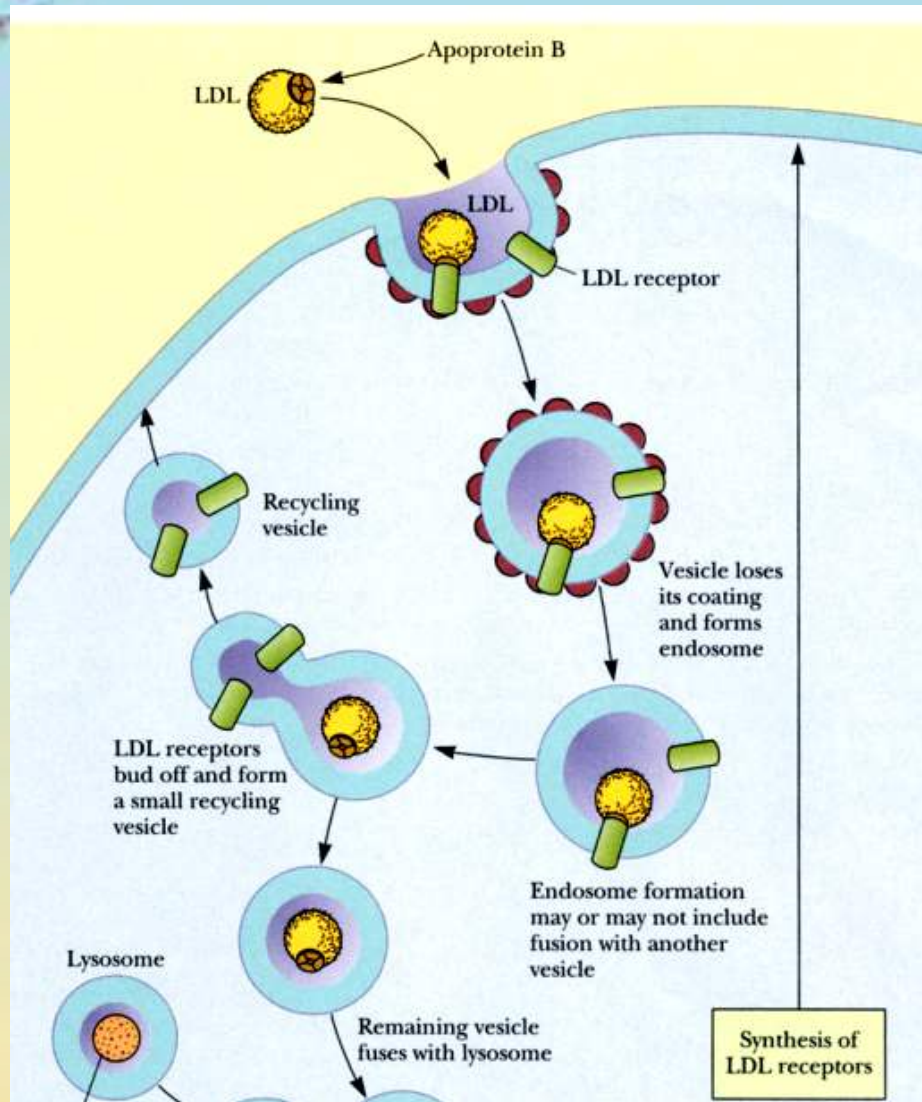
主要的人血浆脂蛋白 的组成和性质

脂蛋白 类别	组成（%干重）				
	蛋白质	胆固醇	胆固醇酯	磷脂	三酰甘油
乳糜微粒	1~2	2	4	8	84~85
VLDL	10	8	14	18	50
IDL	18	8	22	22	30
LDL	25	9	40	21	5
HDL	50	3	17	27	3

VLDL的形成部位和功能

VLDL主要在肝脏的内质网上形成，肠中也有少量形成。VLDL在目的部位被脂蛋白脂肪酶作用，将三脂酰甘油水解利用，VLDL逐渐转变成IDL和LDL，LDL又返回到肝脏重新加工，或将胆固醇转运到脂肪组织和肾上腺。LDL似乎是胆固醇和胆固醇酯的主要运输形式，而乳糜微粒的主要任务是运输三脂酰甘油。

LDL通过受体被胞吞入细胞



ACAT: 脂酰CoA:胆固醇脂酰基转移酶

细胞表面LDL受体的结构

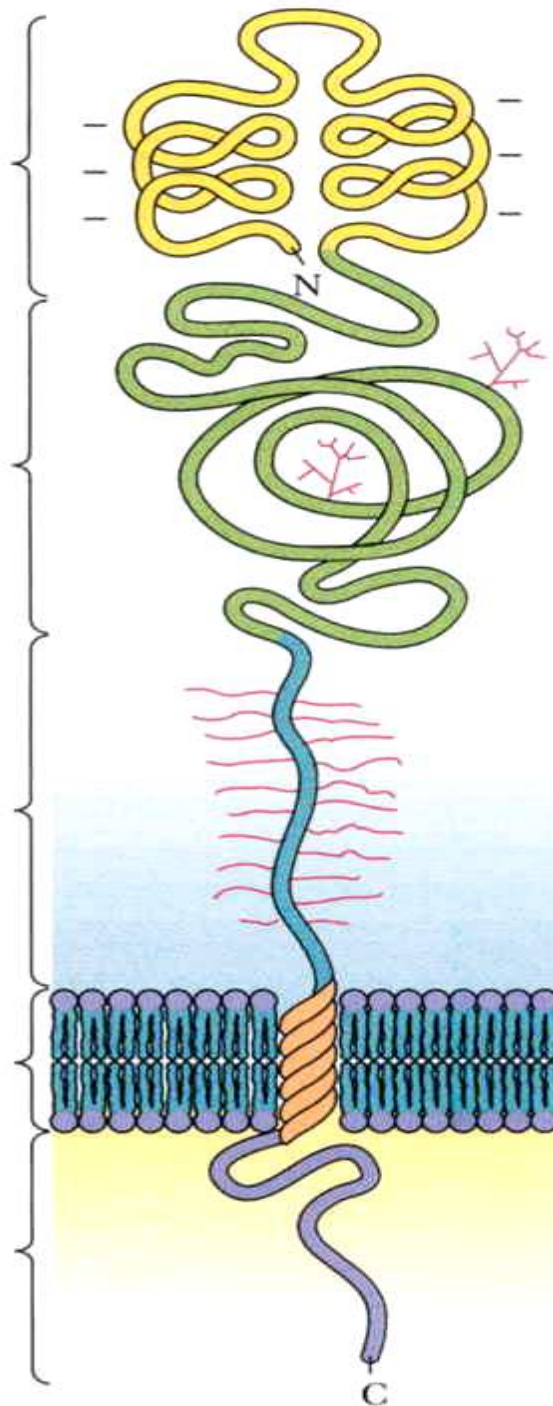
LDL-binding domain
292 residues

N-linked oligosaccharide domain
350-400 residues

O-linked oligosaccharide domain
58 residues

Transmembrane domain
22 residues

Cytosolic domain
50 residues



LDL受体缺陷会导致高胆固醇血症

HDL的形成部位和功能

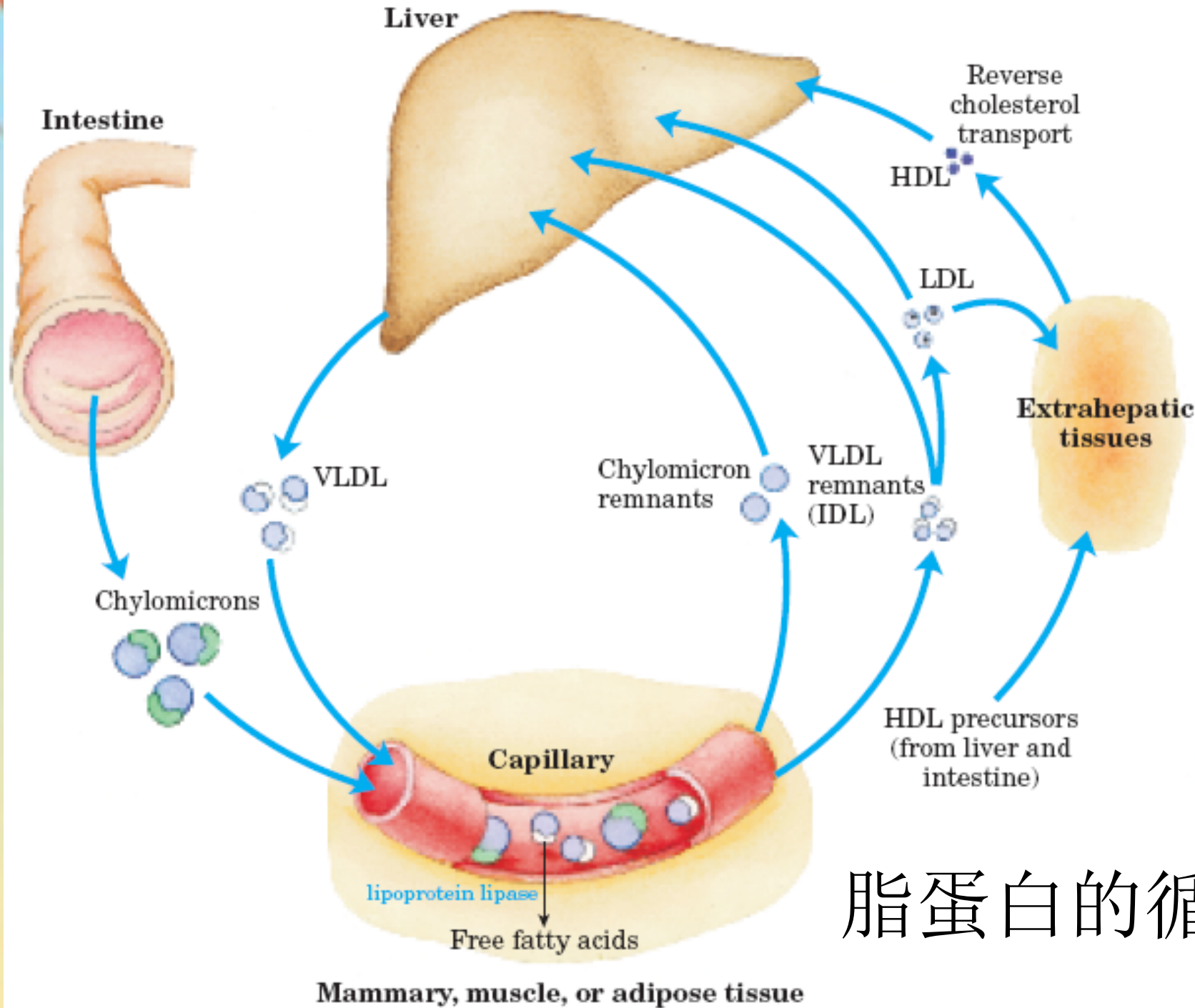
HDL在肝脏和小肠里刚形成时，体积小，富含蛋白质的颗粒，含有少量的胆固醇，不含胆固醇酯。它含有卵磷脂—胆固醇酰基转移酶（lecithin-cholesterol acyl transferase, LCAT），催化胆固醇酯形成。存在于初生HDL表面的LCAT将乳糜微粒残体（remnant）和VLDL残体中的胆固醇和卵磷脂转变成胆固醇酯，形成核心，使得碟状的初生HDL转变成成熟的、球状的HDL颗粒。这个富含胆固醇的脂蛋白回到肝脏，卸下胆固醇，其中一些胆固醇转变成胆酸盐。

HDL的形成部位和功能

HDL可以通过受体介导的内吞作用吸收进入肝细胞，但是也有些HDL的胆固醇由另一个机制输入其它组织。HDL能够结合到肝脏和产生类固醇的组织如肾上腺的质膜受体蛋白SR-BI上，这些受体并不介导内吞作用，而是将HDL中的胆固醇和其它脂部分地、选择性地运入细胞。耗尽的HDL然后解离到血液中重新循环，从乳糜微粒和VLDL残体中吸收脂质。

HDL的形成部位和功能

耗尽的HDL也能够吸收贮存在肝外组织中的胆固醇，把它们携带到肝脏，产生反向胆固醇运输途径。一种反向运输途径是，新生的HDL与富含胆固醇细胞的SR-BI受体相互作用，触发胆固醇从细胞表面到HDL的被动运动，然后携带它返回肝脏。第二个途径是，耗尽的HDL的apoA-I与富含胆固醇细胞的主动运输蛋白（ABC1）相互作用，HDL由内吞作用吸收，装载着胆固醇重新分泌出来，运输到肝脏。

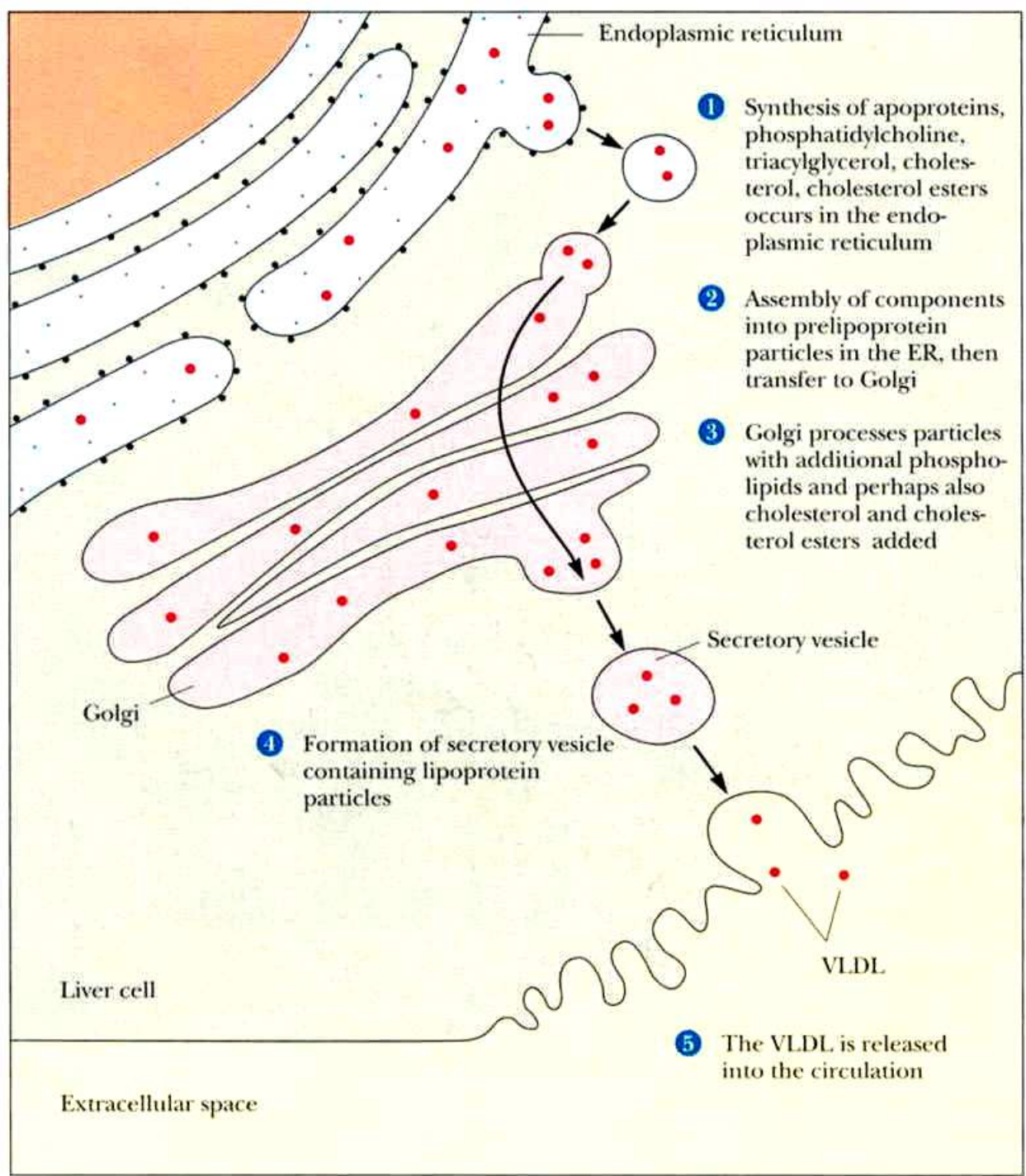


脂蛋白的循环

HDL和LDL与心血管疾病的 关系

HDL和LDL的相对量对于胆固醇在体内的去向和动脉蚀斑的形成是重要的。高水平的HDL有助于降低心血管疾病的危险，而高水平的LDL会增加冠状动脉及心血管疾病的危险。

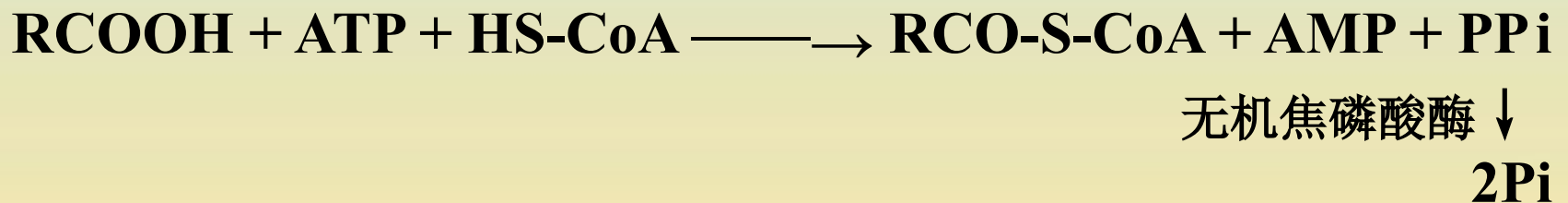
脂蛋白的形成与分泌



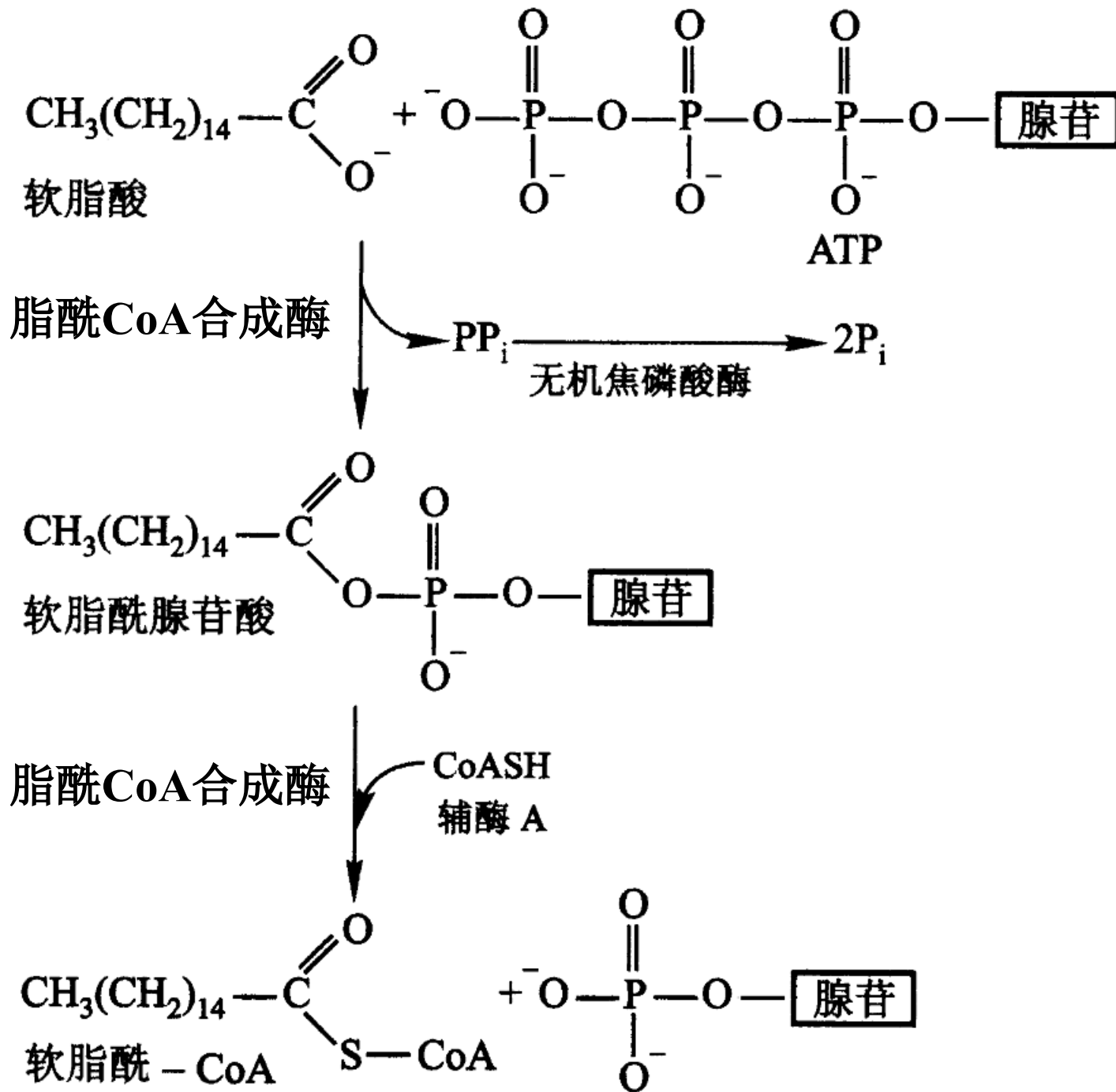
二、脂肪酸的氧化

脂肪酸的活化

脂肪酸分解发生于原核生物的细胞溶胶及真核生物的线粒体基质中。脂肪酸在进入线粒体前，必须先与CoA形成脂酰CoA，这个反应是由脂酰CoA合成酶（acyl-CoA synthetase）催化的。



脂酰CoA的合成历程



脂肪酸进入线粒体

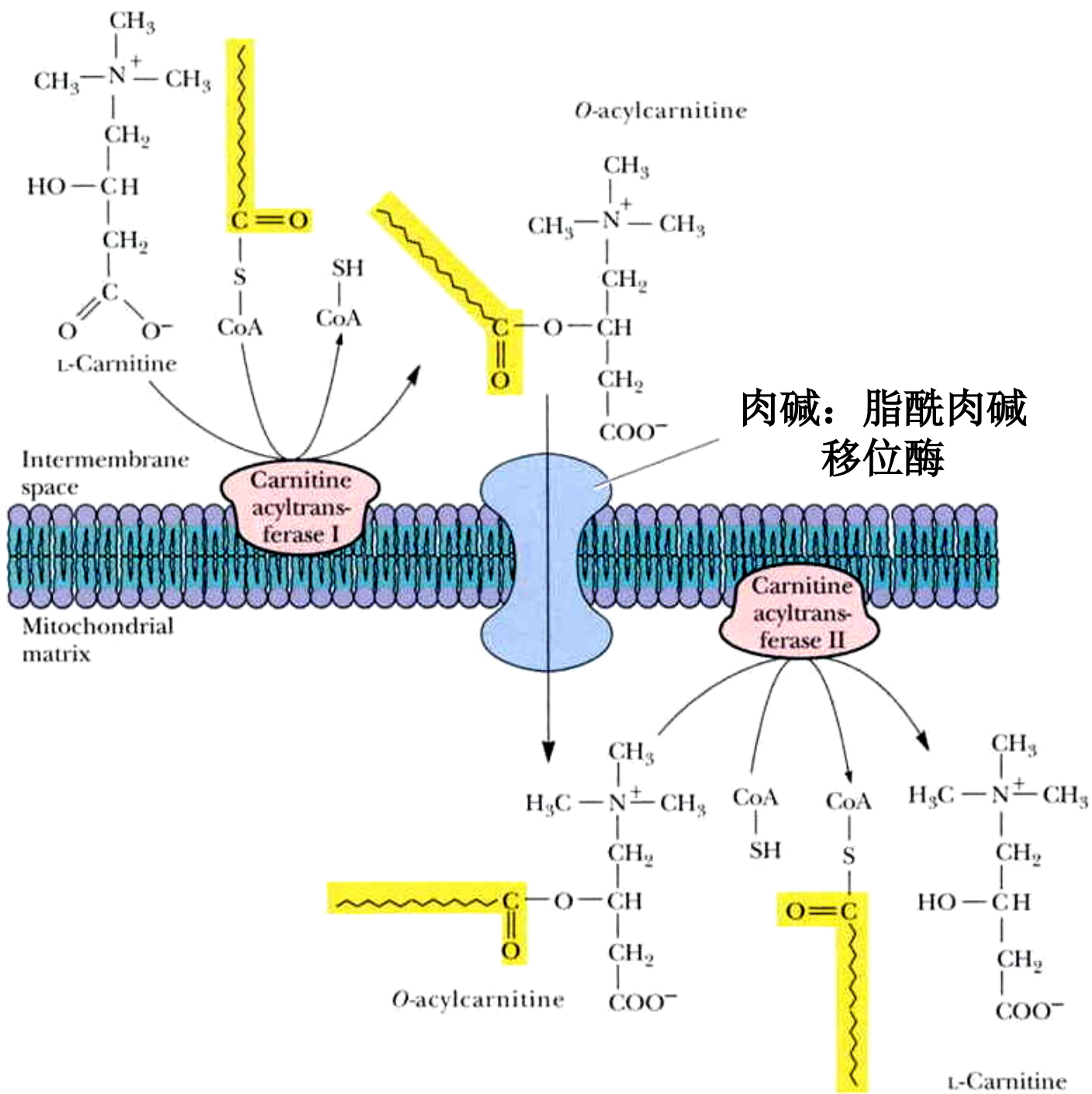
短链或中等长度链（10个碳原子以下）的脂酰CoA通过渗透可以容易地通过线粒体内膜，但是更长链的脂酰CoA需要通过特殊机制才能进入线粒体。这个过程需要经过3种不同酶的作用。

肉碱脂酰转移酶 I

肉碱：脂酰肉碱移位酶

肉碱脂酰转移酶 II

脂肪酸与肉碱结合进入线粒体基质



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/097055040042006142>