

第六章 脂类代谢

第一节 生物体内的脂类

第二节 脂肪的分解代谢

第三节 脂肪的生物合成

第四节 磷脂的代谢

第六章 脂类代谢

第一节 生物体内的脂类

脂类：是脂肪、类脂及其衍生物的总称，其共同特点是：不溶于水而易溶于乙醚、氯仿等非极性有机溶剂。

粗脂肪：指利用有机溶剂处理动、植物组织，所提取的混合在一起的脂类物质。

脂类的功能:

- 1、重要能源，能量高度集中。
- 2、生物膜的成分 磷脂、糖脂及胆固醇
- 3、具有营养、代谢及调节功能
 V_A 、 V_D 、 V_E 、 V_K 及固醇类激素等
- 4、保护作用 防止机械损伤、热量散失
- 5、与细胞识别、种特异性及组织免疫等有密切关系

脂类按化学结构和组成可分为三大类：

一、单纯脂类

是脂肪酸（C4以上）和醇（甘油醇和高级一元醇）构成的脂

二、复合脂类

单纯脂类 + 非脂溶性物质

三、非皂化脂类

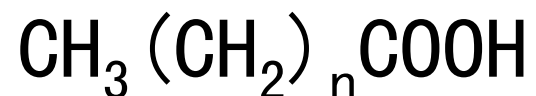
特点：不含脂肪酸

包括萜类、类固醇类及前列腺素等

一、单纯脂类

1、脂肪酸

(1) 饱和脂肪酸 C原子数为12-26



月桂酸	C_{12}
豆蔻酸	C_{14}
软脂酸 (棕榈酸)	C_{16}
硬脂酸	C_{18}

(2) 不饱和脂肪酸

单不饱和脂肪酸 棕榈油酸 $C_{16}: 1^{\Delta 9}$

油酸 $C_{18}: 1^{\Delta 9}$

二烯酸: 亚油酸 $C_{18}: 2^{\Delta 9, \Delta 12}$

三烯酸: 亚麻酸 $C_{18}: 2^{\Delta 9, \Delta 12, \Delta 15}$

花生四烯酸 $C_{20}: 2^{\Delta 5, \Delta 8, \Delta 11, \Delta 14}$

2、脂肪

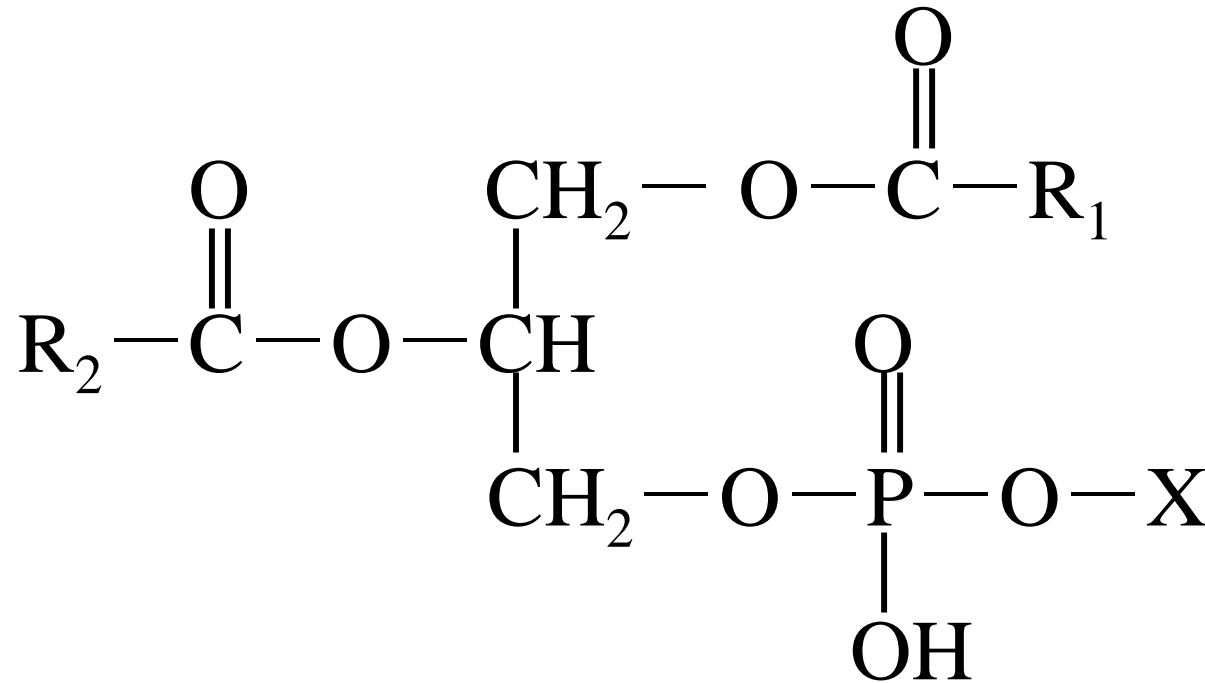
常温下为固体的脂肪 → 脂
(甘油 + 饱和脂肪酸)

常温下为液体的脂肪 → 油
(甘油 + 不饱和脂肪酸)

植物油优于动物脂是由于：油中含
有人体所必需的脂肪酸：亚油酸、亚麻酸

二、复合脂类

1、磷脂：分子中含有磷酸的单纯脂质衍生物，生物膜的主要成分。



X=H

磷脂酸

X=CH₂CH₂N⁺(CH₃)₃ 磷脂酰胆碱 (卵磷脂)

X=CH₂CH₂NH₂ 磷脂酰乙醇胺 (脑磷脂)

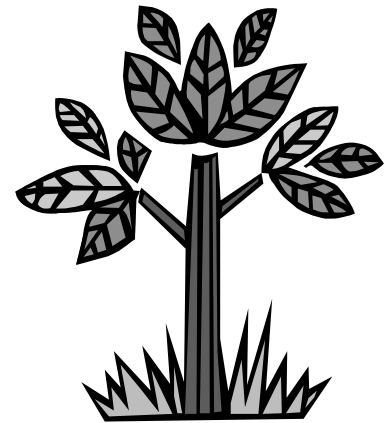
X=肌醇 磷脂酰肌醇

X=CH₂—CH—NH₂
|
COOH 磷脂酰丝氨酸

2、糖脂：糖脂酰甘油

糖苷与甘油分子第三个羟基以糖苷键相连，甘油的另两个羟基被脂肪酸酯化

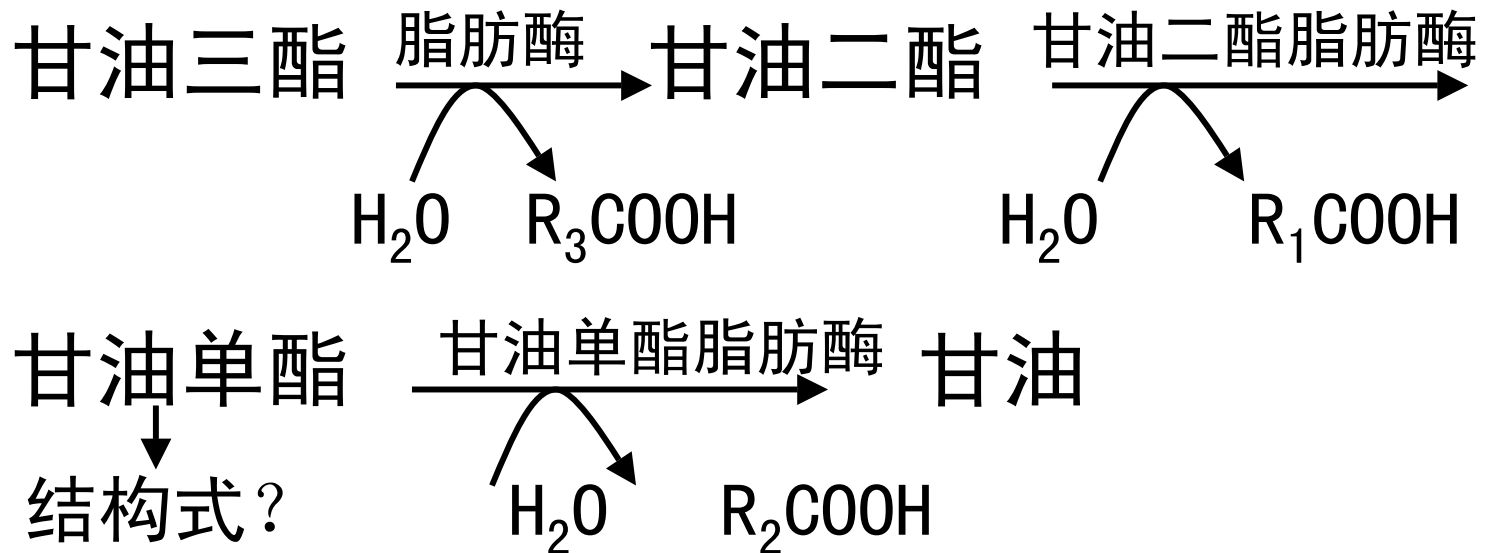
主要存在于：动物神经系统、植物叶绿体及代谢活跃部位。



第二节 脂肪的分解代谢

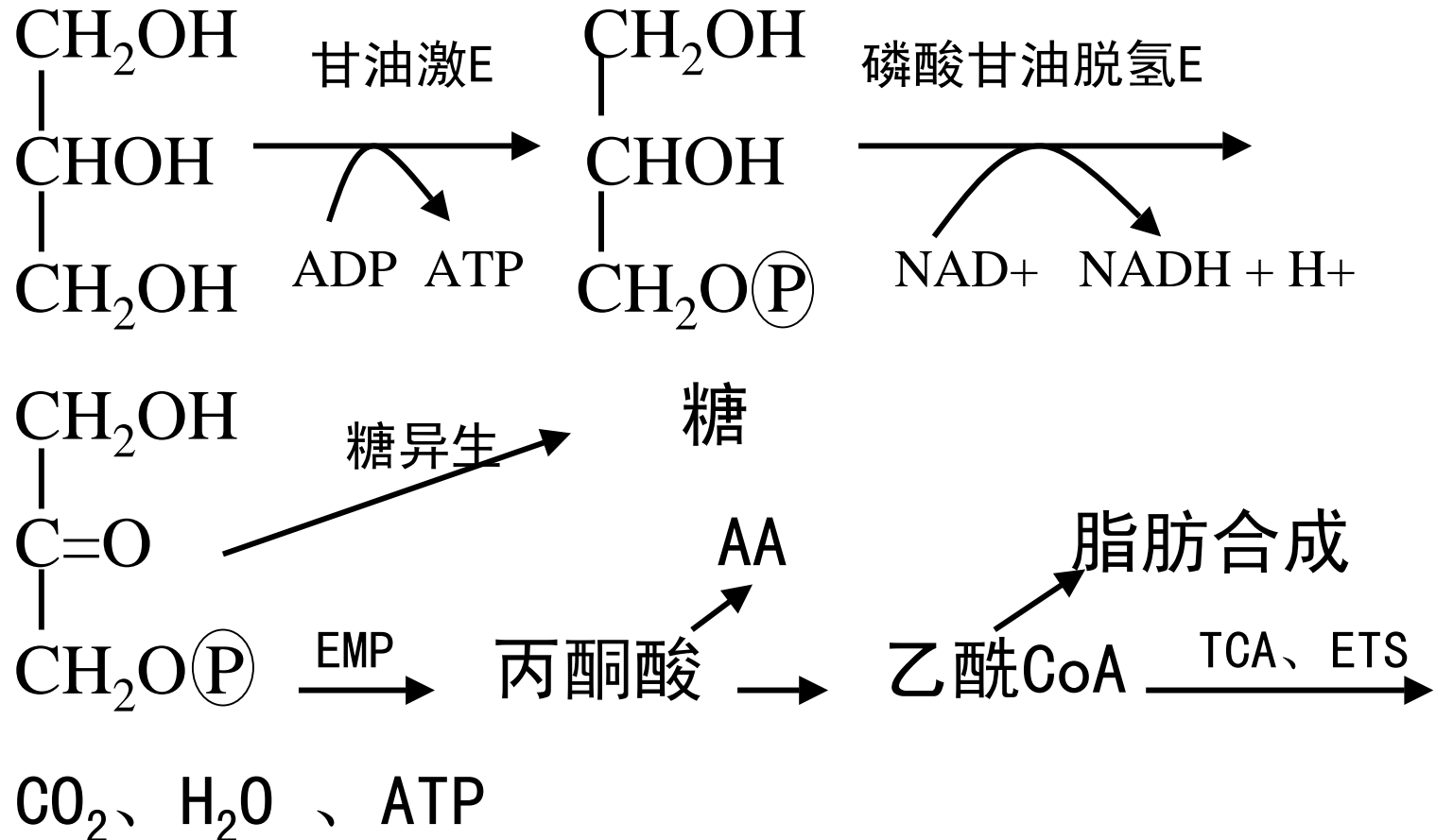
一、脂肪的酶促降解

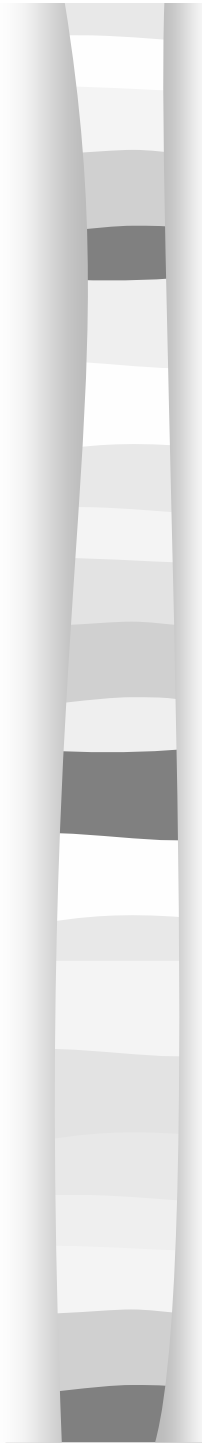
1、动物



2、植物：由 α -脂肪酶完成

二、甘油的分解与转化





1、转化为糖：甘油-----DHAP-----糖异
生作用-----糖

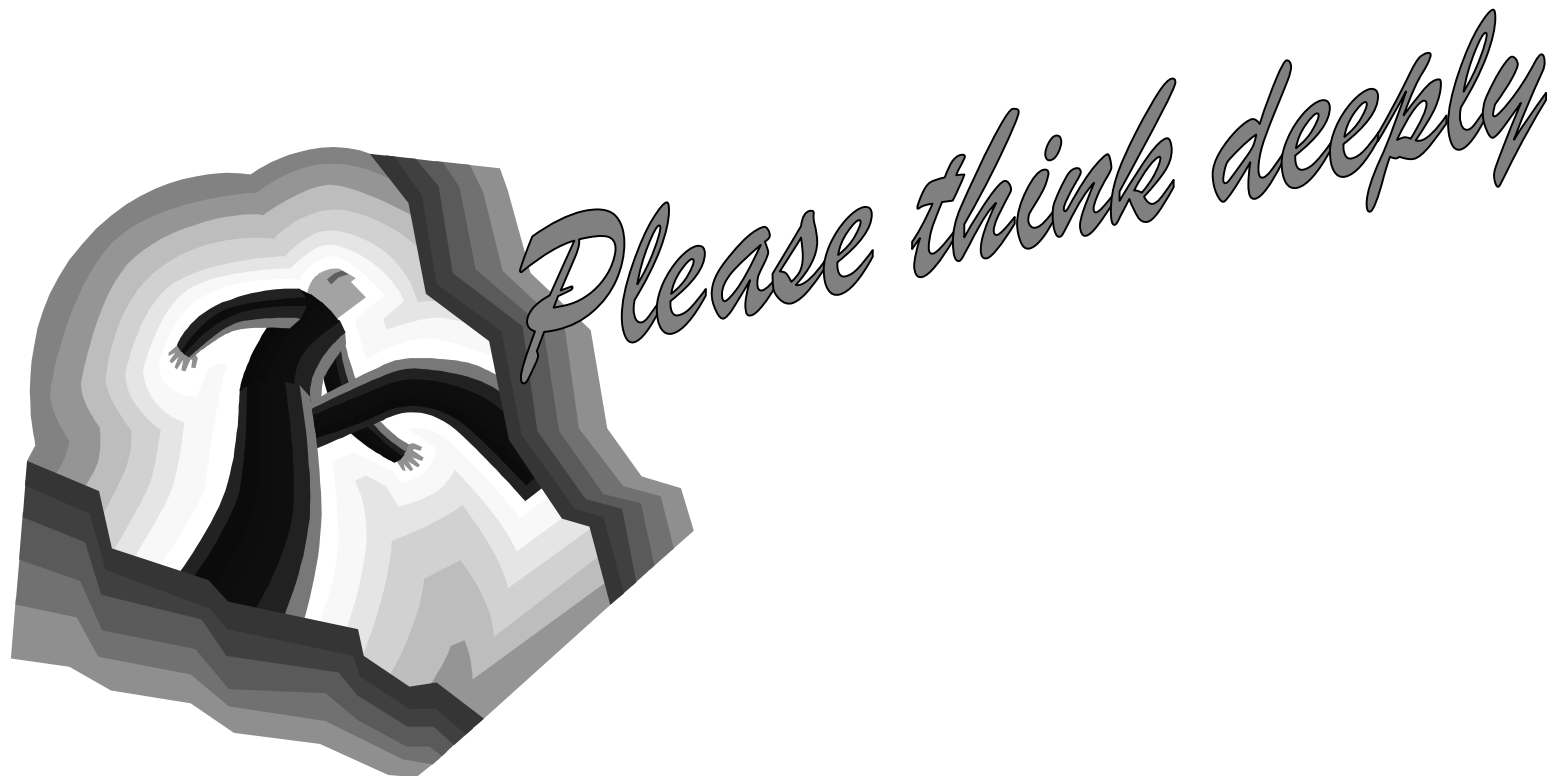
2、转化为AA：甘油-----DHAP-----EMP---
--丙酮酸-----Ala

3、转化为脂肪酸：甘油-----DHAP-----
EMP-----丙酮酸-----乙酰CoA-----脂肪酸

4、彻底氧化分解，提供能量：甘油---
-DHAP-----EMP -----丙酮酸-----乙酰
CoA-----TCA、ETS-----CO₂、H₂O、ATP

思考题：

1mol 甘油彻底氧化分解可生成多少
mol ATP？ 反应方程式如何？



三、脂肪酸的氧化分解

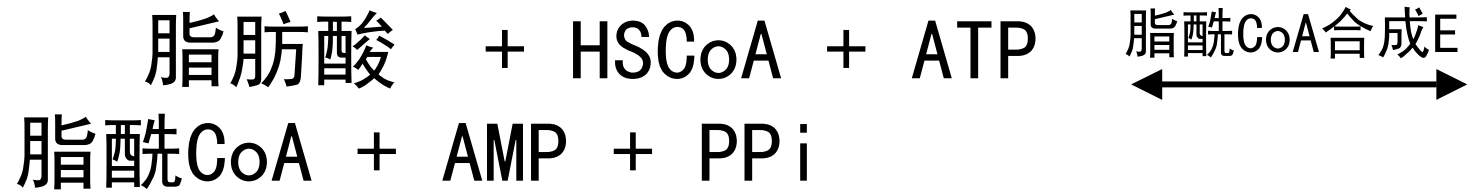
(一) 脂肪酸的 β -氧化

德国生物学家Knoop在1904年发现的

定义：氧化作用发生在脂肪酸的 β -C原子上，其产物是乙酰CoA和少一个二碳单位的脂酰CoA的过程。

1、历程

1) 脂肪酸活化 (一个脂肪酸只活化一次)

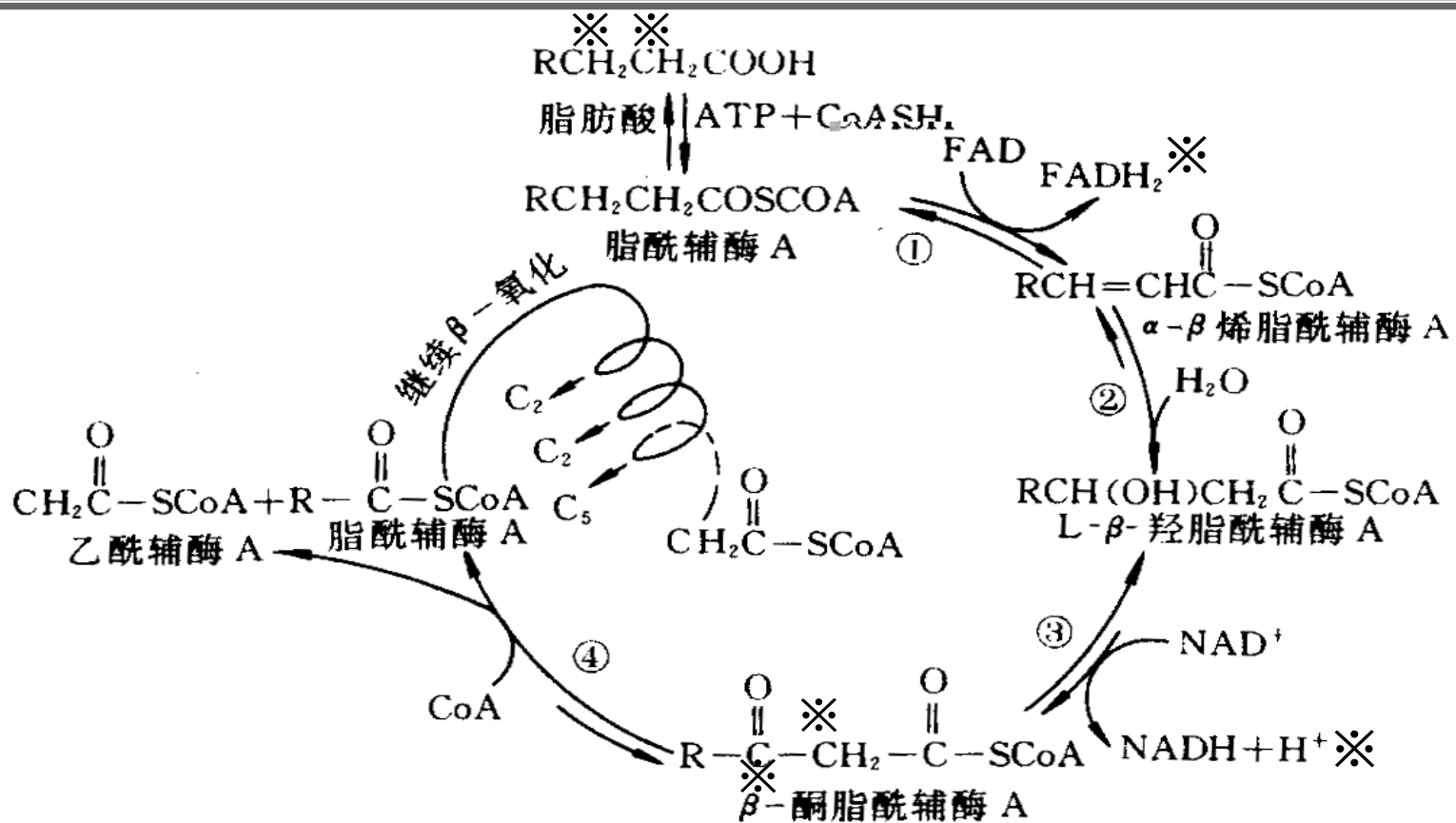


2) 脱氢 受氢体是FAD

3) 水化

4) 脱氢 受氢体是NAD⁺

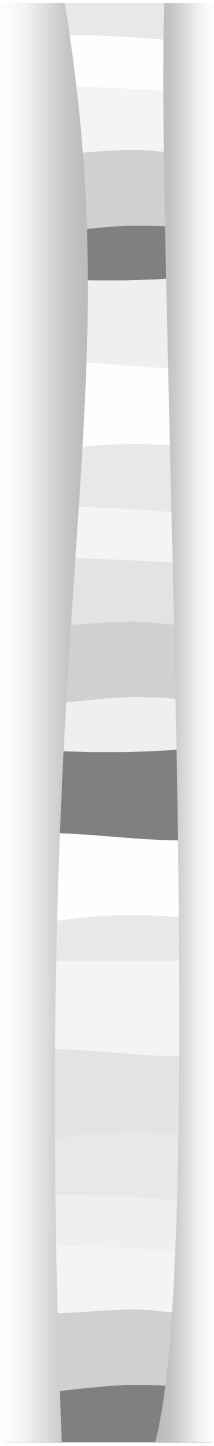
5) 硫解



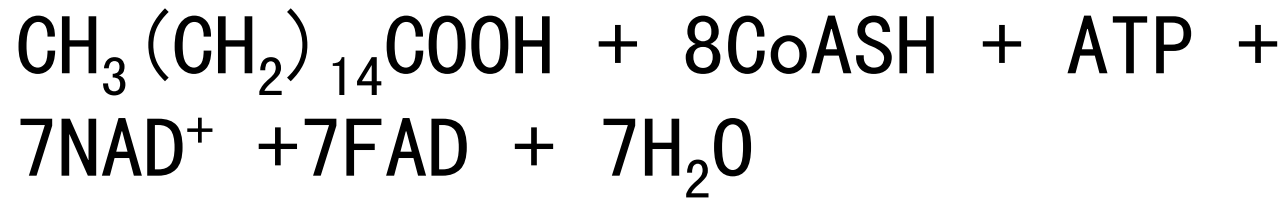
脂肪酸的 β 氧化

- ① 脂酰 CoA 脱氢酶
- ② 烯脂酰 CoA 水化酶
- ③ L- β -羟脂酰 CoA 脱氢酶
- ④ 硫解酶

图 8-3 脂肪酸的 β -氧化



以软脂酸为例：一次活化、七次循环



2、 β -氧化的部位及脂酰CoA的运载

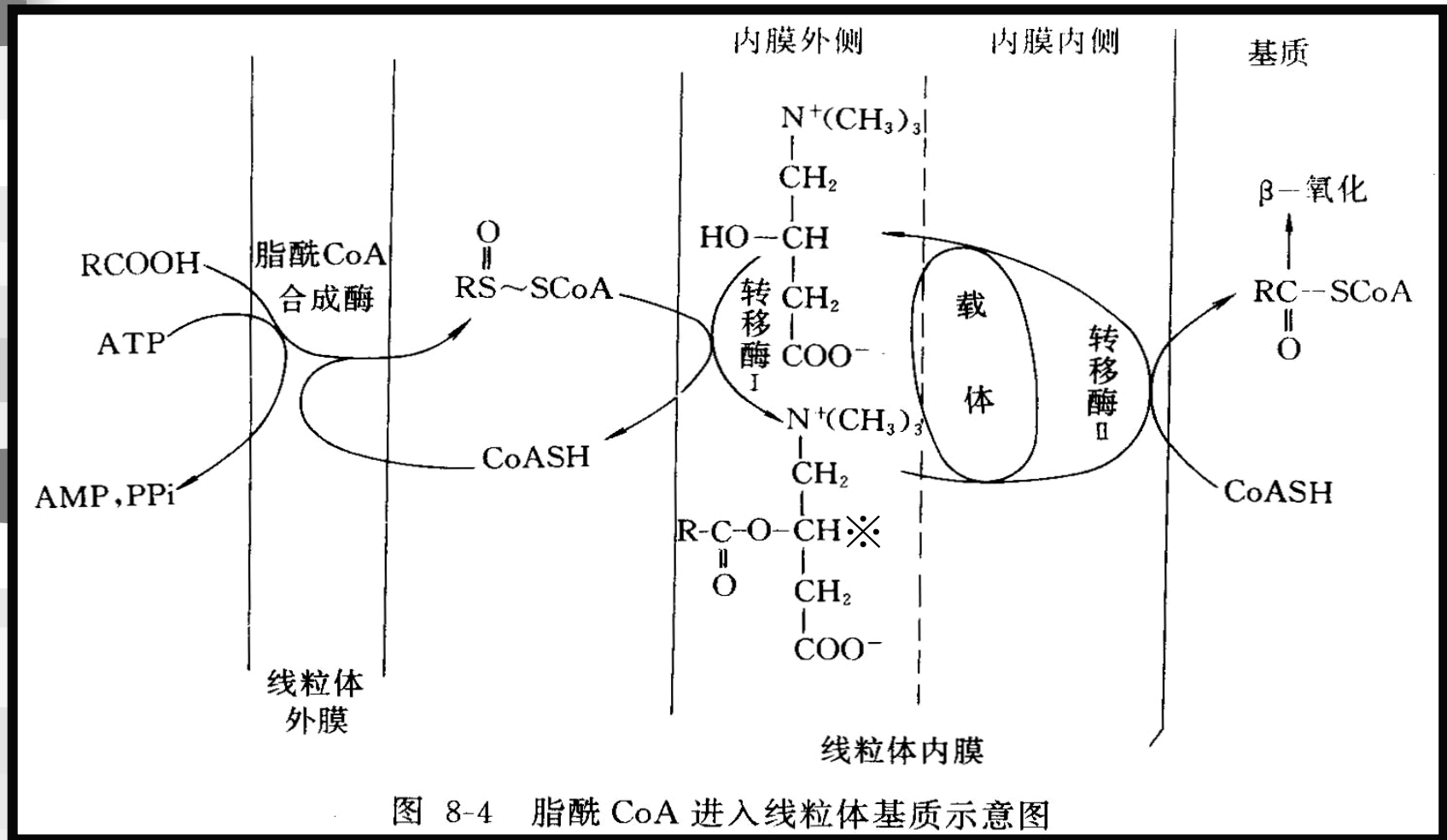
部位：线粒体基质（动物、某些植物）

乙醛酸体（油料种子、藻类等）

脂肪酸活化（细胞质）
 $\xrightarrow{\text{肉毒碱转移系统}}$

β -氧化（线粒体）

肉毒碱穿梭： β -氧化在线粒体基质中进行，而在胞质中形成的脂酰CoA不能透过线粒体内膜，必须依靠内膜上的肉毒碱为载体才能进入线粒体基质，这个运载系统称~。





NADH: $7 + 8 \times 3 = 31$

FADH₂: $7 + 8 \times 1 = 15$

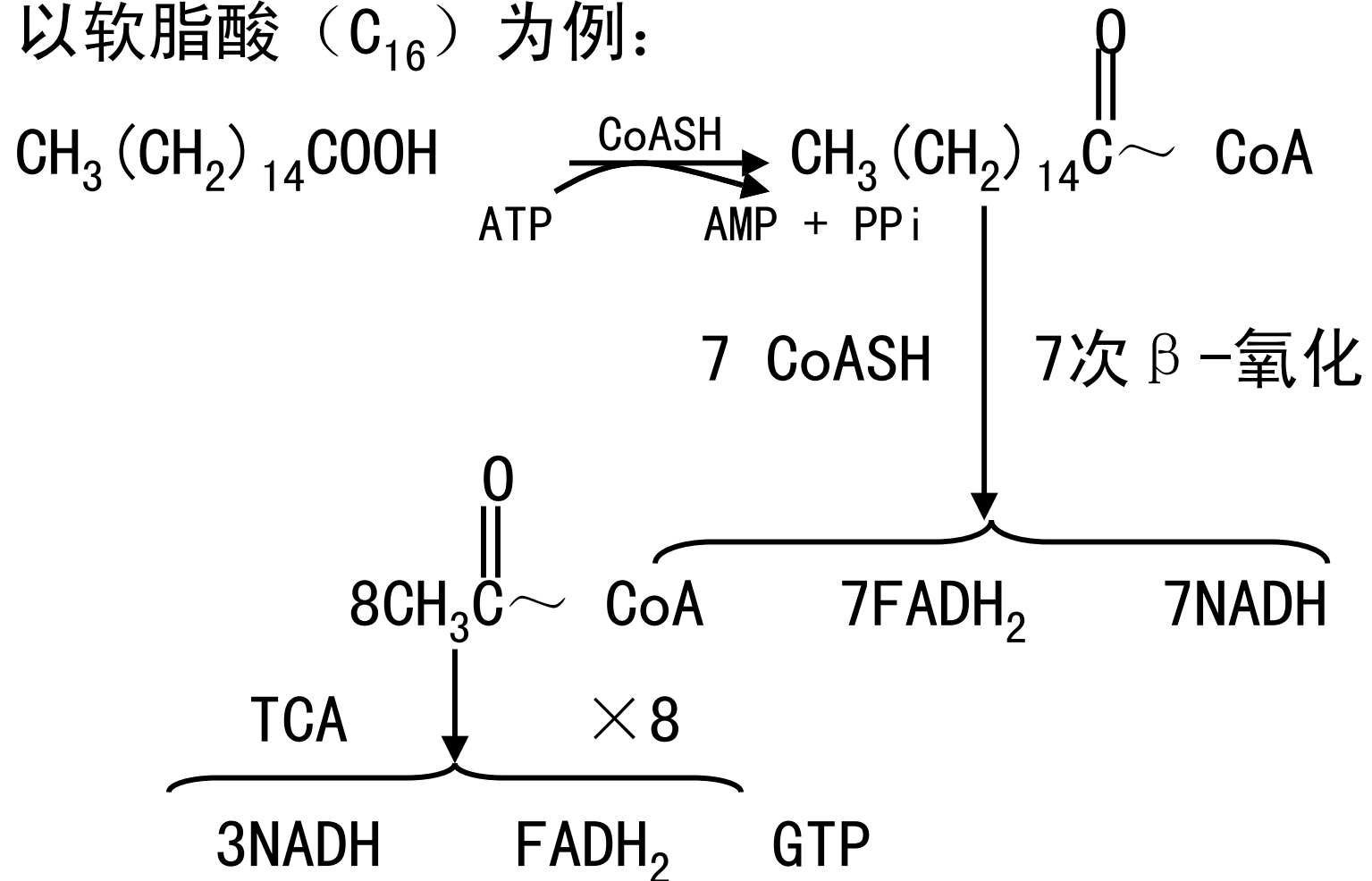
ATP: $7 \times (3+2) + 8 \times (3 \times 3 + 1 \times 2 + 1) - 2 = 129$

耗O₂: $(31 + 15) \div 2 = 23$

3、 β -氧化的产物—乙酰CoA的去向

(1) 进入TCA \longrightarrow CO_2 、 H_2O 、ATP

以软脂酸 (C_{16}) 为例:



思考题：

归纳总结并填下表：

脂肪酸	NADH	FADH ₂	ATP	O ₂
月桂酸				
豆蔻酸				
软脂酸	31	15	129	23
硬脂酸				
公式				

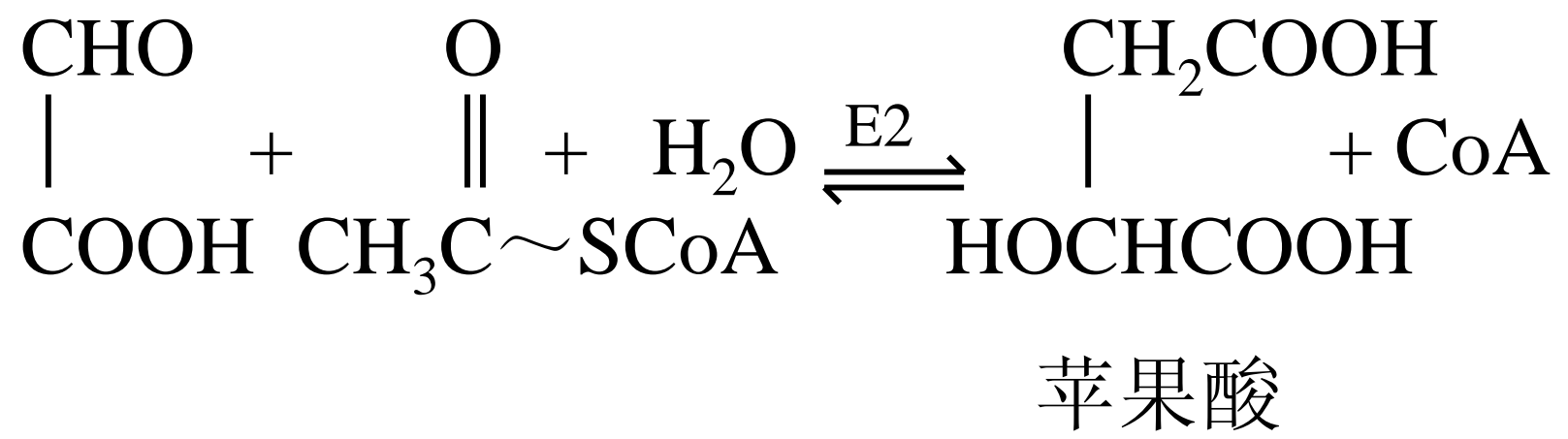
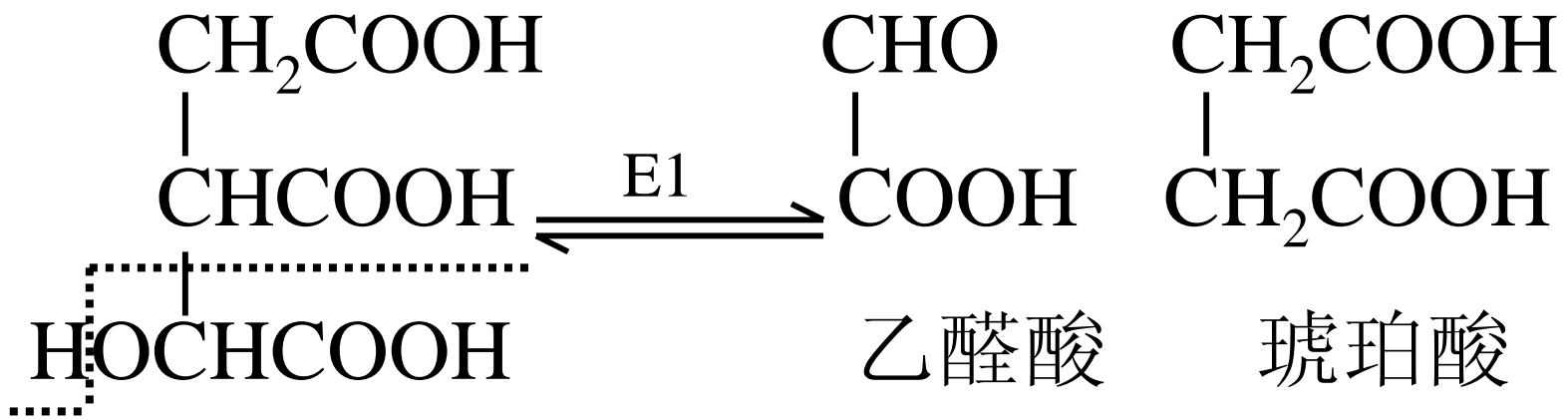
(2) 进入乙醛酸循环 (GAC)

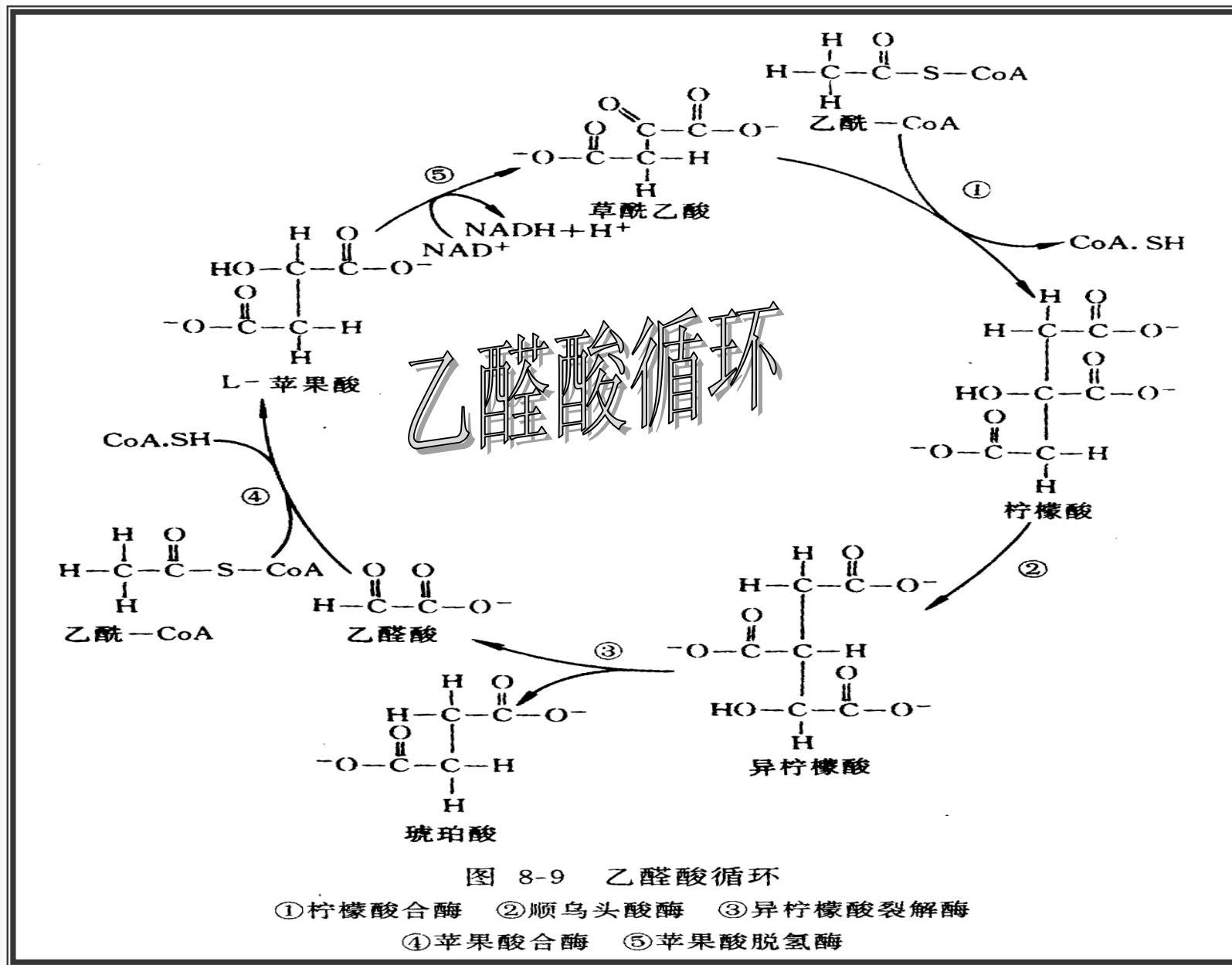
GAC: 在乙醛酸体中, 由脂肪酸氧化的乙酰CoA在一系列E的作用下转变为琥珀酸的过程。

在乙醛酸体中存在脂肪酸 β -氧化和乙醛酸循环全套E系。

GAC的两个关键E

{	异柠檬酸裂解E	E1
	苹果酸合成E	E2





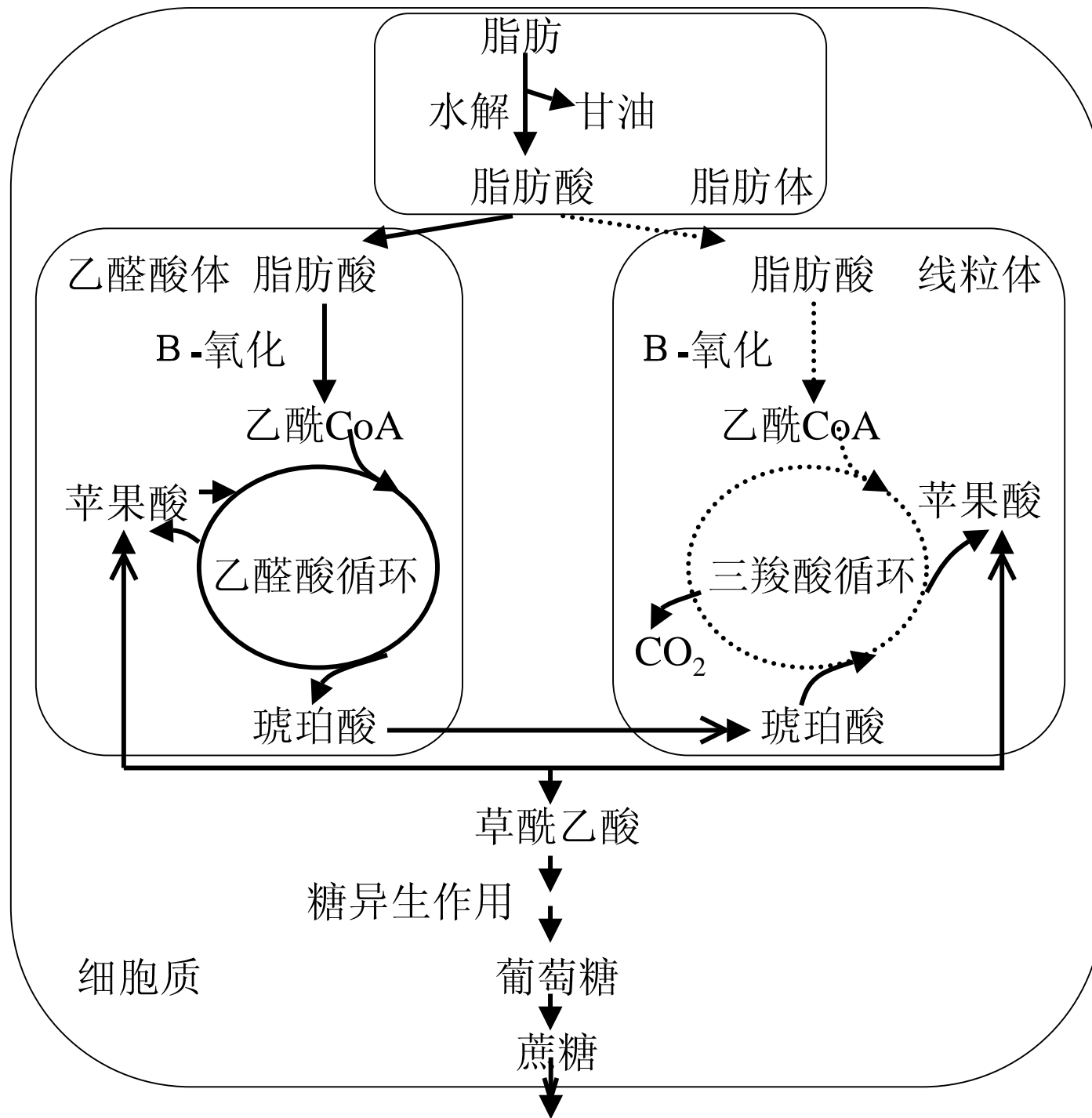
GAC的生物学意义:

A、植物、微生物通过GAC使脂肪异生为糖

B、GAC是TCA的一条支路，其产物琥珀酸可弥补四碳化合物的不足

3、合成脂肪酸

4、合成胆固醇



(二) α -氧化

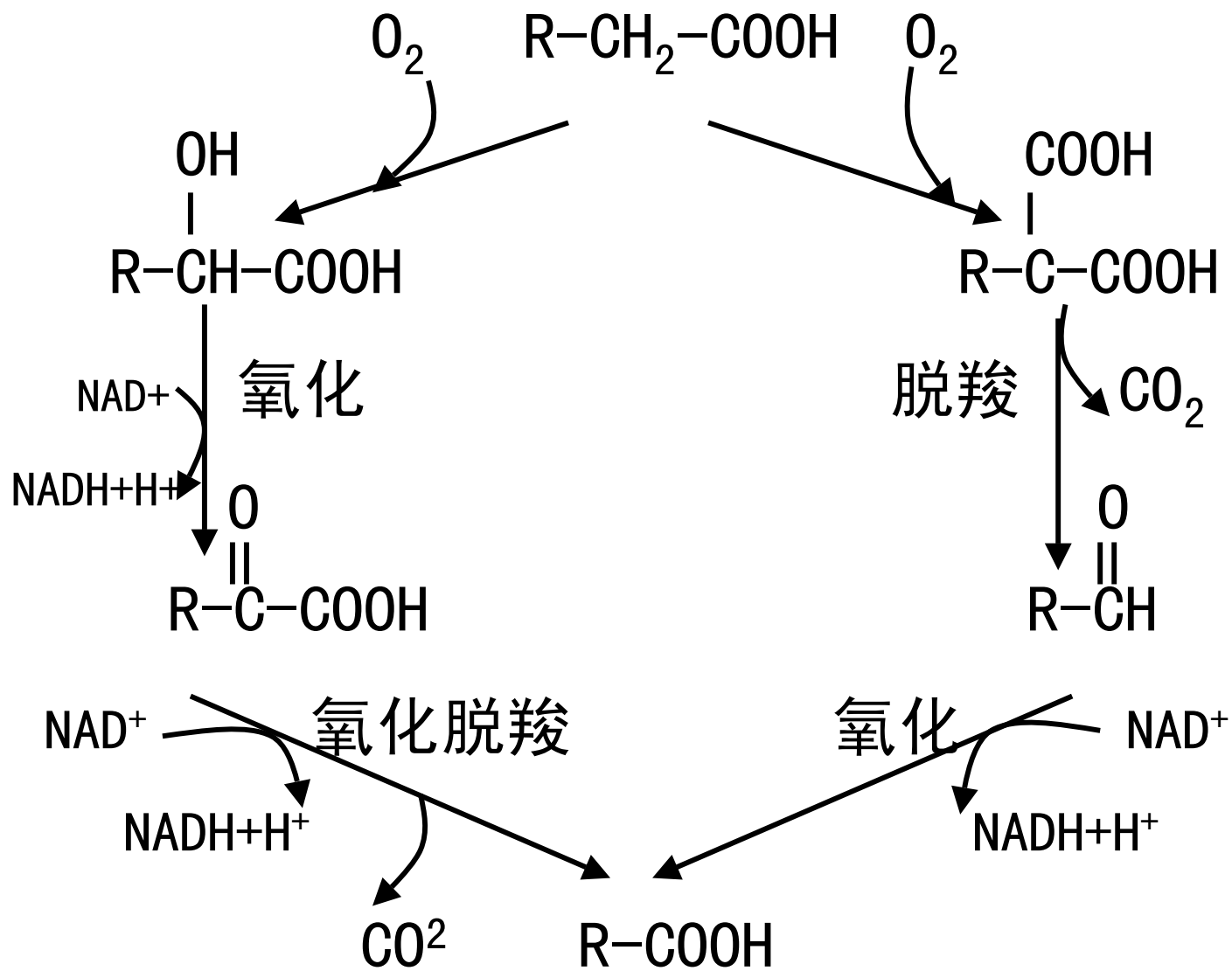
1、定义：氧化作用发生在脂肪酸的 α -碳原子上，其产物是 CO_2 和比原来少一个碳原子的脂肪酸。

2、意义：

(1) 使植物产生奇数脂肪酸。

(2) 降解含甲基的支链脂肪酸，或为 β -氧化消除底物障碍。

3、可能途径



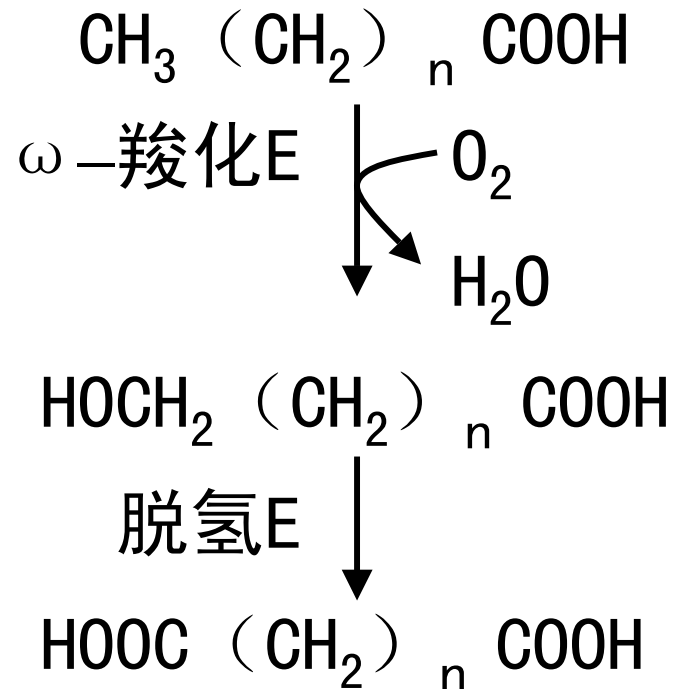
4、 α -氧化与 β -氧化的区别

区别	α -氧化	β -氧化
部位	细胞质	线粒体
底物	12-18C游离脂肪酸	脂酰CoA
氧化部位	α -碳原子	β -碳原子
氧化程度	不能使脂肪酸彻底氧化	能使脂肪酸彻底氧化
产物	奇数脂肪酸	CO_2 、 $\text{CH}_3\overset{\text{O}}{\parallel}\text{C}\sim\text{SCoA}$

(三) ω -氧化

ω -氧化：脂肪酸 ω 位的碳原子的氧化，其产物是 α, ω -二羧酸。

意义：形成 α, ω -二羧酸，两端同时进行 β -氧化。

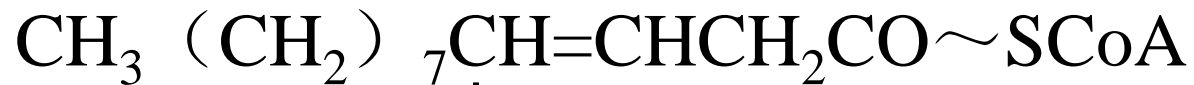


(四) 不饱和脂肪酸的氧化

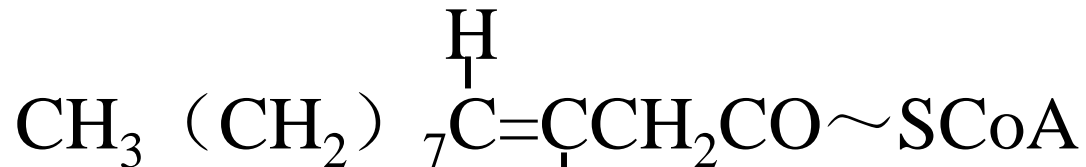
以油酸为例 (C₁₈) :



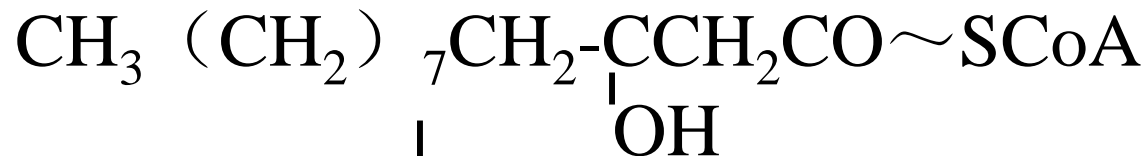
↓ 三次 β -氧化



↓ 烯酰CoA异构E



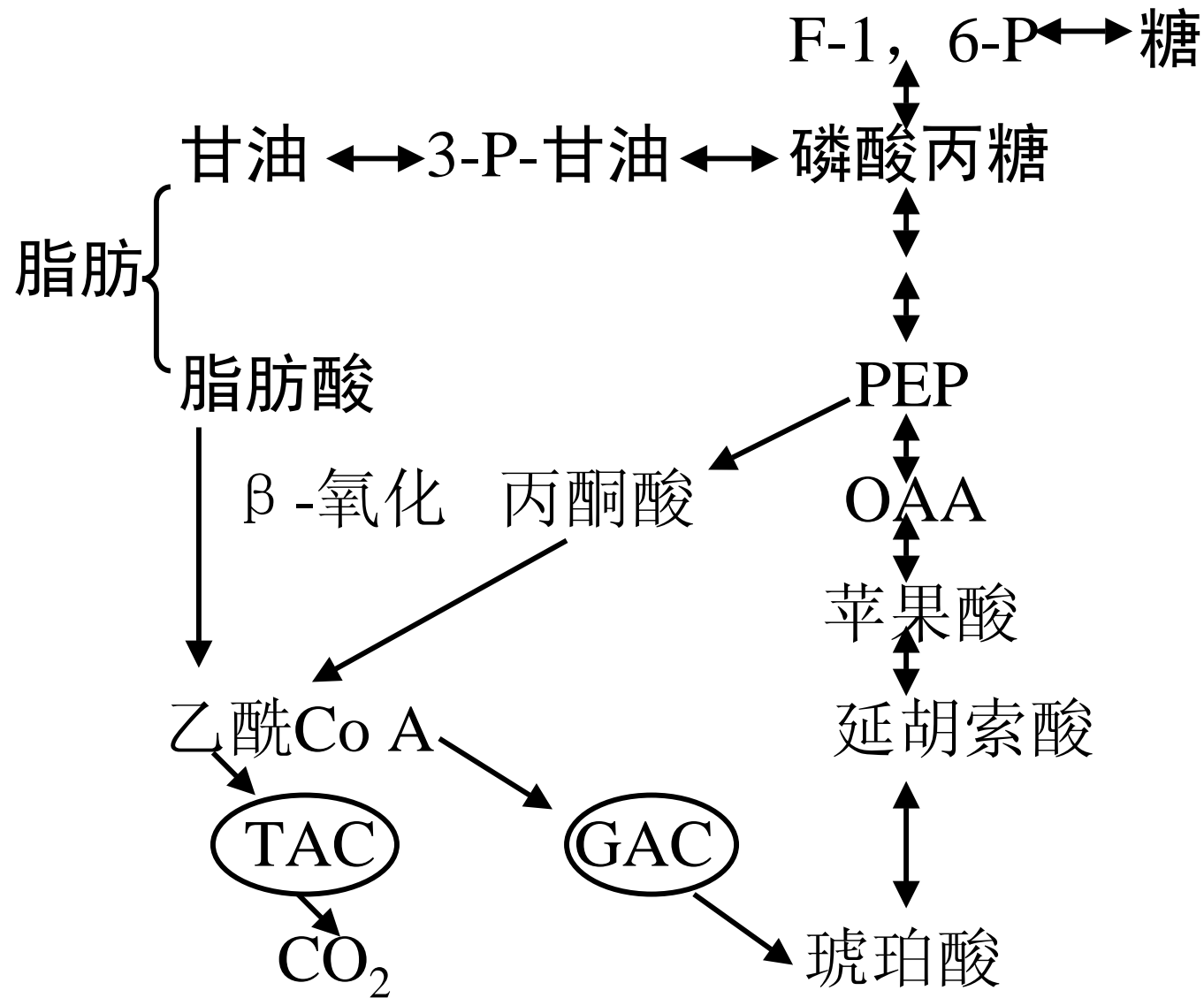
↓ 烯酰CoA水化E



↓ 五次 β -氧化

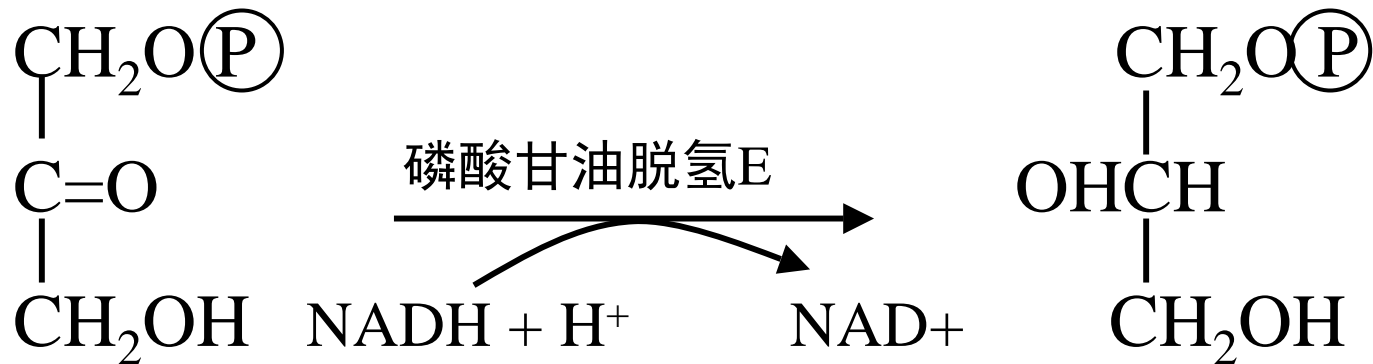
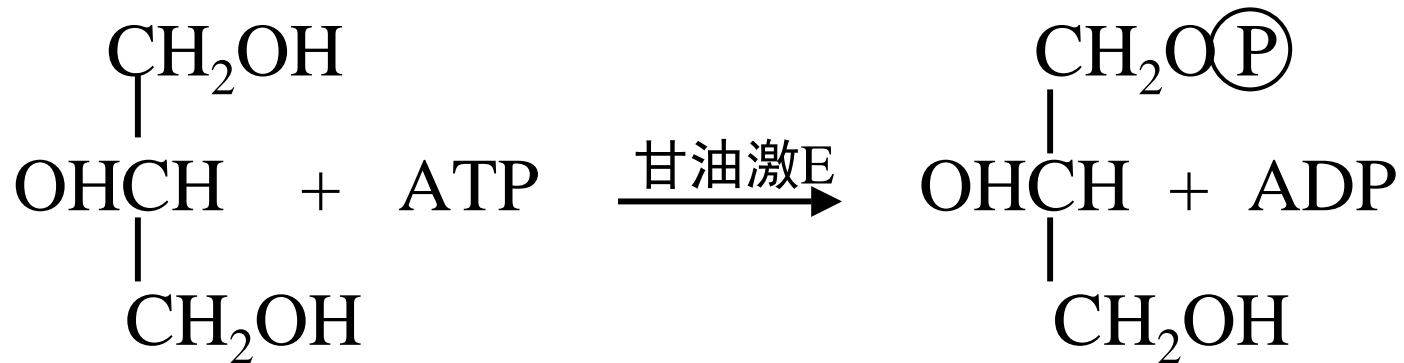


四、脂类代谢与糖类代谢的关系



第三节 脂肪的生物合成

一、磷酸甘油的生物合成



二、脂肪酸的生物合成

(一) 饱和脂肪酸的从头合成（主要途径）

部位：细胞质 合成16C以下的饱和脂肪酸

1、原料及其来源

{ 乙酰CoA
丙二酸单酰CoA：直接原料
NADPH：60%来自PPP途径

(1) 乙酰CoA

A、来源 { 丙酮酸的氧化脱羧
脂肪酸的 β -氧化
AA的氧化分解

B、转运

乙酰CoA的生成 $\xrightarrow{\text{柠檬酸穿梭系统}}$ 脂肪酸合成
(线粒体) (细胞质)

乙酰辅酶A的穿梭

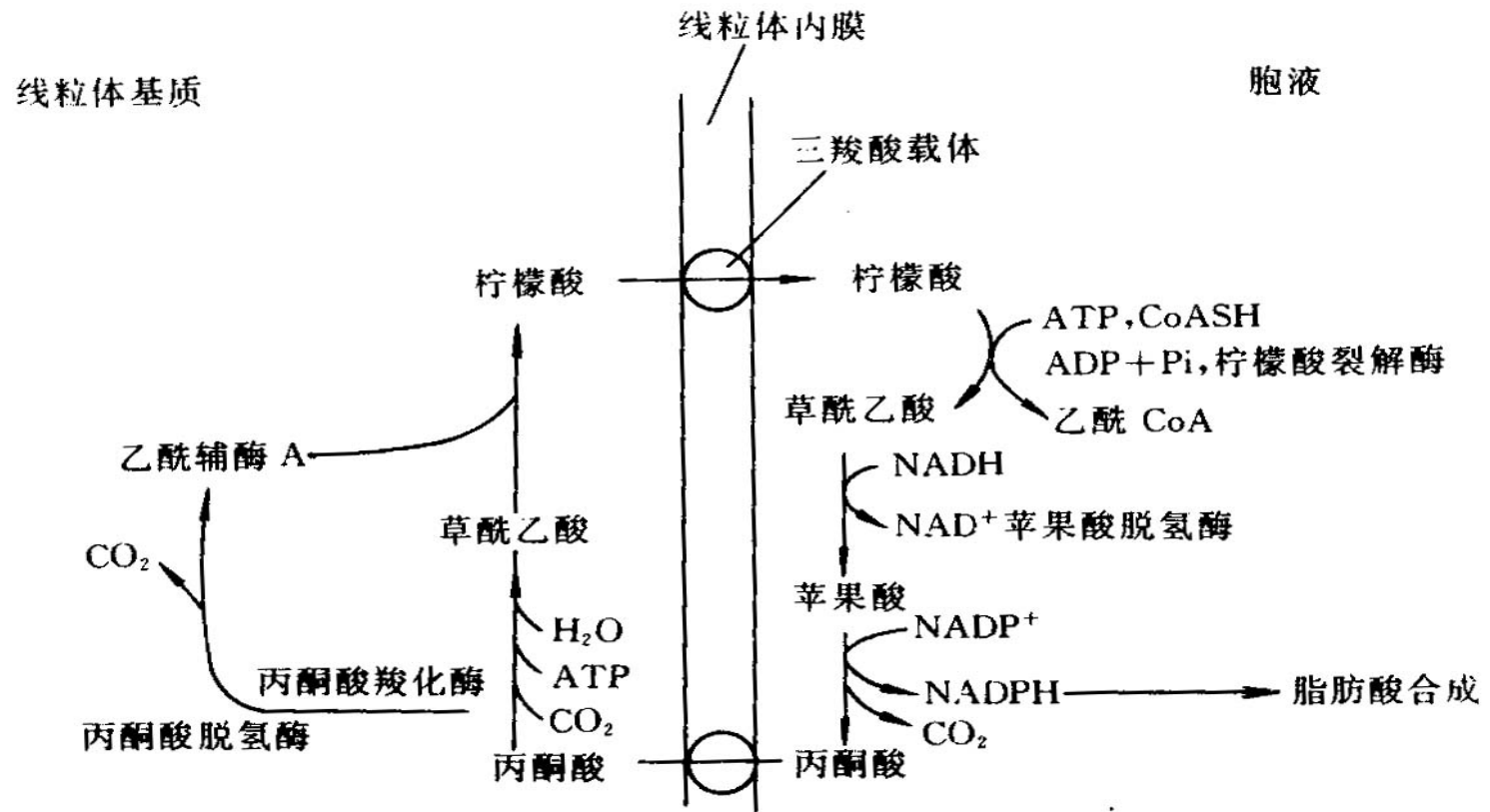


图 8-11 乙酰辅酶 A 从线粒体内至胞液的运送



细胞质 $\xrightarrow{\text{NADH}}$ 线粒体 : 线粒体穿梭

{ 磷酸甘油穿梭
苹果酸穿梭

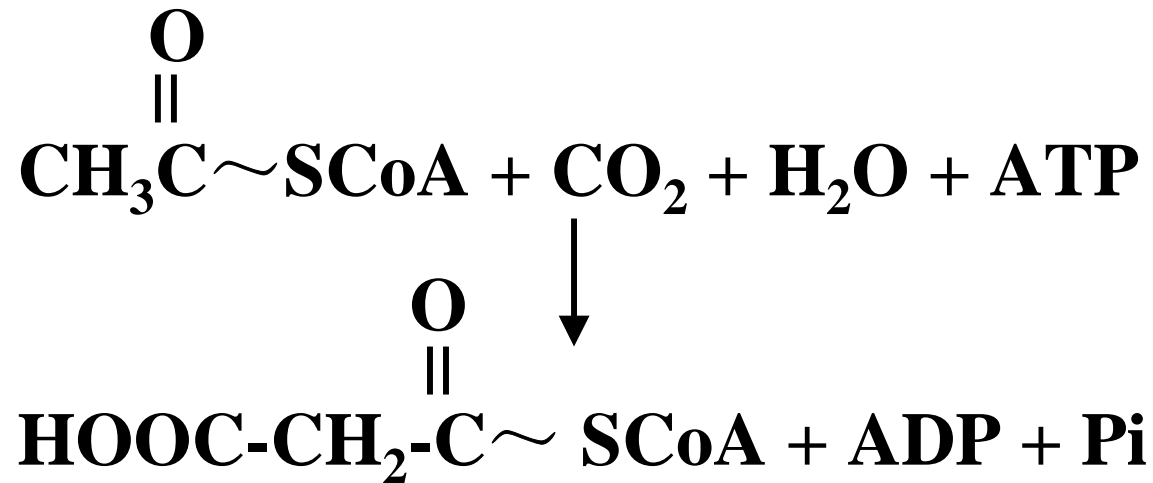
细胞质 $\xrightarrow{\text{脂酰CoA}}$ 线粒体 : 肉毒碱穿梭

线粒体 $\xrightarrow{\text{乙酰CoA}}$ 细胞质 : 柠檬酸穿梭

(2) 丙二酸单酰CoA的来源

乙酰CoA羧化E
辅基：生物素

生物素羧化E (BC)
生物素羧基载体蛋白
(BCCP)
羧基转移E



2、脂肪酸合成E系：6种E，1种载体蛋白

酰基载体蛋白： ACP

ACP-乙酰转移E： E1

ACP-丙二酸单酰转移E： E2

β -酮脂酰ACP合成E： E3

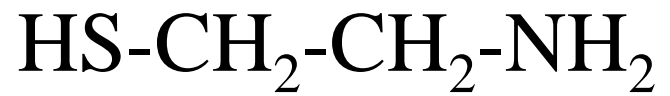
β -酮脂酰ACP还原E： E4

β -羟脂酰ACP脱水E： E5

烯脂酰ACP还原E： E6

半胱氨酸

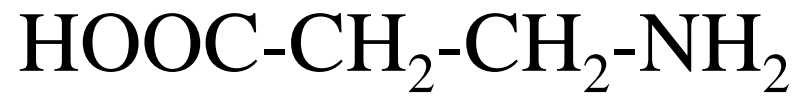
↓ 脱羧



β -巯基乙胺

天冬氨酸

↓ 脱羧

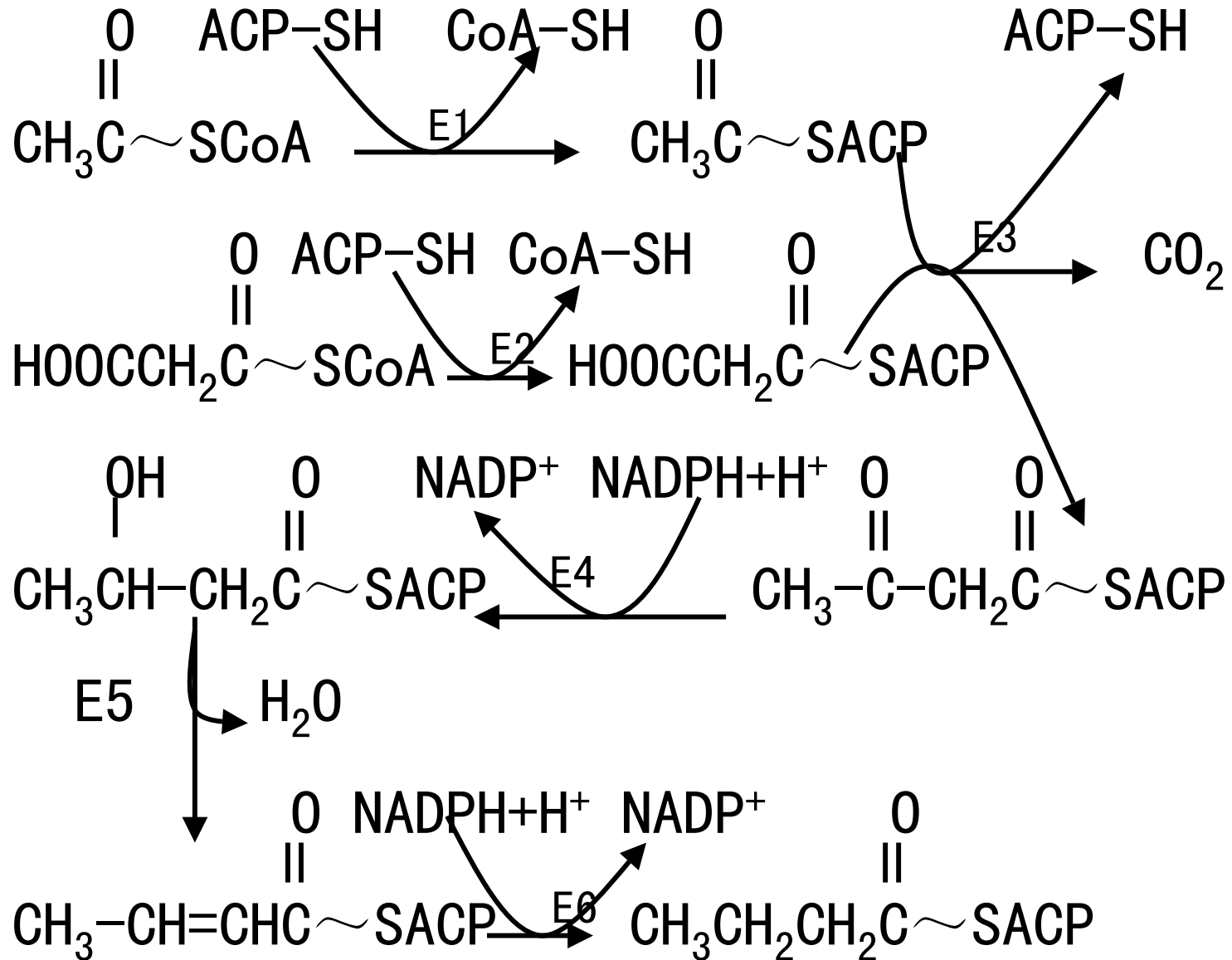


β -丙氨酸



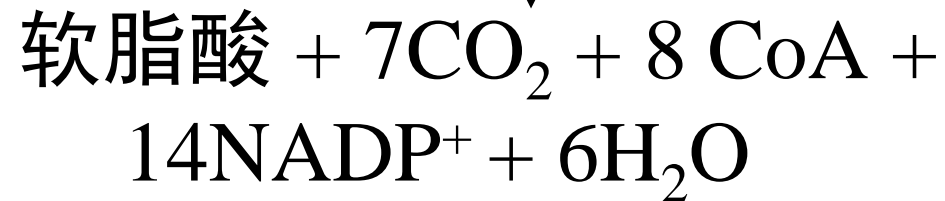
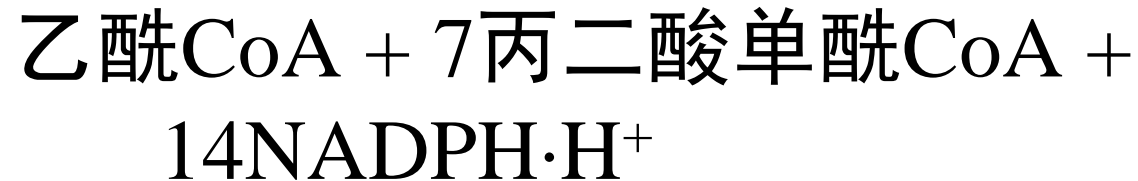
ACP、CoA的组分

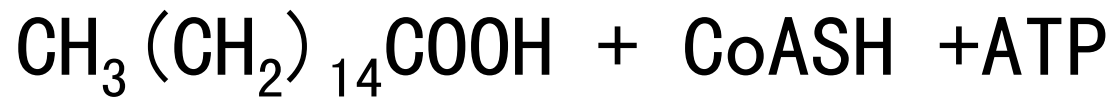
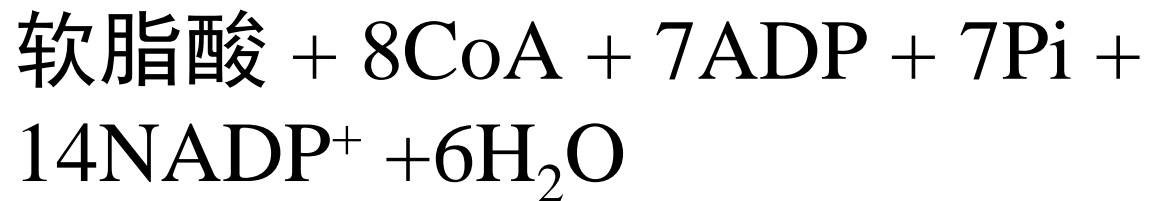
3、合成过程



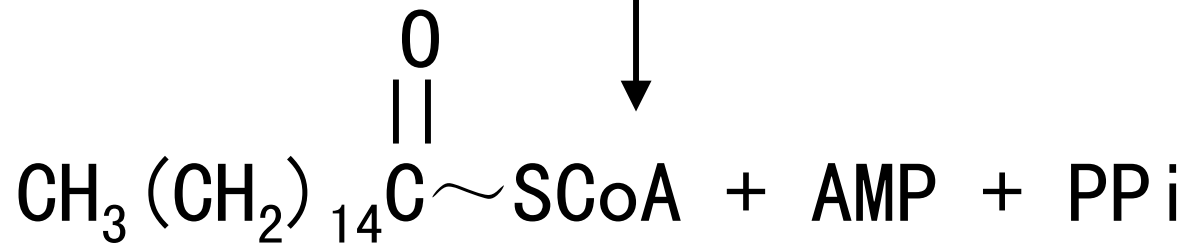
从乙酰CoA合成软脂酸的反应可分为两部分：

{ 形成7分子丙二酸单酰CoA
经7次循环形成软脂酸





脂酰CoA合成E





注意：乙酰CoA是脂肪酸合成的碳源；

NADPH是还原剂；

丙二酸单酰ACP是延长二碳单位的直接供体；

每增长一个二碳单位需2NADPH；

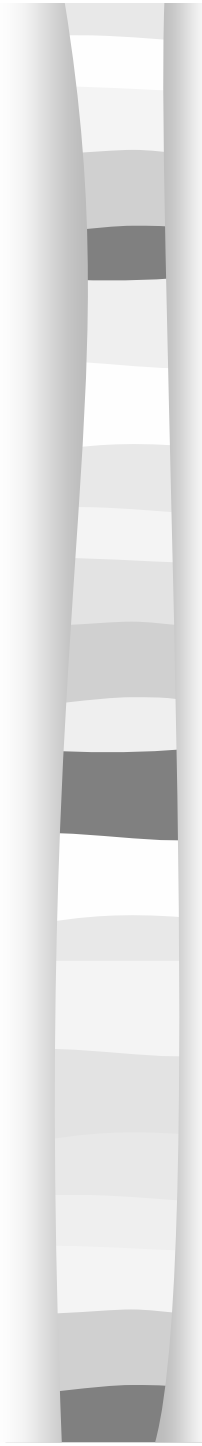
在线粒体中形成的乙酰CoA需柠檬酸携带进入细胞质。

4、脂肪酸的从头合成与 β -氧化的区别

区别点	从头合成	β -氧化
部位	细胞质	线粒体
脂酰基载体	ACP	CoA
2C单位的形式	丙二酸单酰CoA	乙酰CoA
电子供体/受体	NADPH	NAD ⁺ 、FAD
酶	7种	4种
能量	消耗7ATP, 14NADPH	产生129ATP
运载系统	柠檬酸穿梭	肉毒碱穿梭
反应方向	从 ω 位到羧基	从羧基端开始

(二) 饱和脂肪酸的延长

细胞内进行部位	动物		植物
	线粒体	内质网	叶绿体、前质体
加入的二碳单位	乙酰CoA	丙二酸单酰CoA	丙二酸单酰CoA
脂酰基的载体	CoA	CoA	ACP
电子供体	NADH、NADPH	NADPH	NADPH



在动物体中，发生在线粒体的延长过程相当于脂肪酸 β -氧化过程的逆转；

内质网上的延长过程与从头合成过程相似，只是脂酰基的载体为CoA而不是ACP。

植物体的脂肪酸延长系统有两个，叶绿体或前质体中的只负责将软脂酸转变为硬脂酸，这一过程类似于从头合成途径；碳链的进一步延长则由内质网上的延长系统完成。

(三) 不饱和脂肪酸的生物合成

1、需氧途径 真核生物

(1) 动物、真菌 去饱和酶与内质网结合，底物为硬脂酰CoA，产物是油酰CoA，还原剂是NADPH。

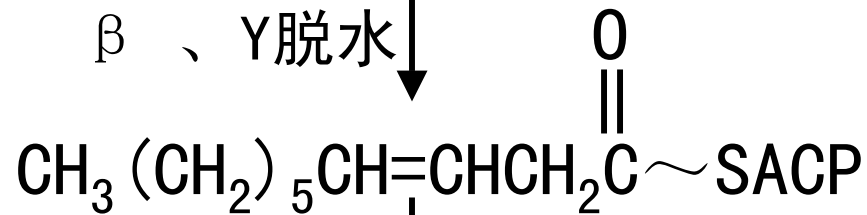
(2) 植物 去饱和酶存在于细胞质中，底物为硬脂酰ACP，产物是油酰ACP，还原剂是NADPH。

2、厌氧途径 原核生物

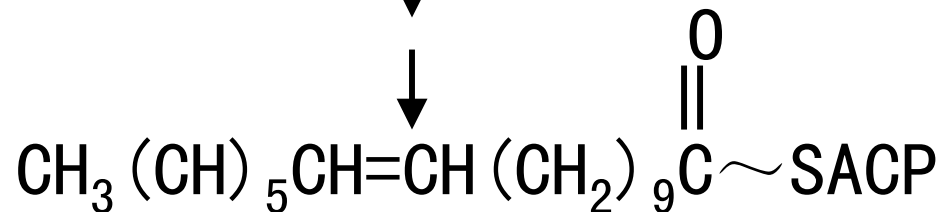
-----发生在从头合成的过程中



β、γ脱水 ↓



↓
C12烯脂酰ACP

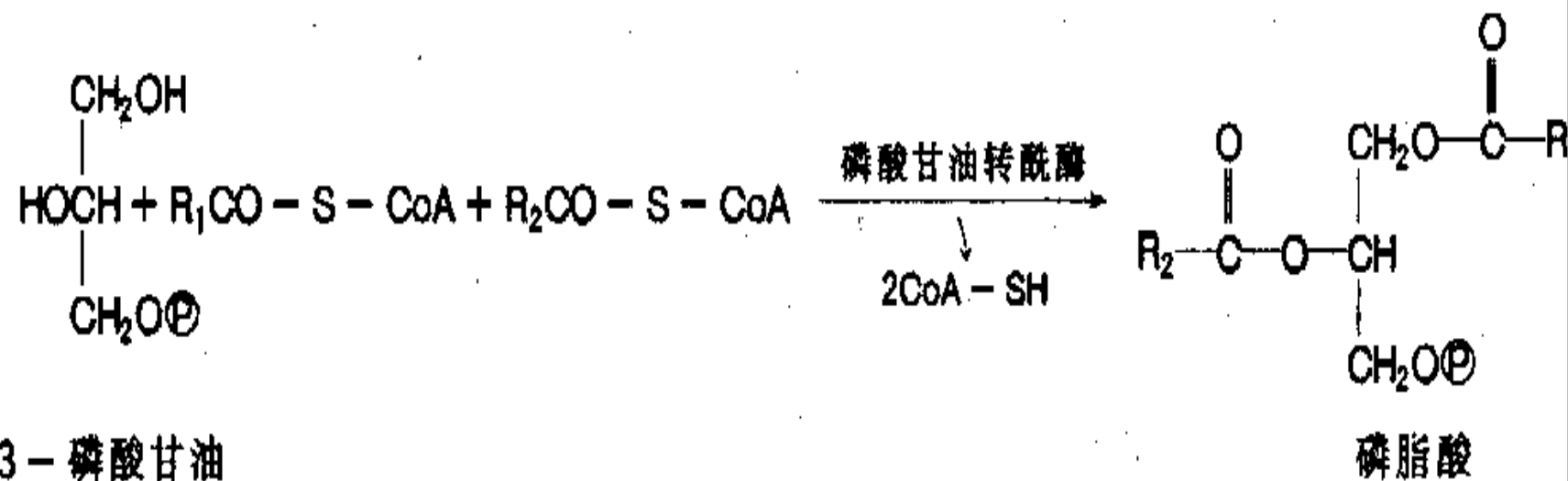


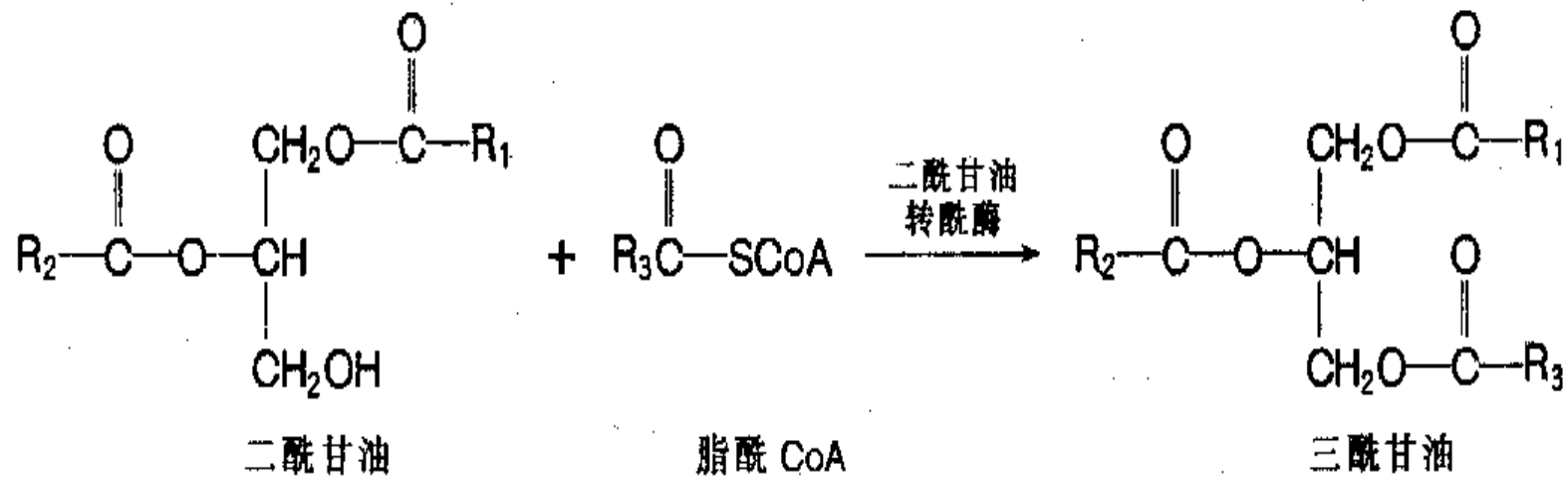
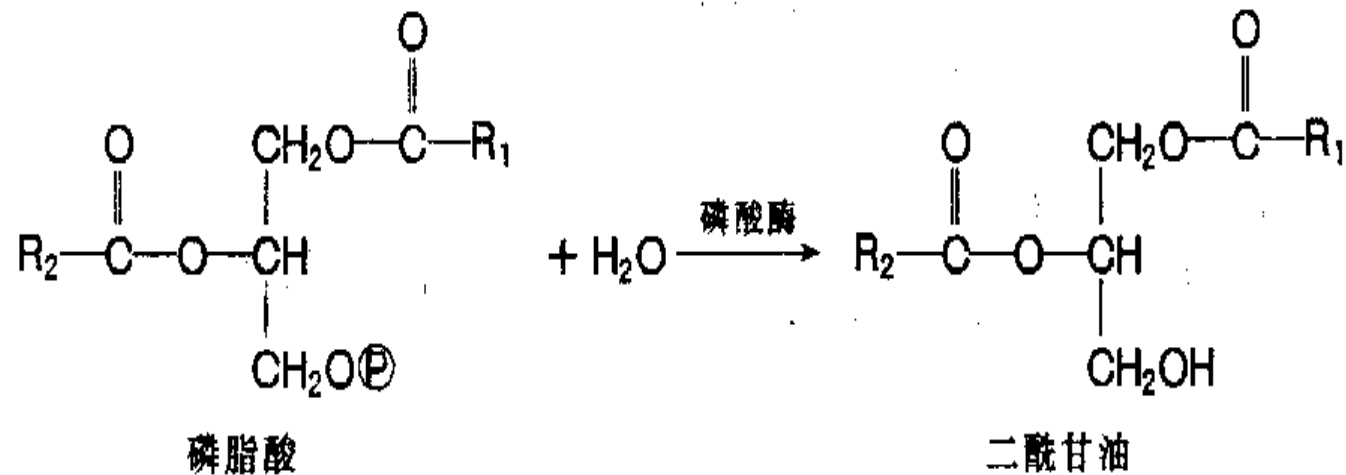
3、多烯脂肪酸的合成

所有生物都含有多烯脂肪酸，在高等动、植物中含量丰富。但动物中因缺乏在脂肪酸的第9位以上位置形成双键的去饱和E，不能合成亚油酸和亚麻酸，这两者必须由植物中获得，称必需脂肪酸。

植物体内的亚油酸和亚麻酸是由油酸经需氧去饱和作用形成，起作用的酶为专一的加氧酶系统。

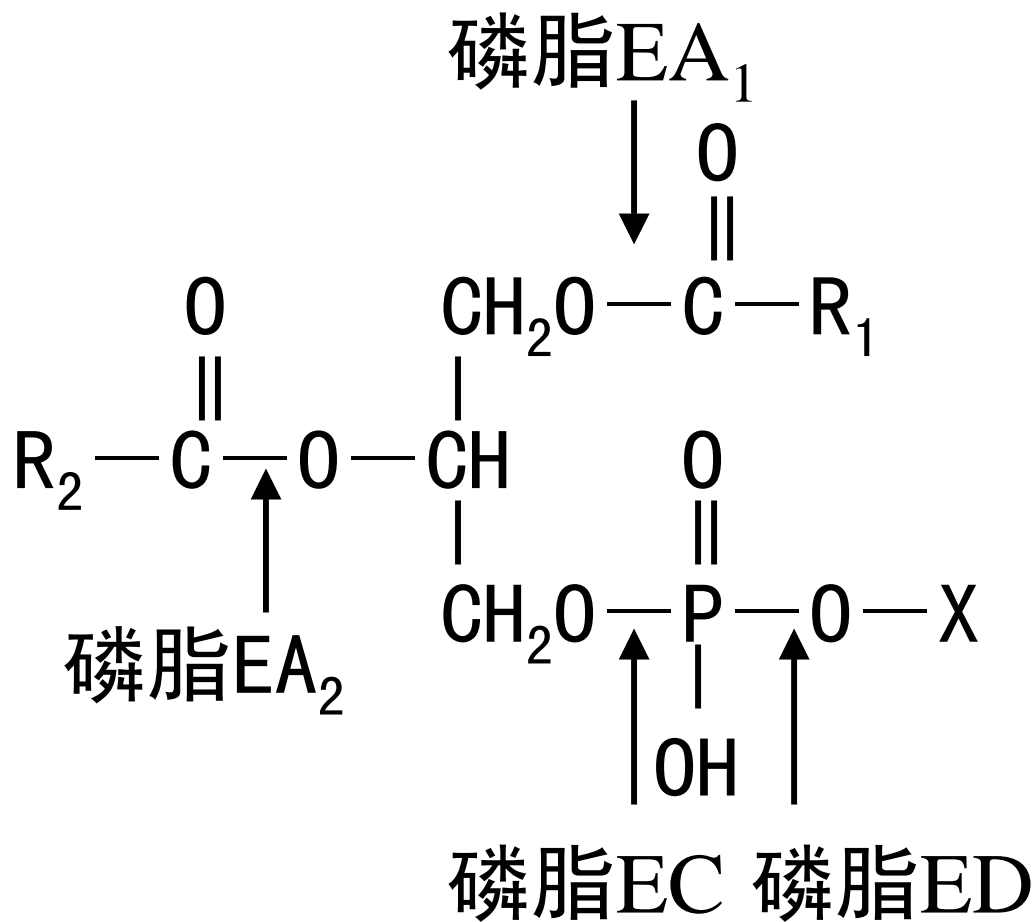
三、脂肪的生物合成

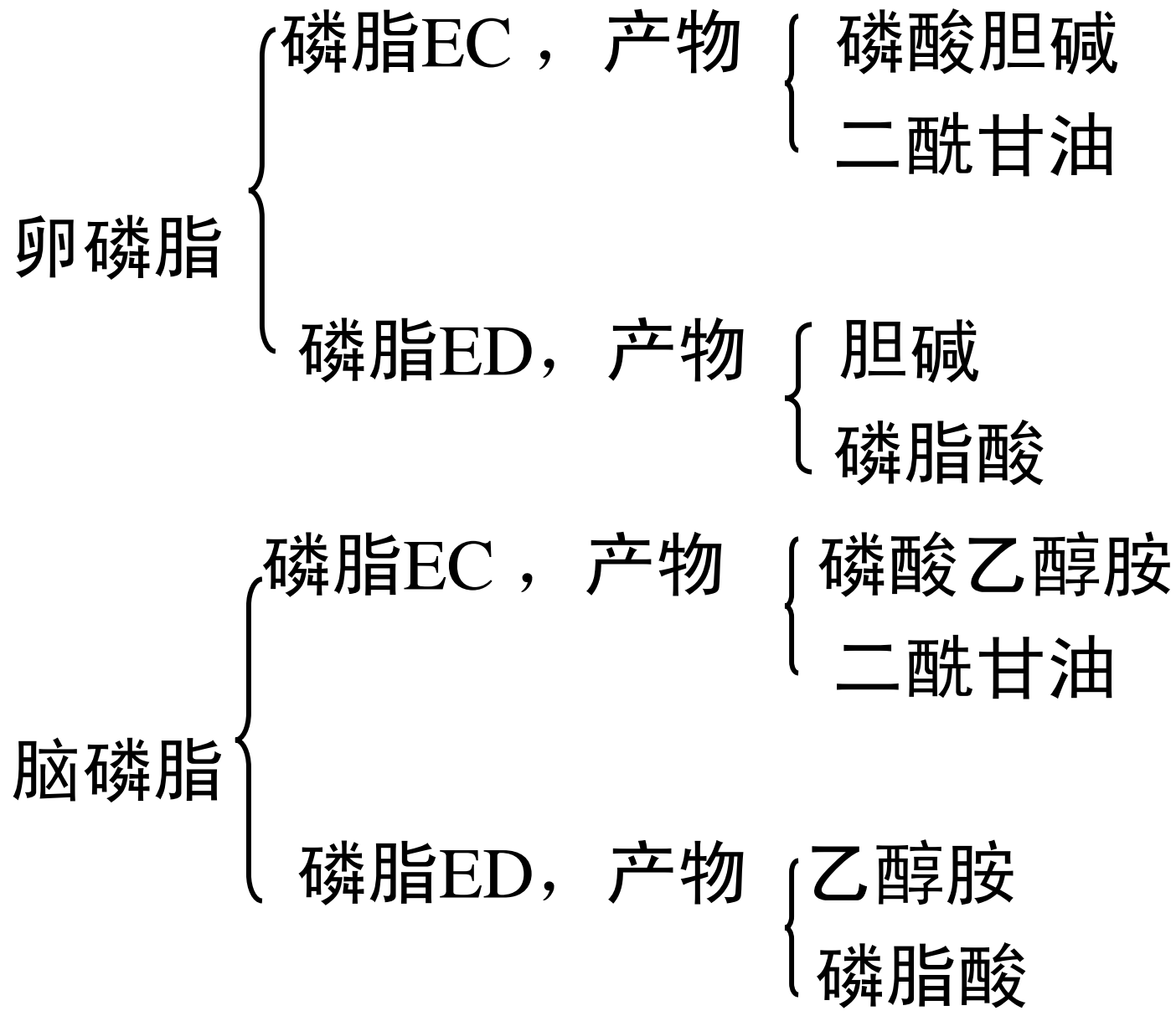
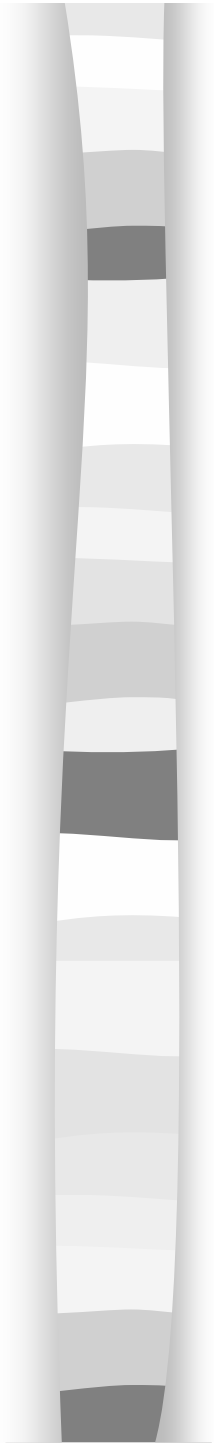




第四节 磷脂的代谢

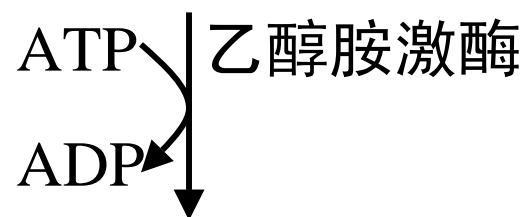
一、磷脂的分解



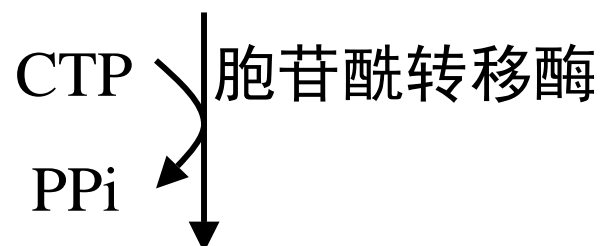


二、磷脂的合成——以脑磷脂为例

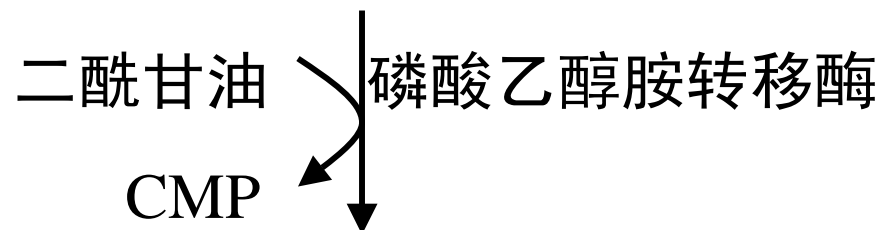
1、 $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$



$\text{P OCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$

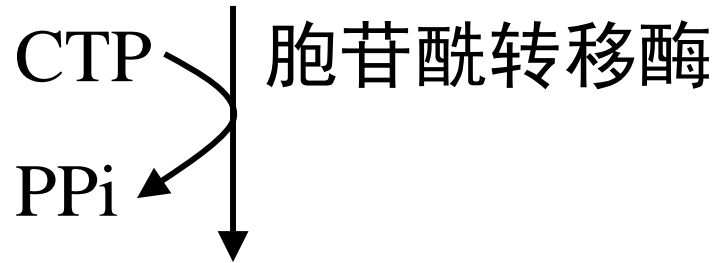


CDP-乙醇胺

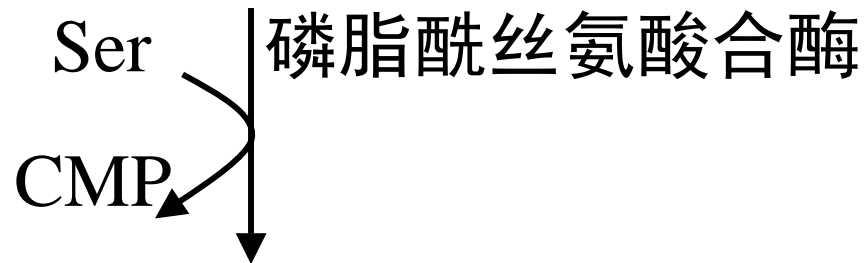


磷脂酰乙醇胺

2、磷脂酸



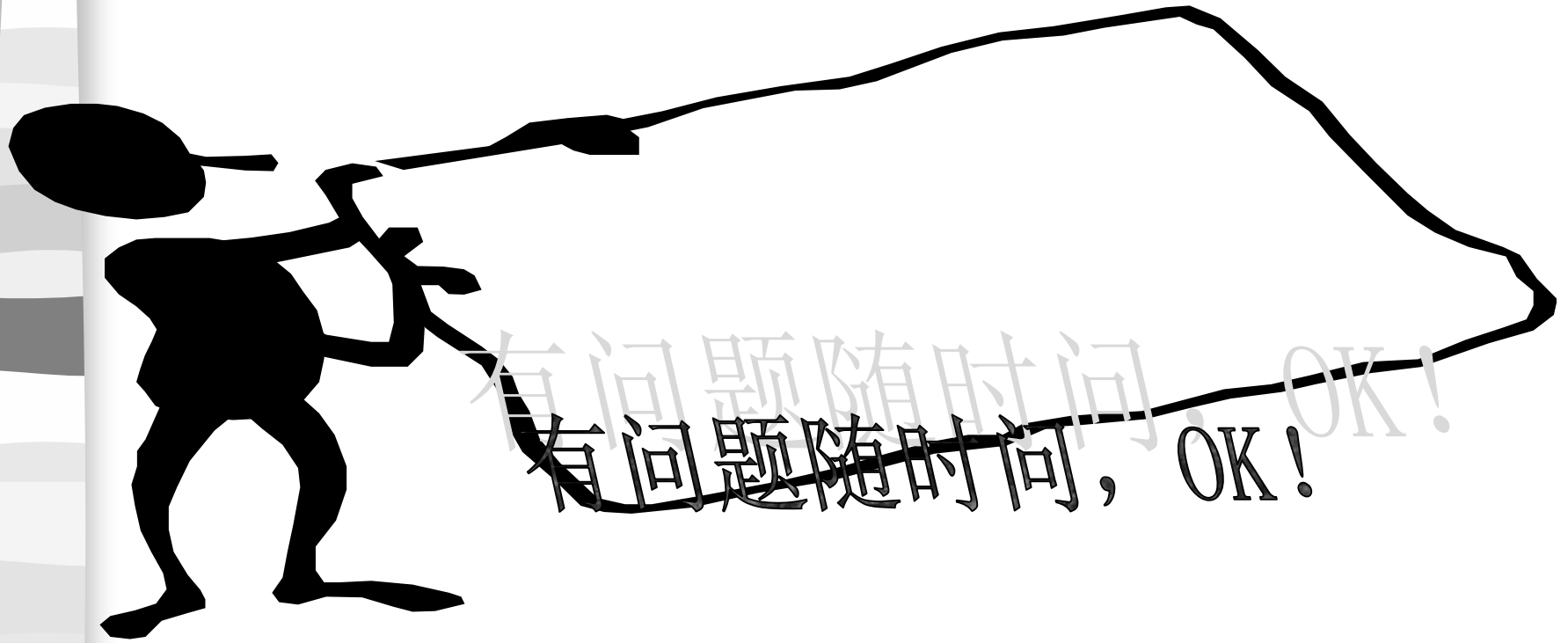
CDP-二酰甘油



磷脂酰丝氨酸

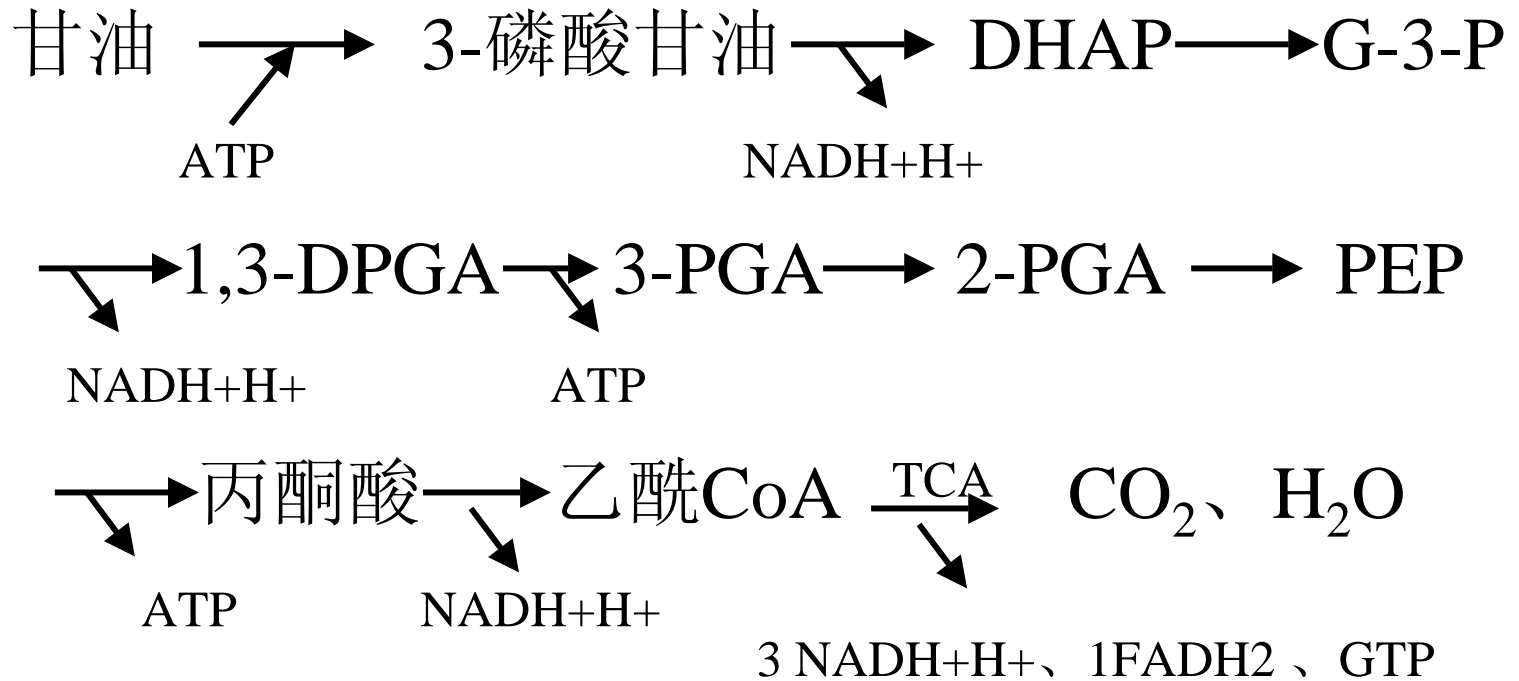


磷脂酰乙醇胺



有问题随时间，OK!
有问题随时间，OK!

1、甘油的彻底氧化分解：



ATP的生成： $3 \times 6 + 1 \times 2 + 3 - 1 = 22$

或： $2 \times 2 + 3 \times 4 + 1 \times 2 + 3 - 1 = 20$

2、思考题：

归纳总结并填下表：

脂肪酸	NADH	FADH ₂	ATP	O ₂
月桂酸	23	11	95	17
豆蔻酸	27	13	112	20
软脂酸	31	15	129	23
硬脂酸	35	17	146	26

公式：



公式: n: C-原子数

NADH

$$(n/2-1) + 3n/2 = 2n-1$$

FADH

$$(n/2-1) + n/2 = n-1$$

ATP

$$(n/2-1) \times 5 + n/2 \times 12 - 2 = 17n/2 - 7$$

O₂

$$[(2n-1) + (n-1)] / 2 = n3/2 - 1$$