

Chapter 7

氨基酸代谢

Amino Acids Metabolism

生化与分子生物学教研室

蚌埠医学院

Major Object

[教学时数] 6学时

[掌握内容]: 蛋白质的生理功能及营养价值。氨基酸脱氨基的主要方式: 转氨基作用, 氧化脱氨基作用, 联合脱氨基作用—转氨与氧化脱氨、嘌呤核苷酸循环。血氨的来源与去路, 氨的主要代谢去路-合成尿素: 鸟氨酸循环的酶促反应过程、尿素生成的意义。一碳单位的产生、形式、转运载体及生理意义。S-腺苷蛋氨酸循环的过程及生理意义。

[熟悉内容]: 氨基酸脱羧基方式生成的几种胺类物质: γ -氨基丁酸、组胺、牛磺酸、5-羟色胺的生理作用。氨基酸的代谢概况, 氨的转运。

[了解内容]: 尿素合成的调节, 高血氨和氨中毒。氨基酸的吸收, 蛋白质的腐败作用, 氨基酸碳骨架的代谢转变。

[自学内容]: 食物蛋白质消化。

概 论

- 蛋白质的营养作用
- 蛋白质的消化、吸收与腐败
- 氨基酸的一般代谢
- 氨的代谢
- 个别氨基酸的代谢

第一节 蛋白质的营养作用

一、蛋白质营养的重要性

1. 维持细胞、组织的生长、更新和修补

2. 参与多种重要的生理活动

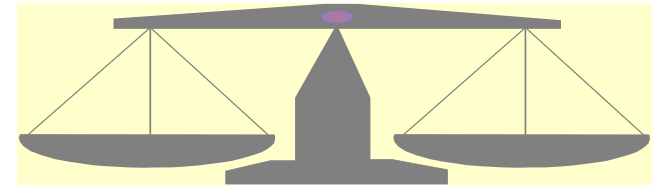
催化（酶）、免疫（抗原及抗体）、运动（肌肉）、物质转运（载体）、凝血（凝血系统）等。

3. 氧化供能

人体每日18%能量由蛋白质提供。

二、蛋白质需要量和营养价值

(一) 氮平衡(nitrogen balance)



摄入食物的含氮量与排泄物（尿与粪）中含氮量之间的关系。

氮总平衡：摄入氮 = 排出氮（正常成人）

氮正平衡：摄入氮 > 排出氮（儿童、孕妇等）

氮负平衡：摄入氮 < 排出氮（饥饿、消耗性疾病患者）

• 氮平衡的意义：可以反映体内蛋白质代谢的概况。

(二)生理需要量

成人每日最低蛋白质需要量为30~50g，我国营养学会推荐成人每日蛋白质需要量为**80g**。

(三)蛋白质的营养价值

1、必需氨基酸(essential amino acid)

指体内需要而又不能自身合成，必须由食物供给的氨基酸，共有8种：**Val、Ile、Leu、Phe、Met、Trp、Thr、Lys**。

携(Val)、**一**(Ile)、**两**(Leu)、**本**(Phe)、**淡**(Met)、**色**(Trp)、**书**(Thr)、**来**(Lys)

•其余12种氨基酸体内可以合成，称**非必需氨基酸**。

2、蛋白质的营养价值(nutrition value)

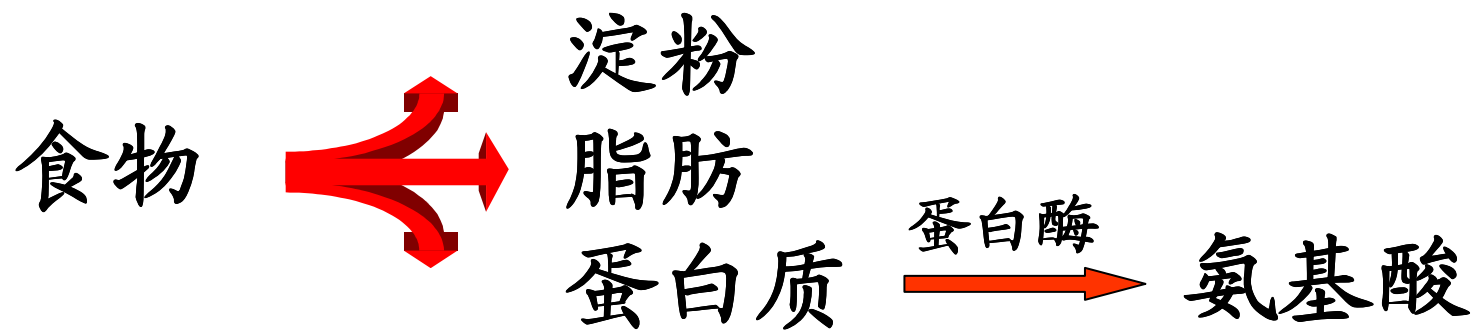
蛋白质的营养价值取决于必需氨基酸的数量、种类、量质比。

3、蛋白质的互补作用

将营养价值较低的蛋白质混合食用，其必需氨基酸可以互相补充而提高营养价值。

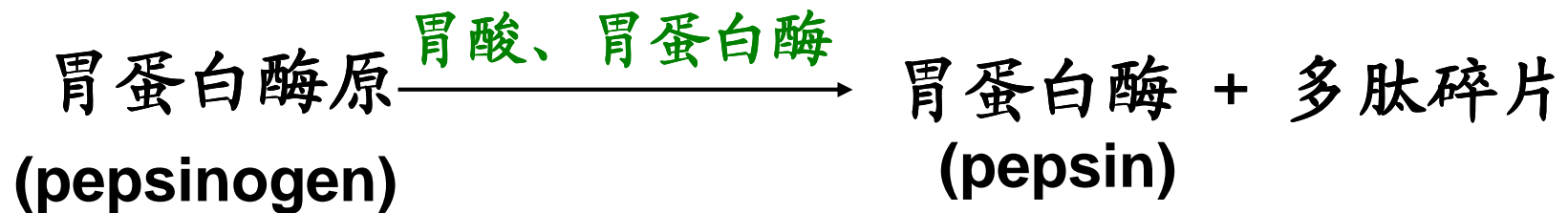
第二节 蛋白质的消化、吸收与腐败

一、蛋白质的消化



• 消化过程

(一) 胃中的消化作用



- 胃蛋白酶的最适pH为1.5 ~ 2.5，对蛋白质肽键作用特异性差，产物主要为多肽及少量氨基酸。

(二) 小肠中的消化

——小肠是蛋白质消化的主要部位

1. 胰酶及其作用

胰酶是消化蛋白质的主要酶，最适pH为7.0左右，包括内肽酶和外肽酶。

- 内肽酶(endopeptidase)

水解蛋白质肽链内部的一些肽键，如胰蛋白酶、糜蛋白酶、弹性蛋白酶。

- 外肽酶(exopeptidase)

自肽链的末段开始每次水解一个氨基酸残基，如羧基肽酶(A、B)、氨基肽酶。

肠液中酶原的激活

胰蛋白酶原

糜蛋白酶原

羧基肽酶原

弹性蛋白酶原

肠激酶(enterokinase)

胰蛋白酶

糜蛋白酶

羧基肽酶

弹性蛋白酶

(trypsin) (exopeptidase)

(carboxypeptidase)

(elastase)

酶原激活的意义

- 可保护胰组织免受蛋白酶的自身消化作用。
- 保证酶在其特定的部位和环境发挥催化作用。
- 酶原还可视为酶的贮存形式。

二、氨基酸的吸收

- 吸收部位：主要在小肠
- 吸收形式：氨基酸、寡肽、二肽
- 吸收机制：耗能的主动吸收过程

(一) 氨基酸吸收载体

存在于小肠粘膜细胞、肾小管细胞、肌细胞

载体蛋白与氨基酸、 Na^+ 组成三联体，
由ATP供能将氨基酸、 Na^+ 转入细胞内，
 Na^+ 再由钠泵排出细胞。

载体类型 { 中性氨基酸载体(主要、快速)
碱性氨基酸载体
酸性氨基酸载体
亚氨基酸与甘氨酸载体

同一载体上不同氨基酸之间有竞争

(二) γ -谷氨酰基循环对氨基酸的转运 (γ - glutamyl cycle)

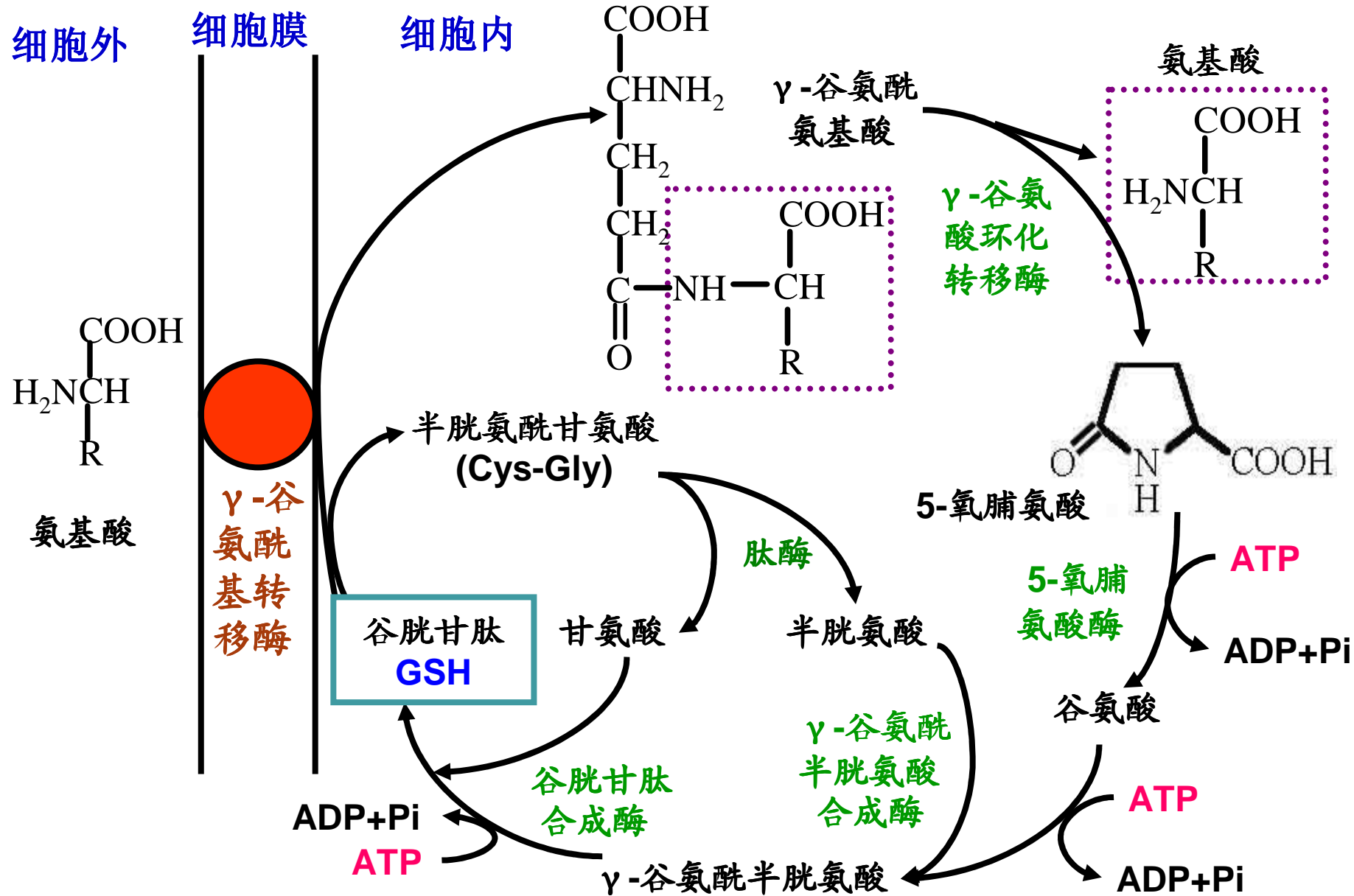
通过GSH的代谢作用将氨基酸吸收和转运的过程

❖ 过程

(1) 谷胱甘肽转运氨基酸

(2) 谷胱甘肽的再合成

} 循环



γ -谷氨酰基循环

❖ 小结

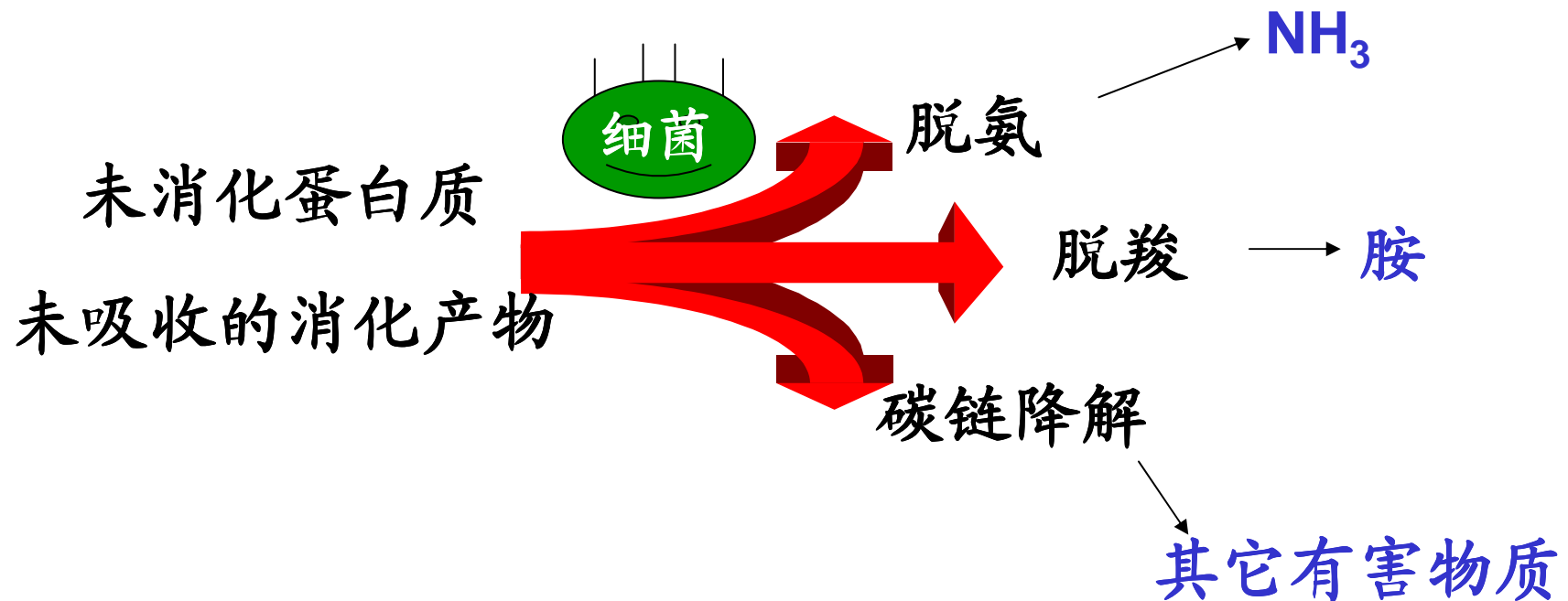
- (1) γ -GT (γ -谷氨酰基转移酶) 位于细胞膜上, 其余酶均在胞液中。
- (2) 小肠粘膜、肾小管细胞、脑组织均可进行。
- (3) 通过GSH (谷胱甘肽) 起作用。
- (4) 每转运1分子氨基酸, 消耗3ATP。

(三) 肽的吸收

- 利用肠粘膜细胞上的二肽或三肽的转运体系
- 此种转运也是耗能的主动吸收过程
- 吸收作用在小肠近端较强，先于氨基酸

三、蛋白质的腐败作用（putrefaction）

➤ **概念：** 肠道细菌对未被消化的蛋白质及未被吸收的消化产物进行的代谢过程。



(一) 胺类(amines)的生成

蛋白质 $\xrightarrow{\text{蛋白酶}}$ 氨基酸 $\xrightarrow{\text{脱羧基作用}}$ 胺类

组氨酸 \longrightarrow 组胺

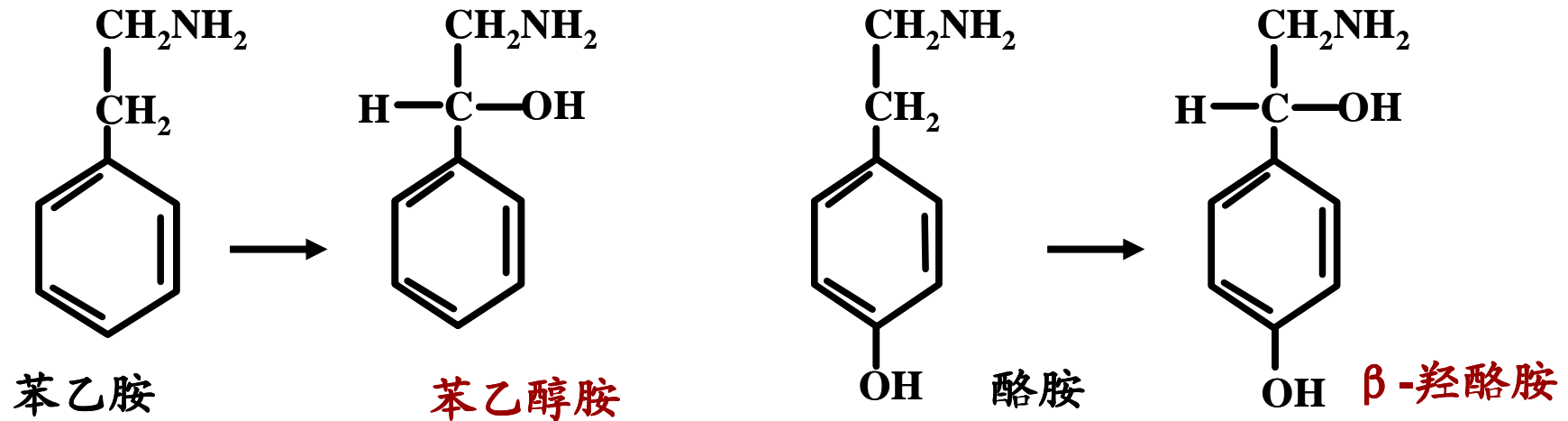
色氨酸 \longrightarrow 色胺

酪氨酸 \longrightarrow 酪胺

赖氨酸 \longrightarrow 尸胺

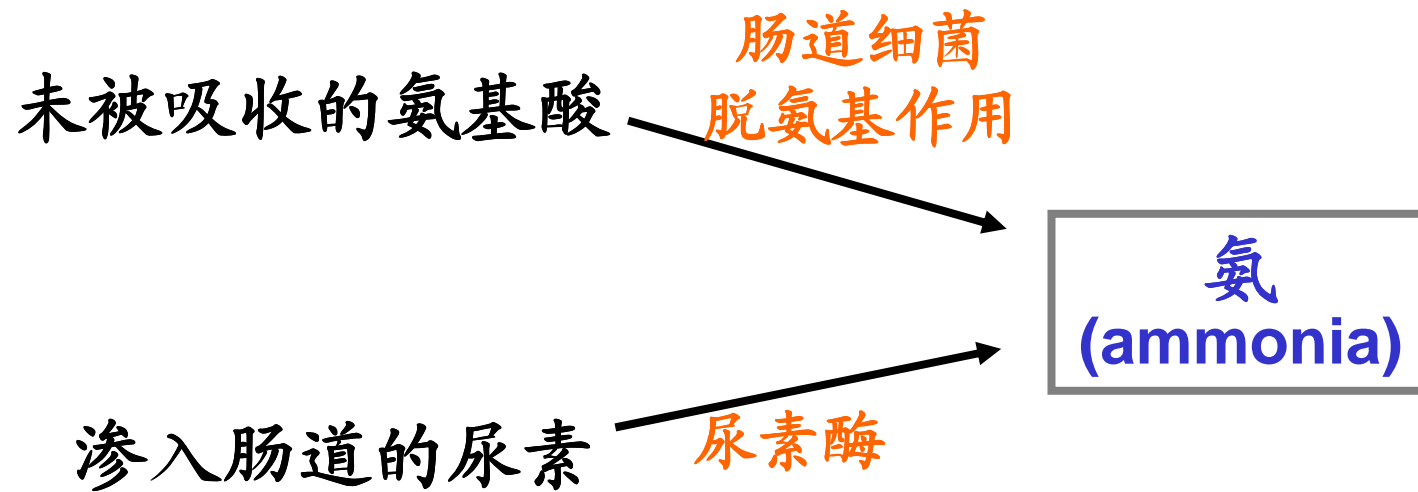
- 假神经递质(false neurotransmitter)

某些物质结构与神经递质结构相似，可取代正常神经递质从而影响脑功能，称假神经递质。



- β-羟酪胺和苯乙醇胺结构类似儿茶酚胺，它们可取代儿茶酚胺与脑细胞结合，但不能传递神经冲动，使大脑发生异常抑制。

(二) 氨的生成



- 降低肠道pH， NH_3 转变为 NH_4^+ 以铵盐形式排出，可减少氨的吸收，这是酸性灌肠的依据。

(三) 其它有害物质的生成

酪氨酸 → 苯酚

半胱氨酸 → 硫化氢

色氨酸 → 吲哚

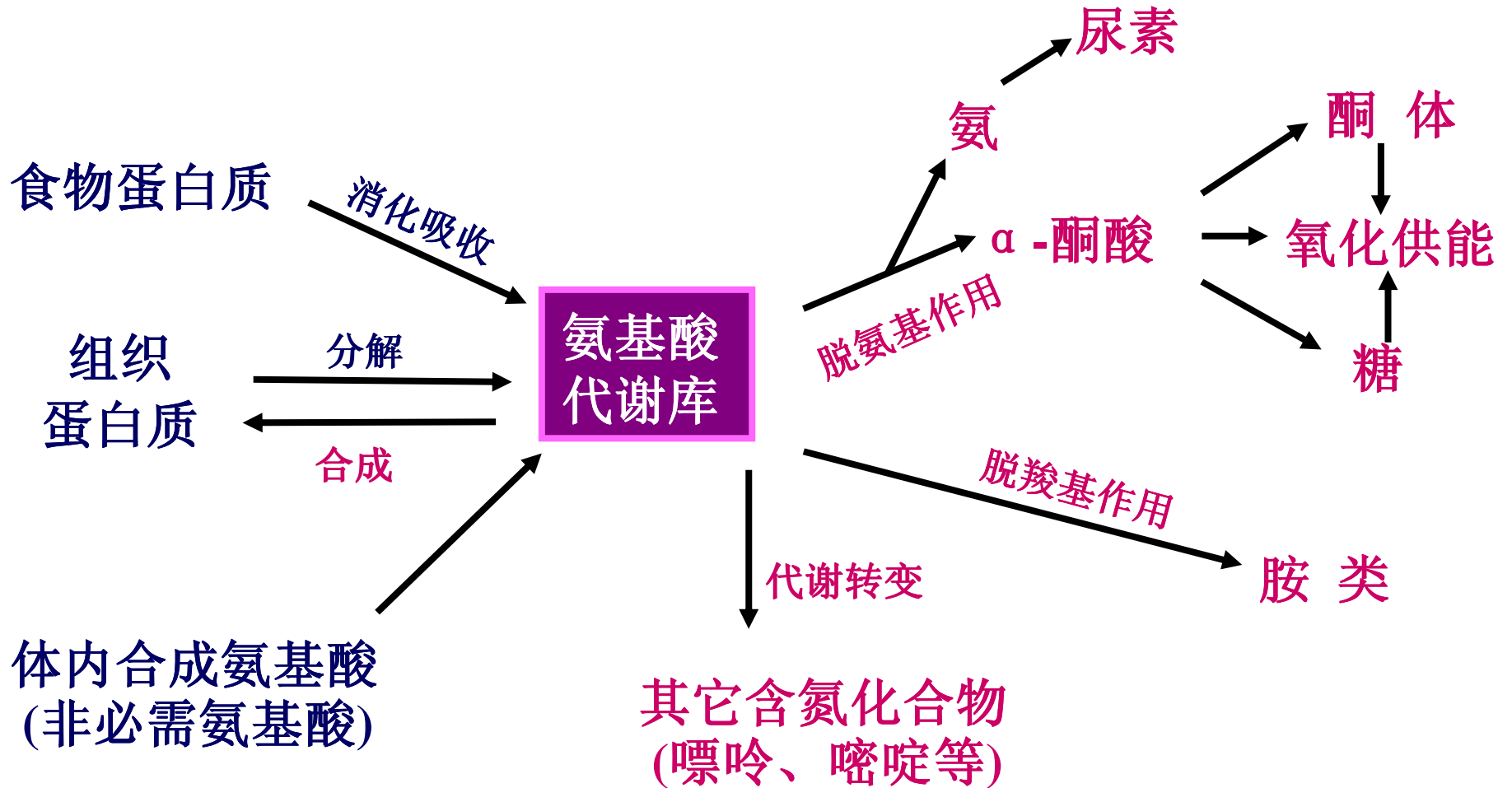
- 大部分排泄
 - 少量重吸收 → 由肝转化解毒

第三节 氨基酸的一般代谢

● 氨基酸代谢库 (metabolic pool)

食物蛋白经消化吸收的氨基酸（外源性氨基酸）与体内组织蛋白降解产生的氨基酸（内源性氨基酸）混在一起，分布于体内各处参与代谢，称为氨基酸代谢库。

氨基酸代谢概况



一. 氨基酸的脱氨基作用

定义 指氨基酸脱去氨基生成相应 α -酮酸的过程

- 最主要的反应

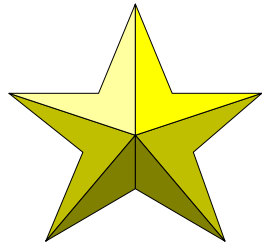
- 存在于大多数组织中

- 有四种方式：氧化脱氨基

- 转氨基

- 联合脱氨基（为主）

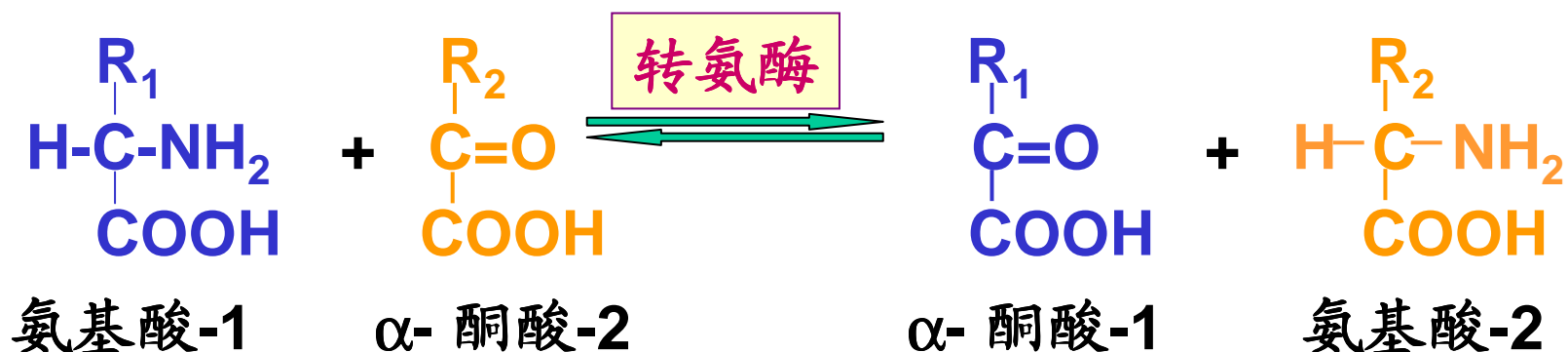
- 非氧化脱氨基



(一) 转氨基作用 (transamination)

1、定义：在转氨酶(transaminase)的作用下，某一氨基酸去掉 α -氨基生成相应的 α -酮酸，而另一种 α -酮酸得到此氨基生成相应的氨基酸的过程。

转氨过程如下：

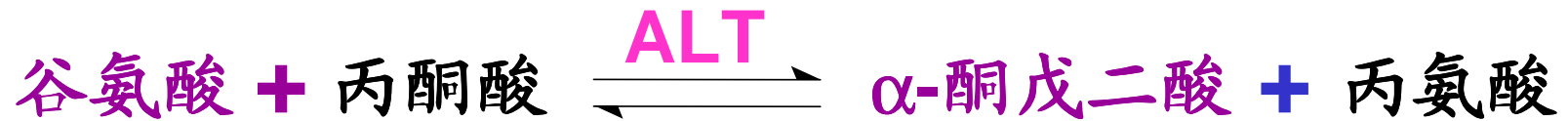


Lys、Pro、羟脯氨酸不参与此反应

2、转氨酶及辅酶

转氨酶的辅酶是磷酸吡哆醛

体内存在多种转氨酶，以L-谷氨酸与 α -酮酸的转氨酶最为重要。如：谷丙转氨酶（GPT，又称ALT，丙氨酸氨基转移酶）和谷草转氨酶（GOT，又称AST，天冬氨酸氨基转移酶）



临床意义：ALT在肝组织含量高，急性肝炎患者血清ALT升高



临床意义：AST在心肌组织含量较高，心肌梗患者血清AST可升高

3、特点

*只有氨基的转移，没有游离氨的生成

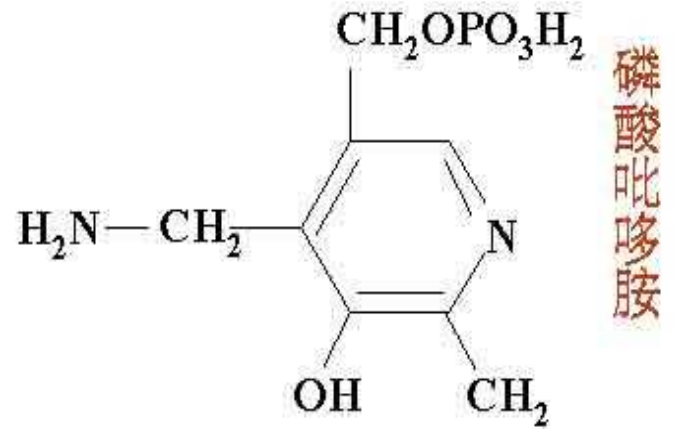
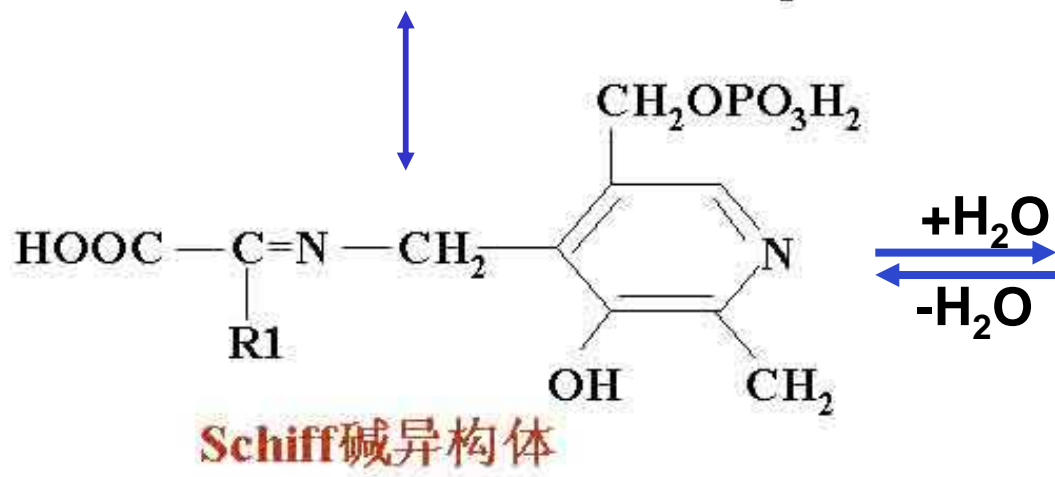
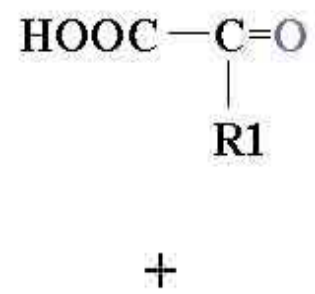
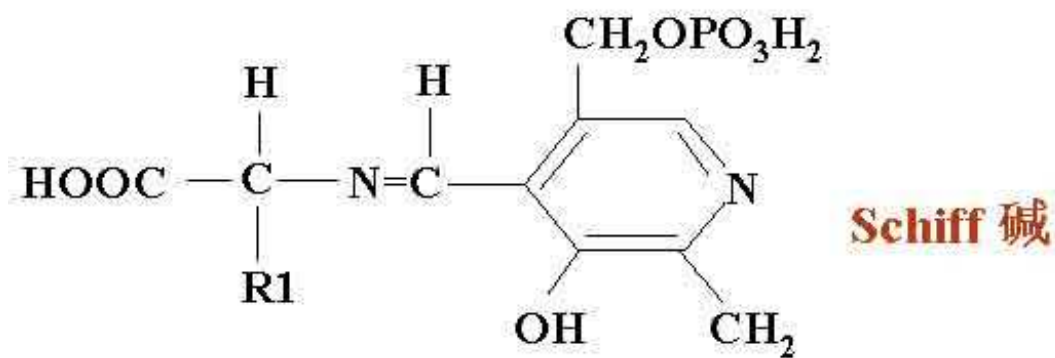
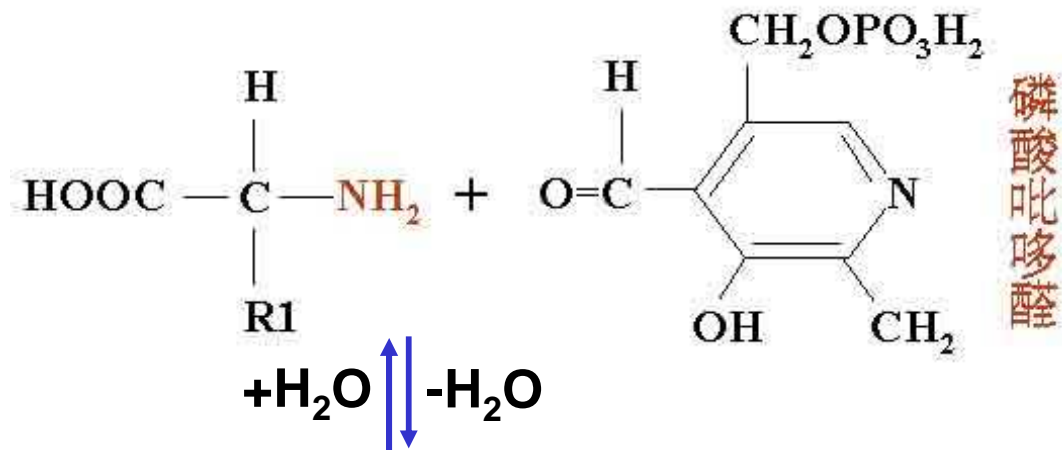
*催化的反应可逆

4、生理意义

是体内合成非必氨基酸的重要途径

接受氨基的
主要 α -酮酸

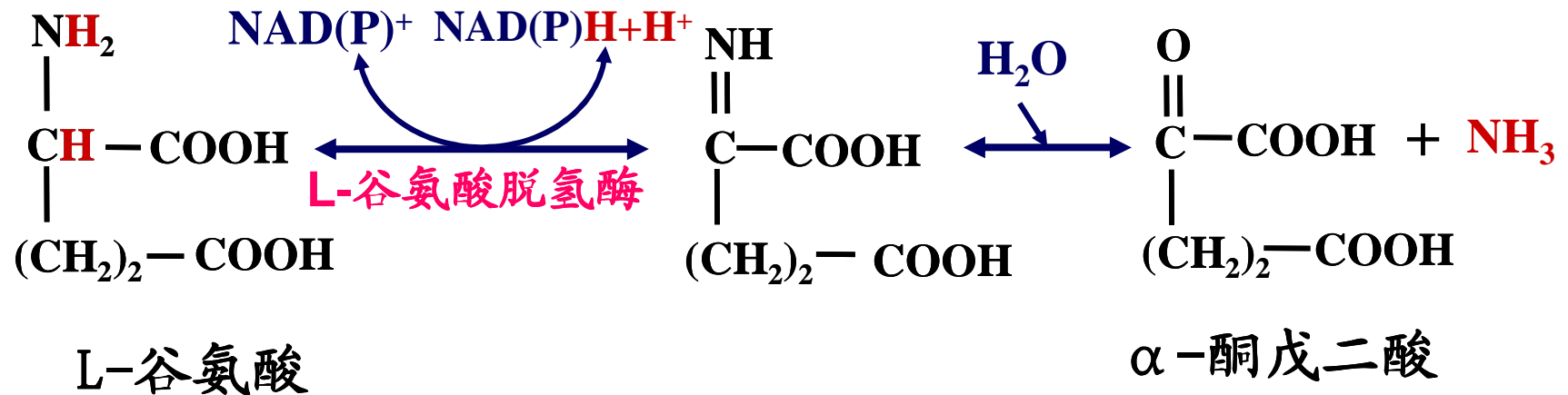
{ α -酮戊二酸
草酰乙酸
丙酮酸



(二) 氧化脱氨基作用 (oxidative deamination)

➤ **定义** 氨基酸在酶的催化作用下，进行伴有氧化的脱氨反应，称为氧化脱氨基作用。

➤ **作用过程**



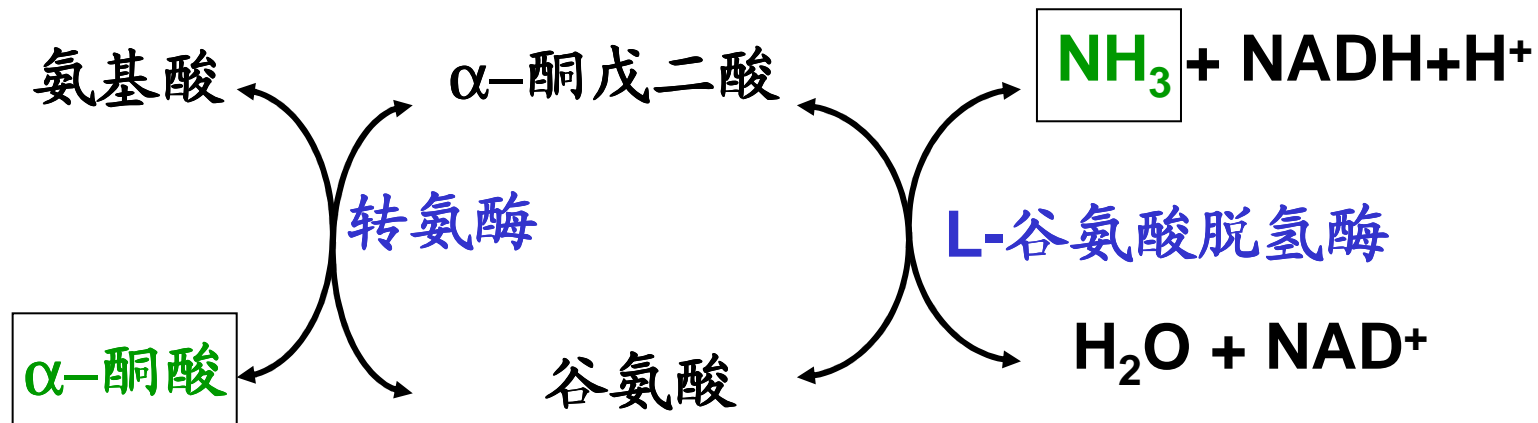
- 催化氧化脱氨基重要的酶：L-谷氨酸脱氢酶
- 活性强，分布于肝、肾及脑组织
- 辅酶为NAD⁺或NADP⁺
- ADP、GDP是变构激活剂，
ATP、GTP是变构抑制剂
- 特点：有氨生成

(三) 联合脱氨基作用 (重要)

1.定义: 由两种或两种以上酶的联合催化作用, 使氨基酸的 α -氨基脱下并产生游离氨的过程称为联合脱氨基作用。

2.类型及过程

(1) 转氨基偶联氧化脱氨基作用 (肝、肾)



特点: 有氨生成, 反应过程可逆

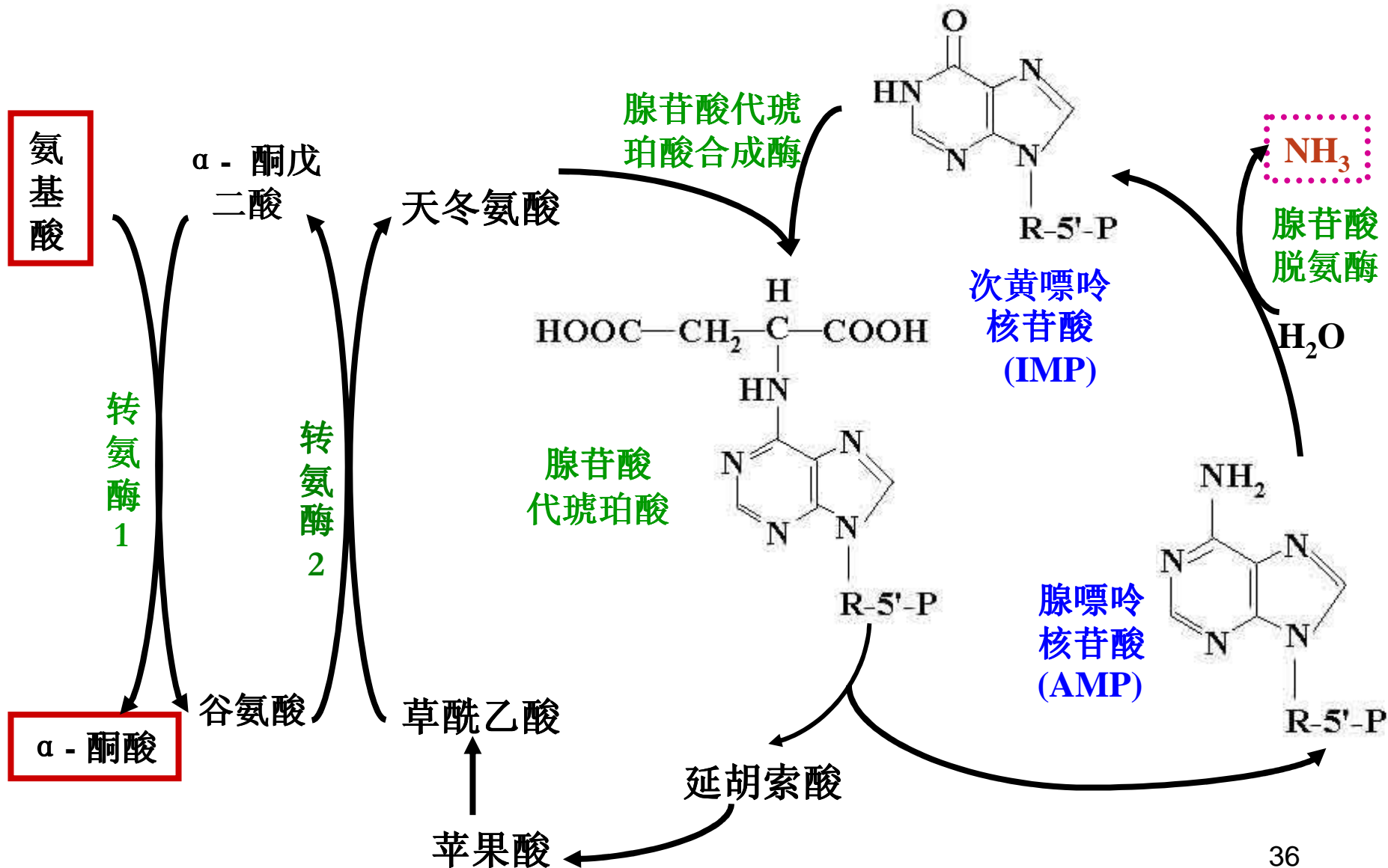
生理意义： *该过程的逆过程是体内合成非必需氨基酸的主要途径

*肝、肾等组织主要脱氨途径

(2) 转氨基偶联嘌呤核苷酸循环 (骨骼肌、心肌) purine nucleoeide cycle

原因： 骨骼肌、心肌中L-谷氨酸脱氢酶活性低，氨基酸不易通过第一种方式脱去氨基，必须通过转氨基偶联嘌呤核苷酸循环进行脱氨基作用。

转氨基偶联嘌呤核苷酸循环



二、 α -酮酸(α -ketoacid)的代谢

(一) 经氨基化生成非必需氨基酸

(二) 转变成糖及脂类

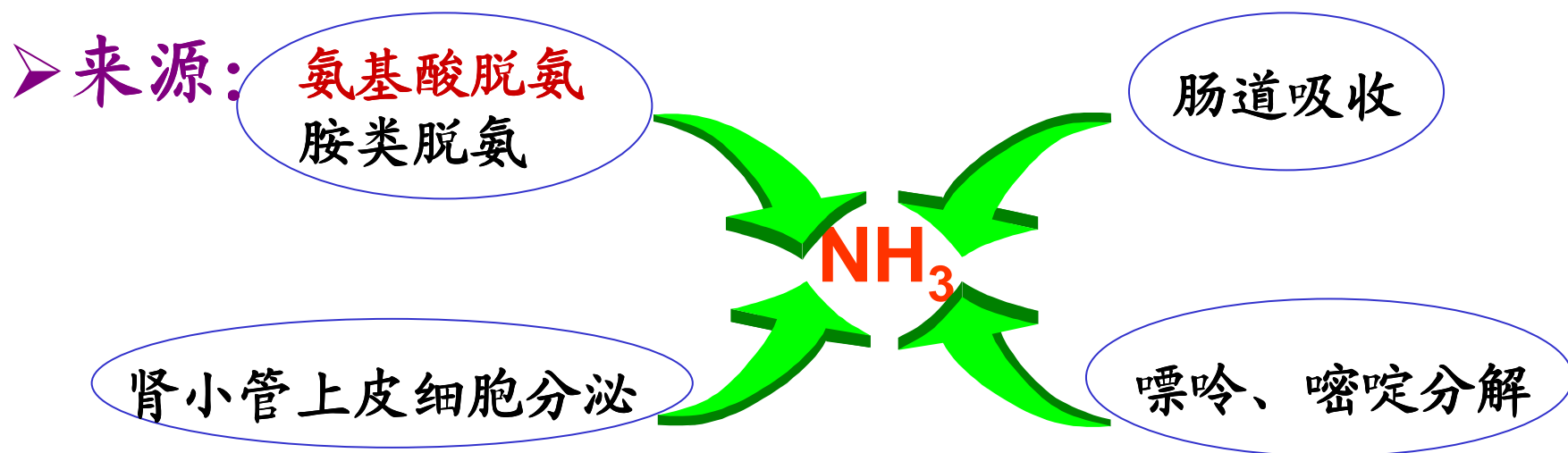
氨基酸生糖及生酮性质的分类

类别	氨基酸
生糖氨基酸	甘氨酸、丝氨酸、缬氨酸、组氨酸、半胱氨酸、羟脯氨酸、丙氨酸、谷氨酸、谷氨酰胺、蛋氨酸、天冬氨酸、天冬酰胺、脯氨酸、精氨酸、苏氨酸
生酮氨基酸	亮氨酸、赖氨酸
生糖兼生酮氨基酸	异亮氨酸、苯丙氨酸、酪氨酸、色氨酸

(三) 氧化供能

第四节 氨的代谢

一、体内氨的来源及去路



➤ 去路:

- 合成尿素排出 (主要)
- 与谷氨酸合成谷氨酰胺
- 合成非必需氨基酸及含氮物
- 经肾脏以铵盐形式排出

二、氨的转运

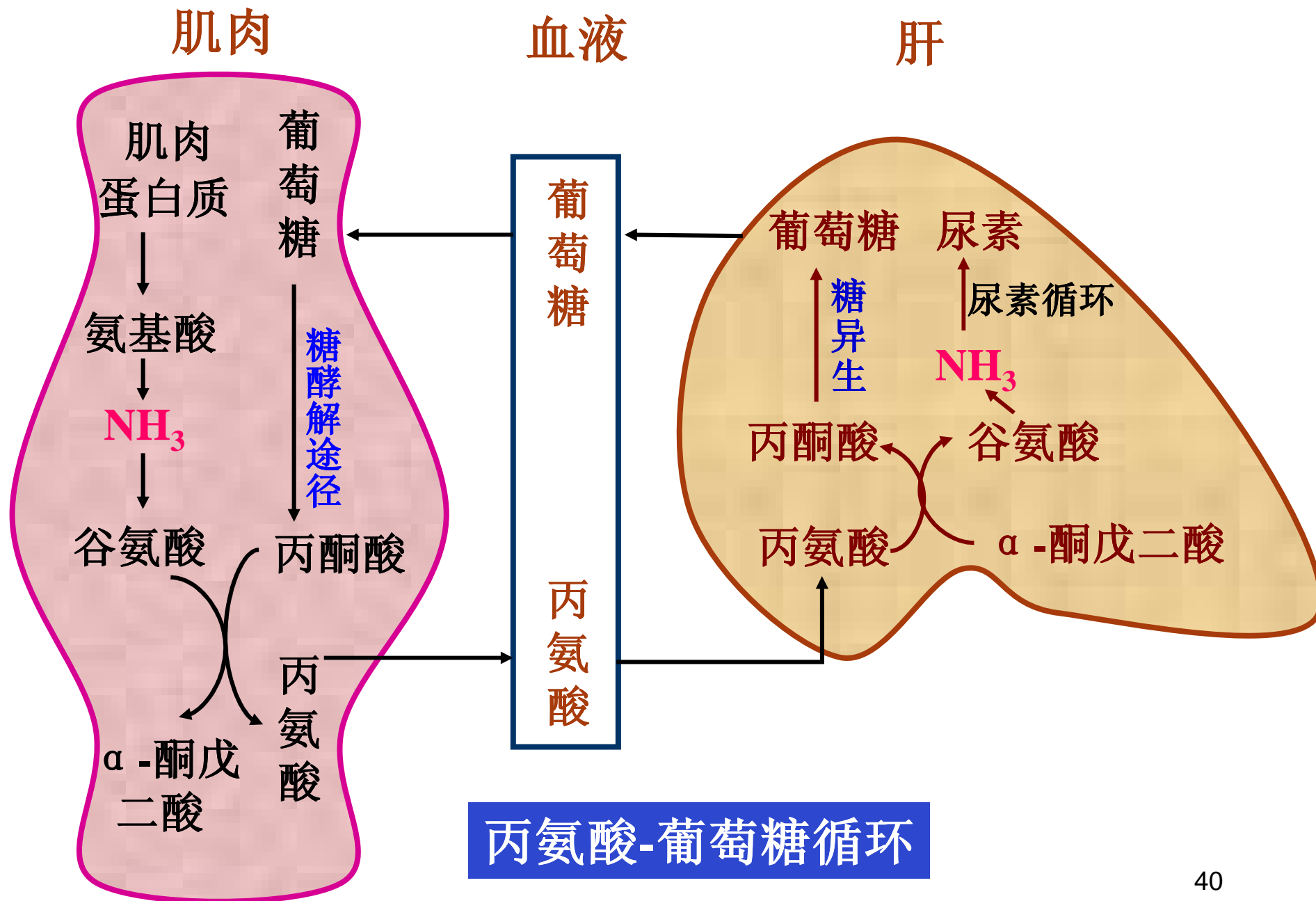
氨在血液中的运输形式是丙氨酸和谷氨酰胺

(一) 丙氨酸-葡萄糖循环(alanine-glucose cycle)

- 生理意义

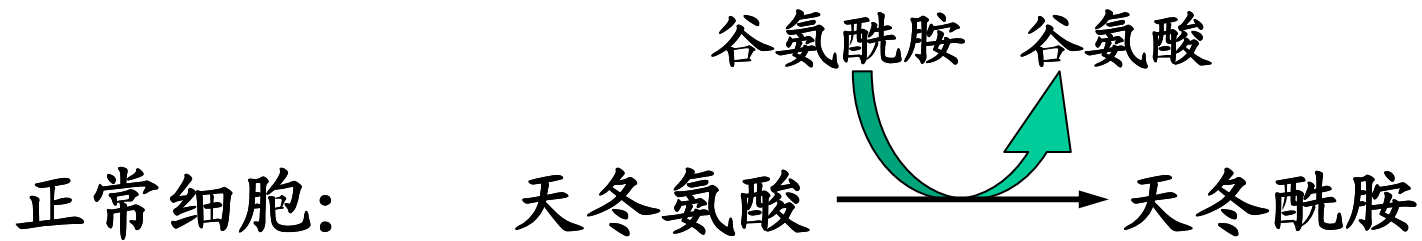
- ① 肌肉中氨以无毒的丙氨酸形式运输到肝。
- ② 肝为肌肉提供葡萄糖。

- 反应过程



谷氨酰胺

- 氨的解毒形式
(脑组织解氨毒的主要方式)
- 氨的运输形式
- 氨的储存形式
- 天冬酰胺的合成原料



临床上，天冬酰胺酶的应用可分解血中的天冬酰胺，从而抑制白血病细胞的生长。

第四节 氨的代谢

一、氨的来源及去路

二、氨的转运

三、尿素的生成

鸟氨酸循环由Hans Krebs和Kurt Henseleit在1932年提出，早于三羧酸循环被阐明5年，是第一个被发现的代谢通路。

(一) 生成途径—鸟氨酸循环 (Ornithine cycle)

历史:

(1) Krebs, 1932年发现

肝切片 + NH_4^+ + HCO_3^- → 尿素↑ (饥饿时不行)
精氨酸、鸟氨酸、瓜氨酸可加速, 但本身量不变

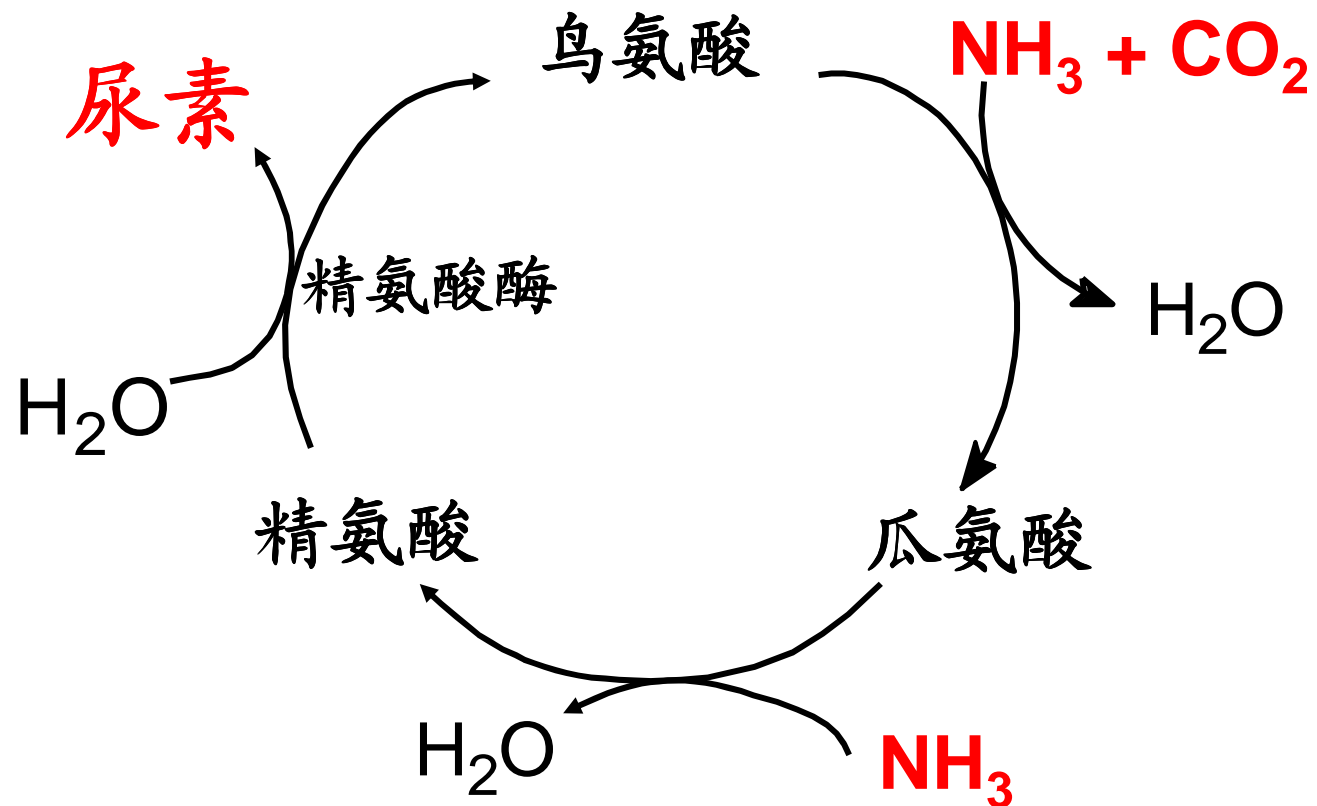
(2) 肝中有精氨酸酶, 催化:



(3) 根据精氨酸、鸟氨酸、瓜氨酸这三种氨基酸
的结构推测出一个循环 —— 鸟氨酸循环

(尿素循环 urea cycle)

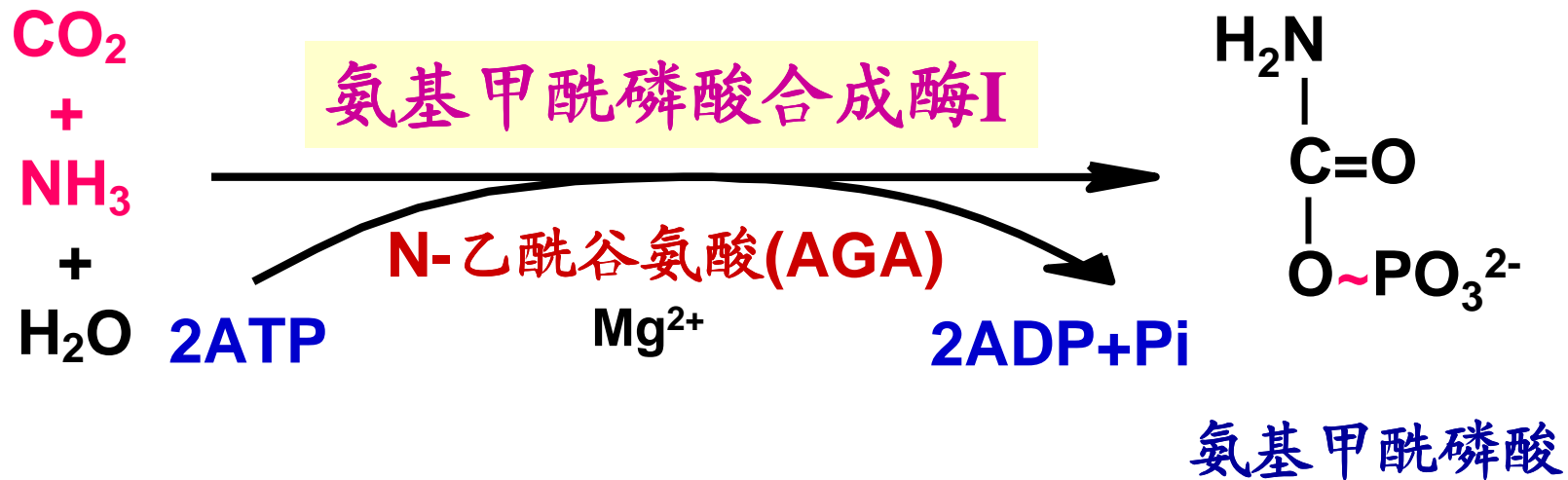
➤ **尿素循环**：以鸟氨酸为变化的起点,氨和 CO_2 为原料,经过瓜氨酸和精氨酸,构成了一个尿素生成的循环过程。



(二) 部位 主要在肝(线粒体和胞液)进行

(三) 过程

1、氨基甲酰磷酸的合成 (线粒体)

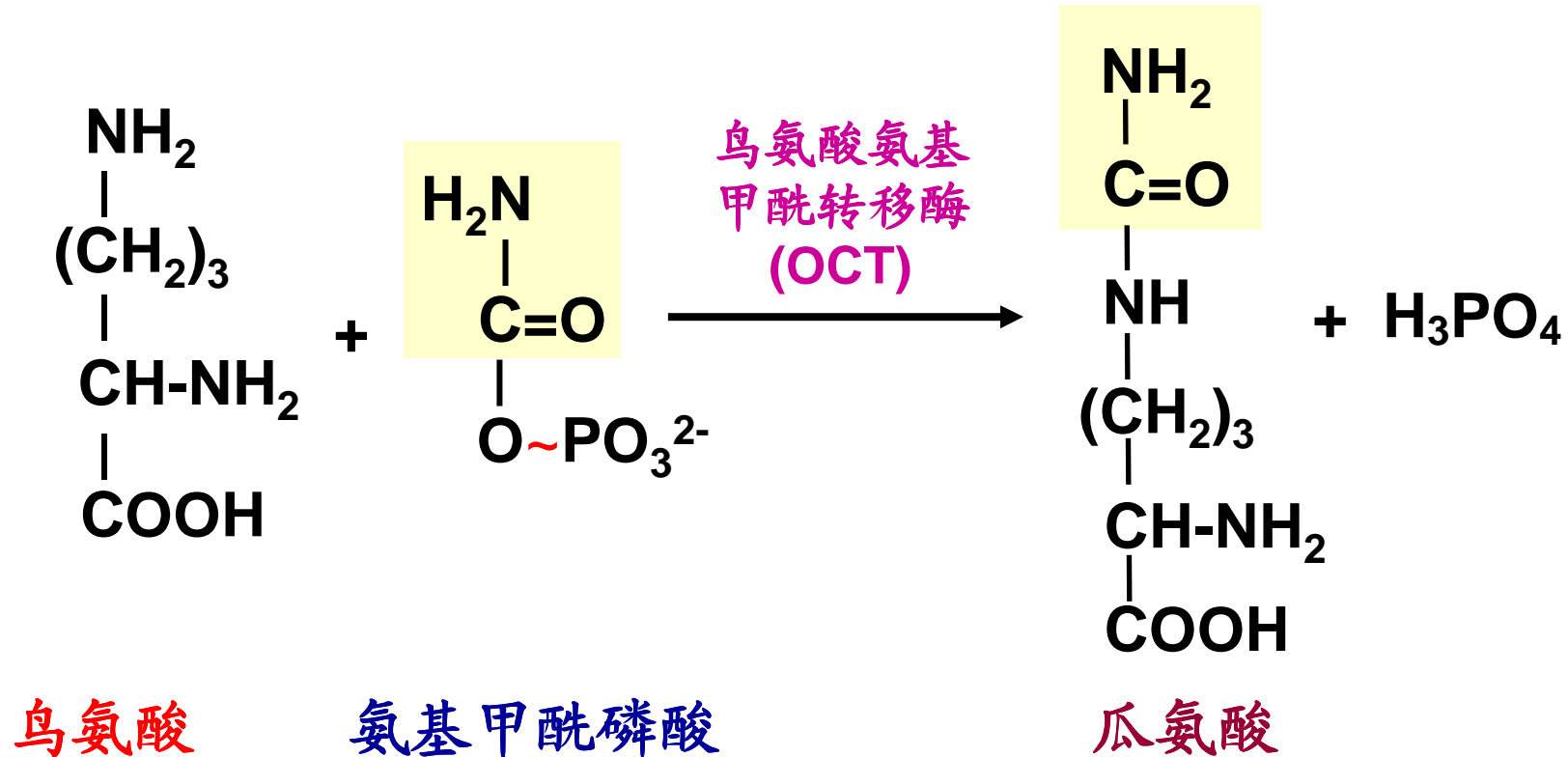


- ❖ **氨基甲酰磷酸合成酶 I (carbamoyl phosphate synthetase I, CPS-I)** 是尿素生成的**关键酶**，同时是一个变构酶，**N-乙酰谷氨酸 (AGA)** 是它的变构激活剂。



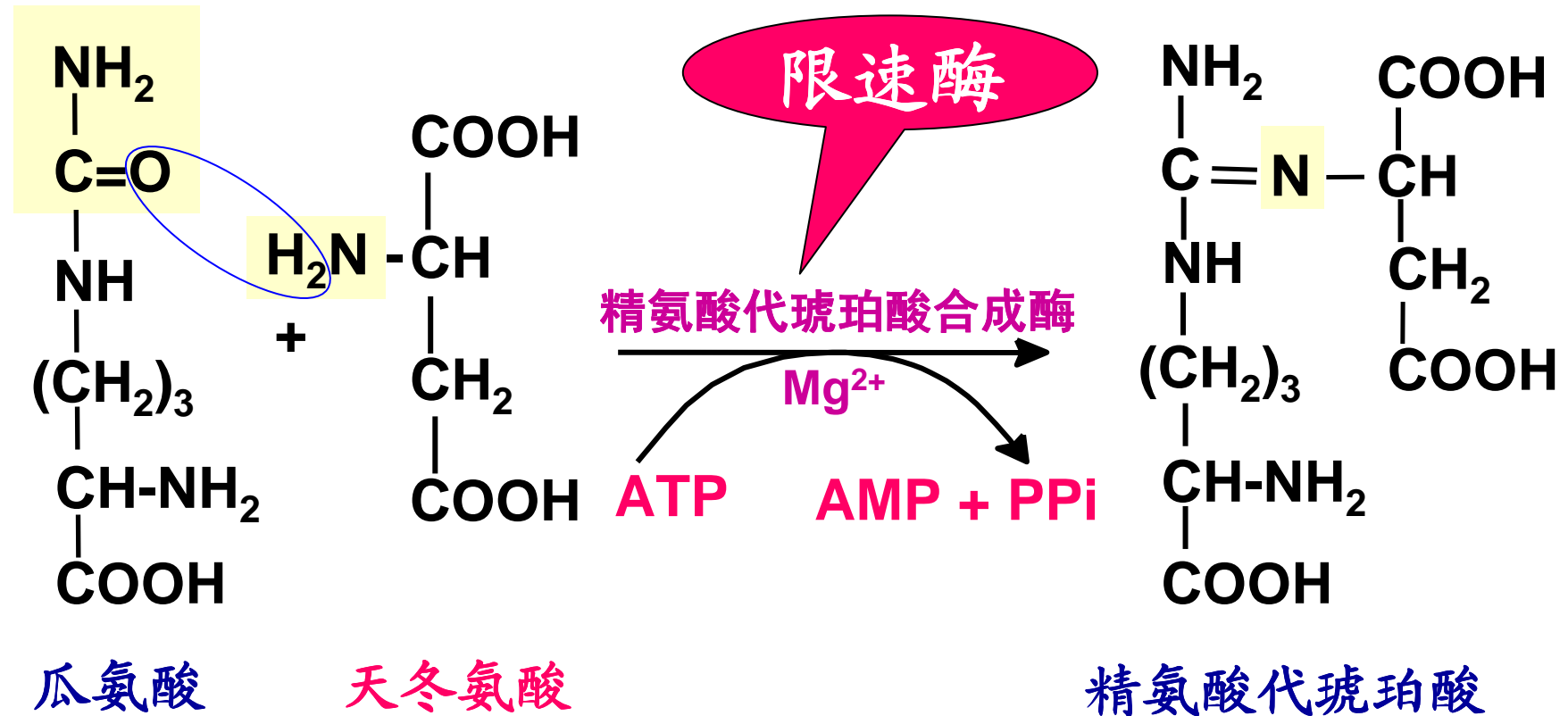
- ❖ 该反应是一个耗能反应，消耗**2ATP**
- ❖ 产物氨基甲酰磷酸是高能化合物。

2. 瓜氨酸的合成 (线粒体)



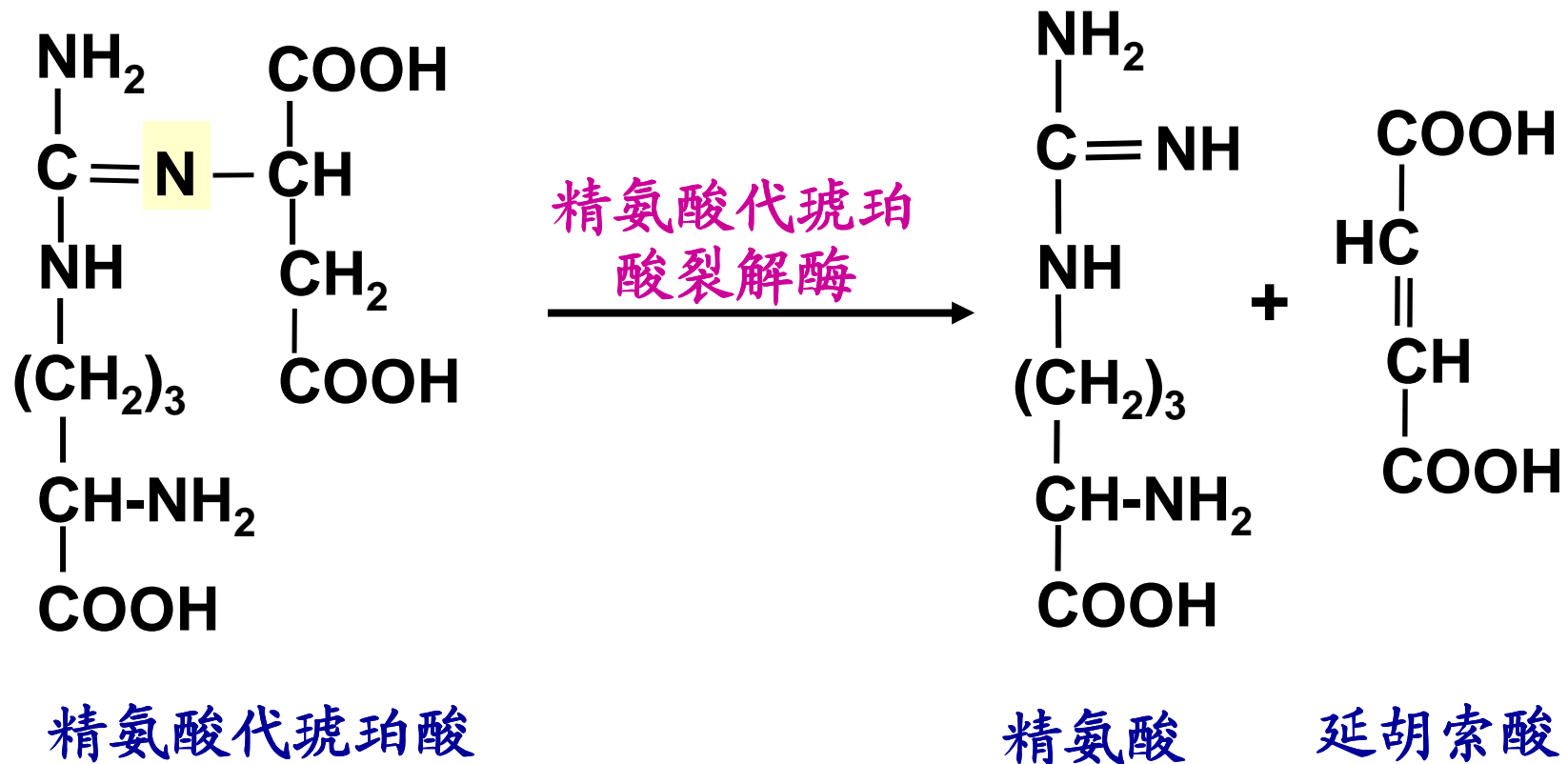
瓜氨酸可由线粒体 → 胞液

3、精氨酸的合成(1) (胞液)

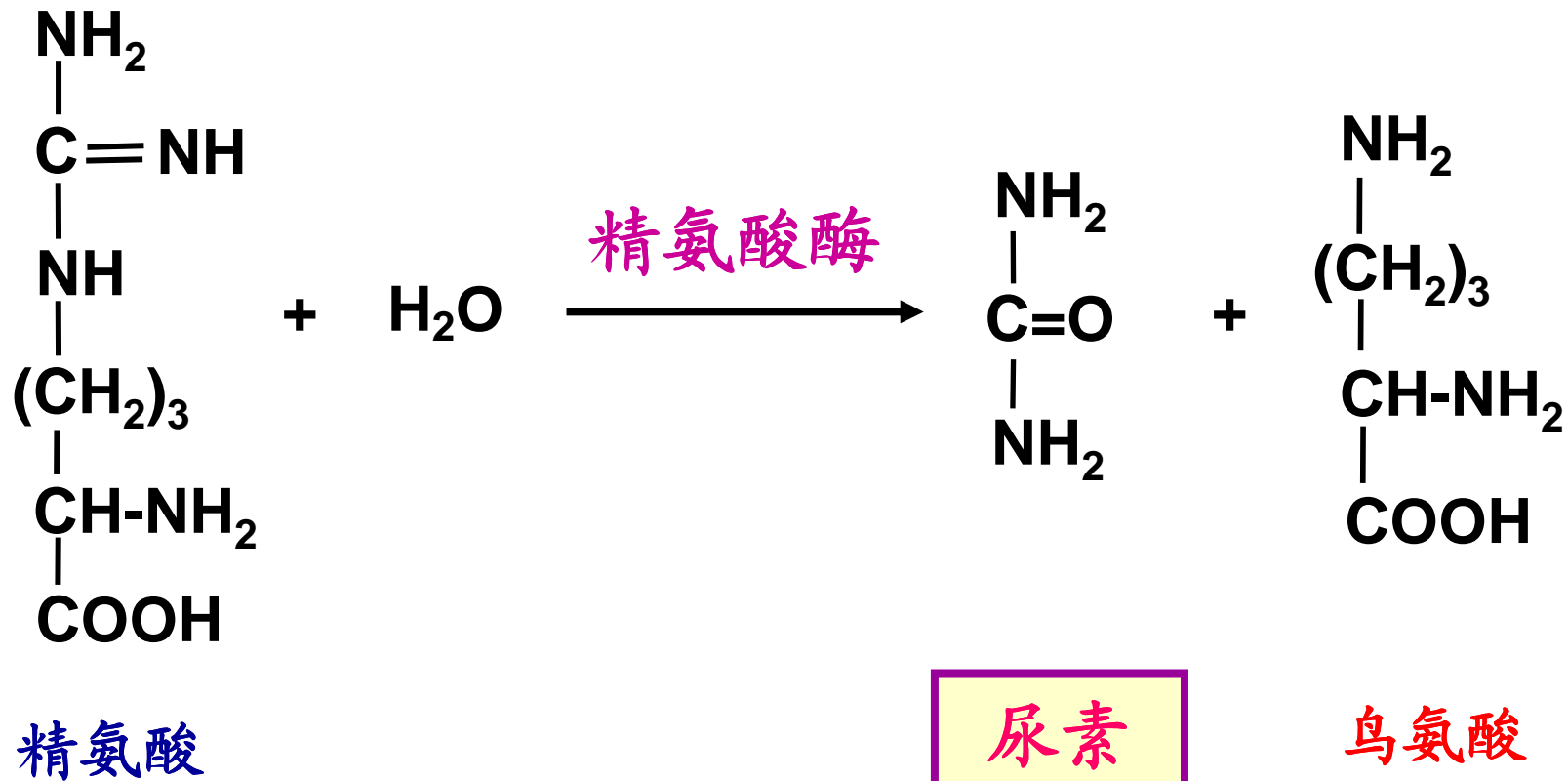


该反应是耗能反应，消耗两个高能键

3、精氨酸的合成-(2)

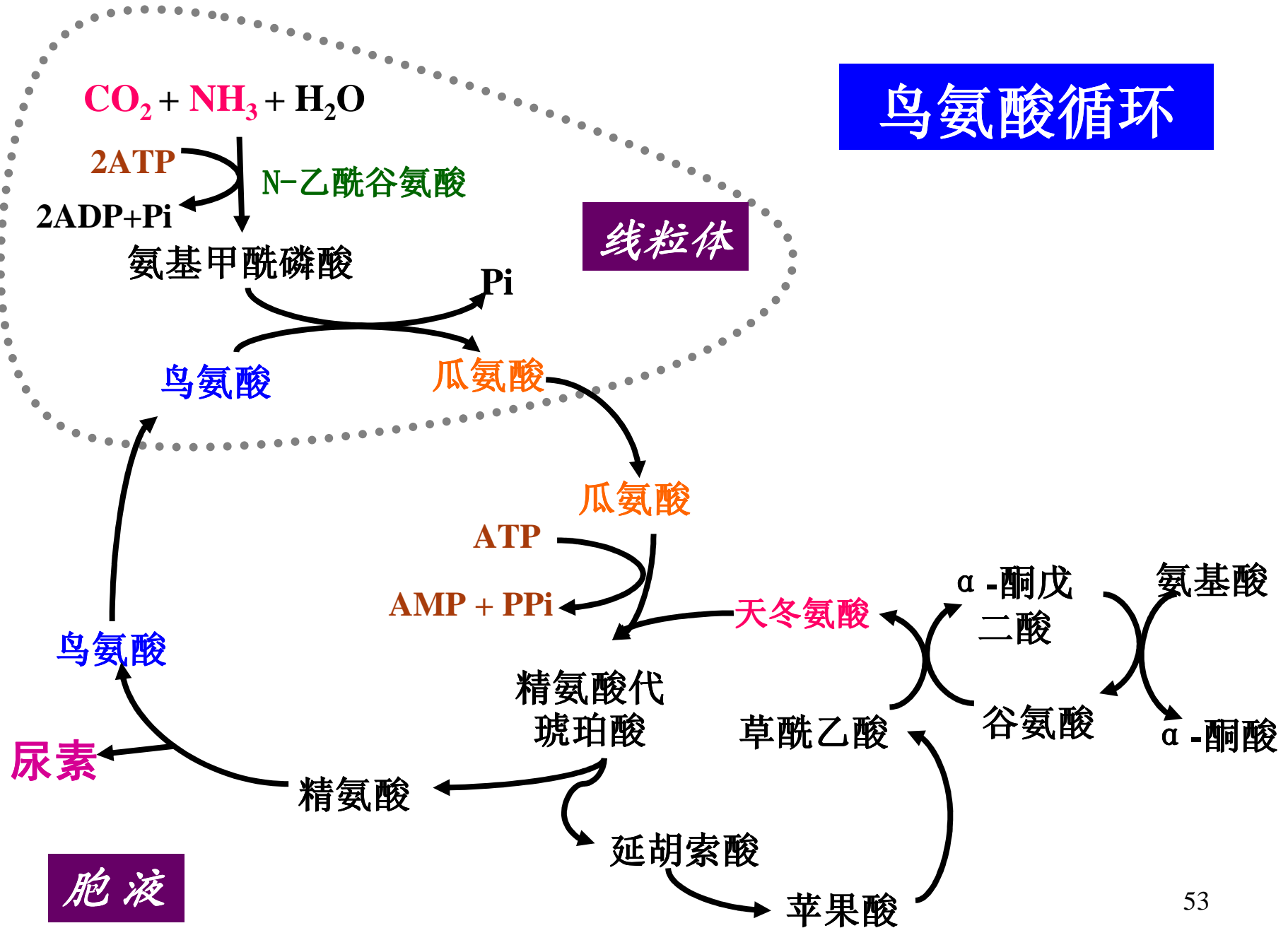


4、精氨酸水解为尿素（胞液）

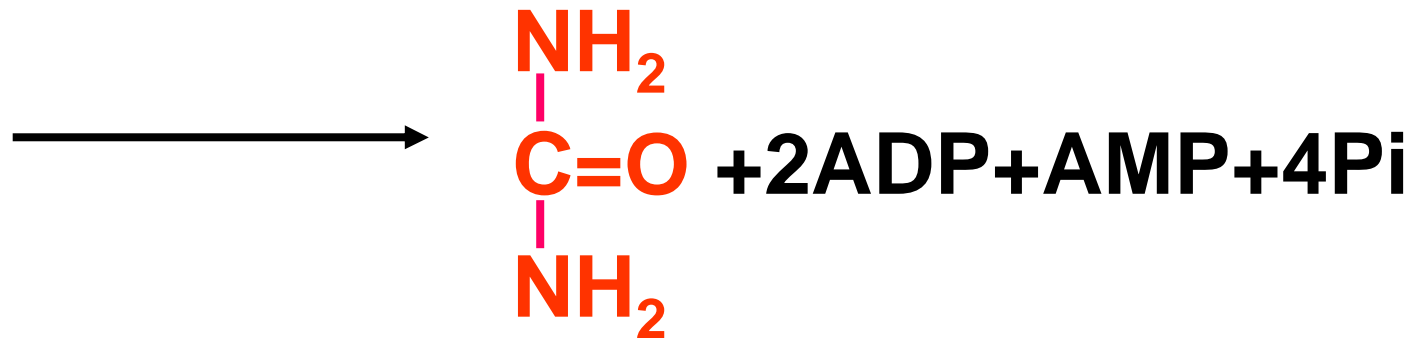
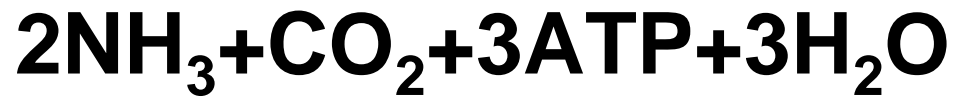


鸟氨酸可以由胞液 $\xrightarrow{\text{进入}}$ 线粒体

鸟氨酸循环



尿素生成总反应方程式:



尿素生成的总结

(1) 原料: CO_2 和 NH_3 $\left\{ \begin{array}{l} \text{一个来自游离氨 (线粒体)} \\ \text{一个来自 Asp (胞液)} \end{array} \right.$

(2) 尿素合成是耗能过程, 每生成1分子尿素消耗4个高能磷酸键。

(3) CPS $\left\{ \begin{array}{ll} \text{I} & \text{线粒体} \quad \text{参与尿素合成} \\ \text{II} & \text{胞液} \quad \text{参与嘧啶碱的合成 (见第八章)} \end{array} \right.$

CPS I 和 II 的作用均是催化氨基甲酰磷酸的合成

(4) 先在线粒体中进行, 再在胞液中进行

(5) 延胡索酸和天冬氨酸是将鸟氨酸循环和三羧酸循环联系起来的重要成分

(6) 生理意义是排氨解毒

(四) 尿素合成的调节

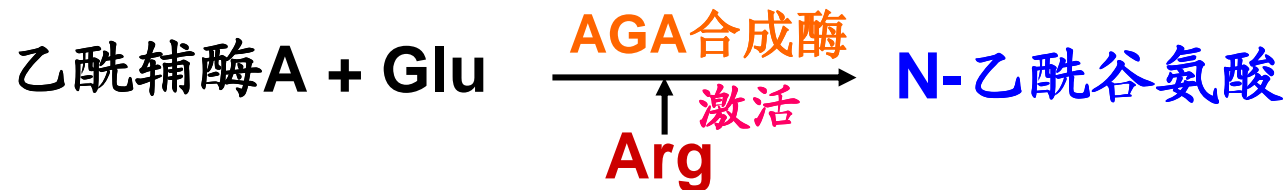
(1) 食物

高蛋白质饮食时尿素合成速度加快，低蛋白质饮食可使尿素合成减慢。

(2) CPS- I 的调节

氨基甲酰磷酸合成酶 I (CPS- I) 线粒体

N-乙酰谷氨酸(AGA)是该酶的变构激活剂



精氨酸在临床上用于纠正肝性脑病

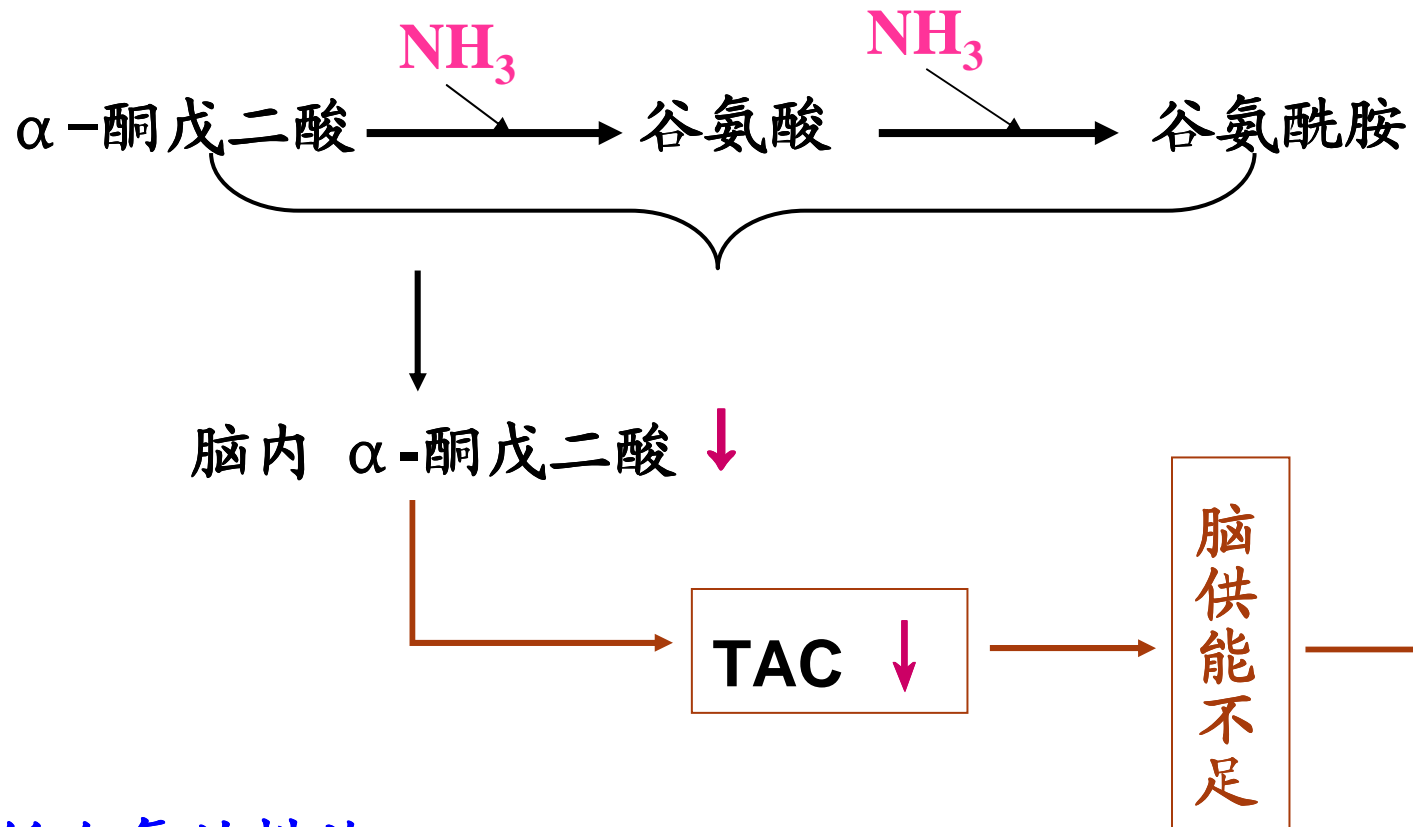
(3) 尿素生成酶系的调节

精氨酸代琥珀酸合成酶(限速酶)

(五) 高血氨症和氨中毒

- 血氨浓度升高称**高血氨症 (hyperammonemia)**，常见于肝功能严重损伤时，尿素合成酶的遗传缺陷也可导致高血氨症。
- 高血氨症时可引起脑功能障碍，称**氨中毒 (ammonia poisoning)**。

氨中毒的可能机制



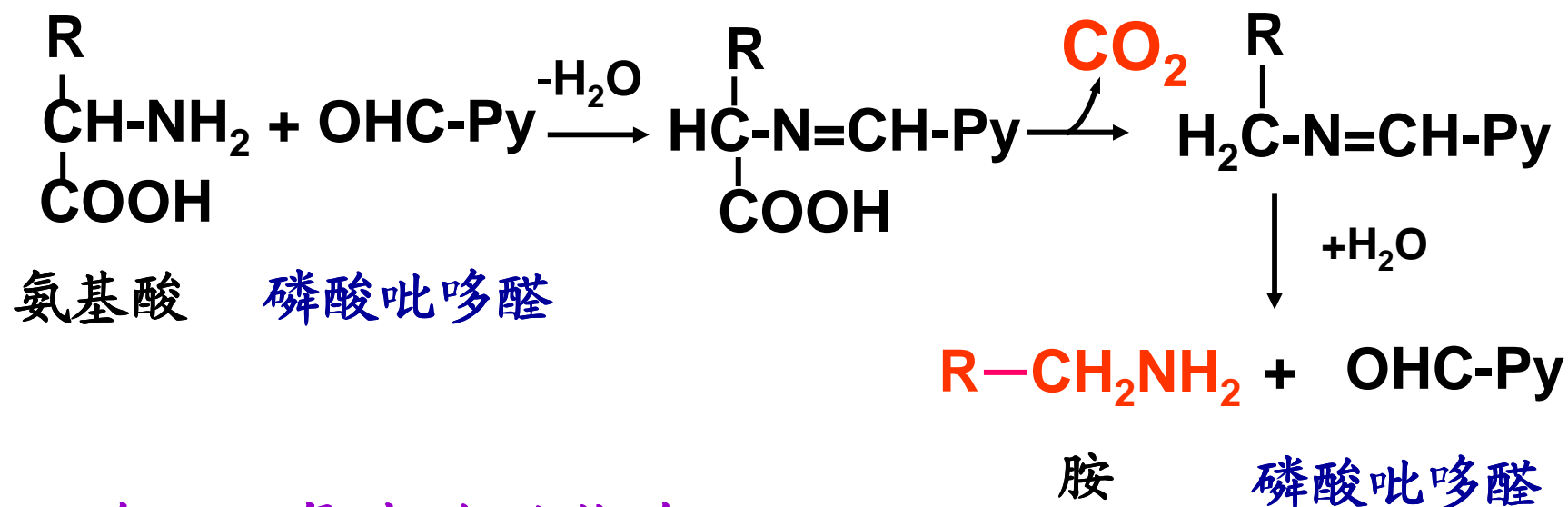
降低血氨的措施:

限制蛋白进食量 给予肠道抑菌药物
给予谷氨酸使其与氨结合为谷氨酰胺

第五节 个别氨基酸的代谢

- 一、氨基酸的脱羧基作用
- 二、一碳单位的代谢
- 三、含硫氨基酸的代谢
- 四、芳香族氨基酸的代谢
- 五、支链氨基酸的代谢

一、氨基酸的脱羧基作用



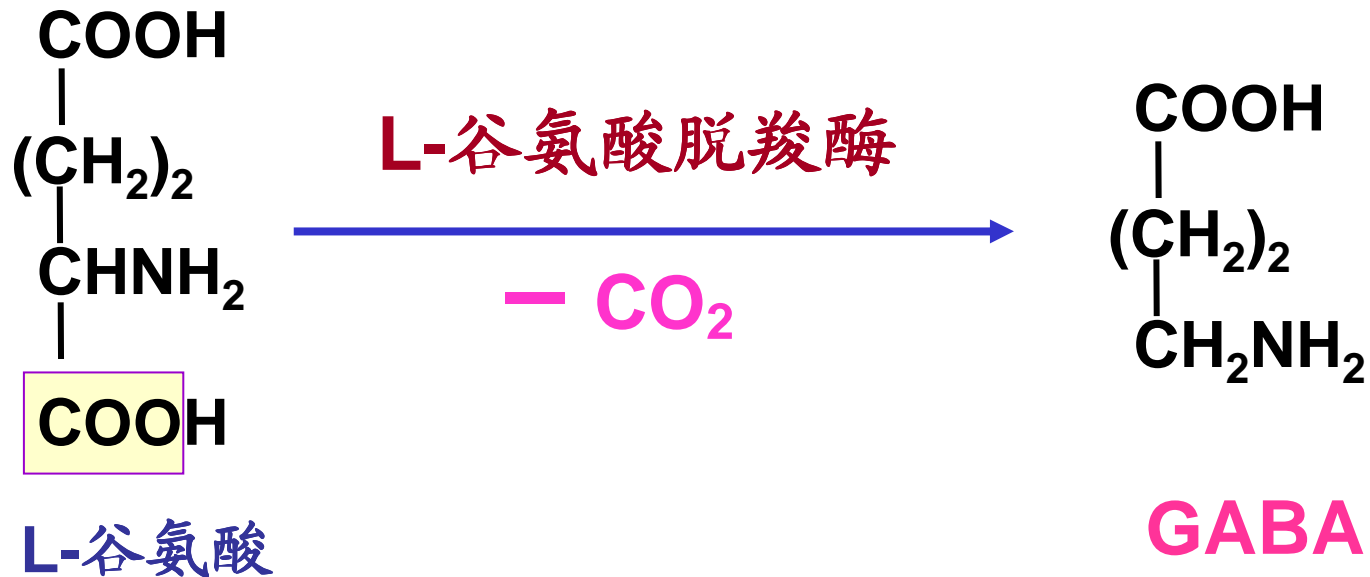
•酶： 氨基酸脱羧酶

•辅酶： 磷酸吡哆醛（与转氨酶的辅酶相同）

•作用： 产生一些特殊的生理物质

•去路： 胺 $\xrightarrow{\text{胺氧化酶}}$ 醛 $\xrightarrow{\text{醛氧化酶}}$ 酸

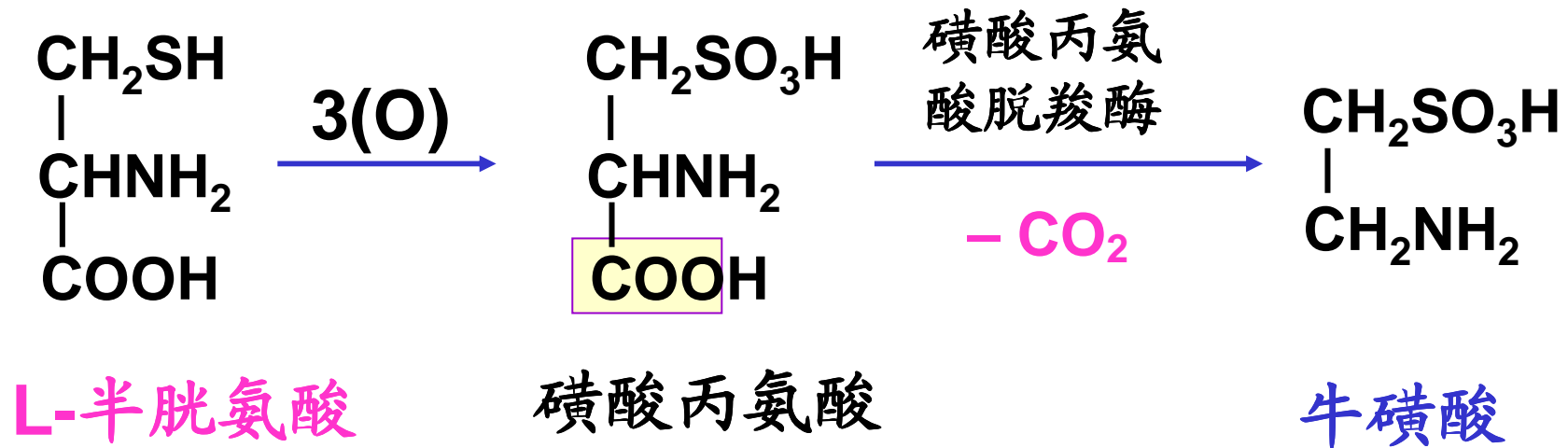
(一) γ -氨基丁酸 (aminobbutyric acid GABA)



生成部位：脑、肾 Glu \longrightarrow GABA

功能：是抑制性神经递质，对中枢神经系统有抑制作用。

(二) 牛磺酸 (taurine)

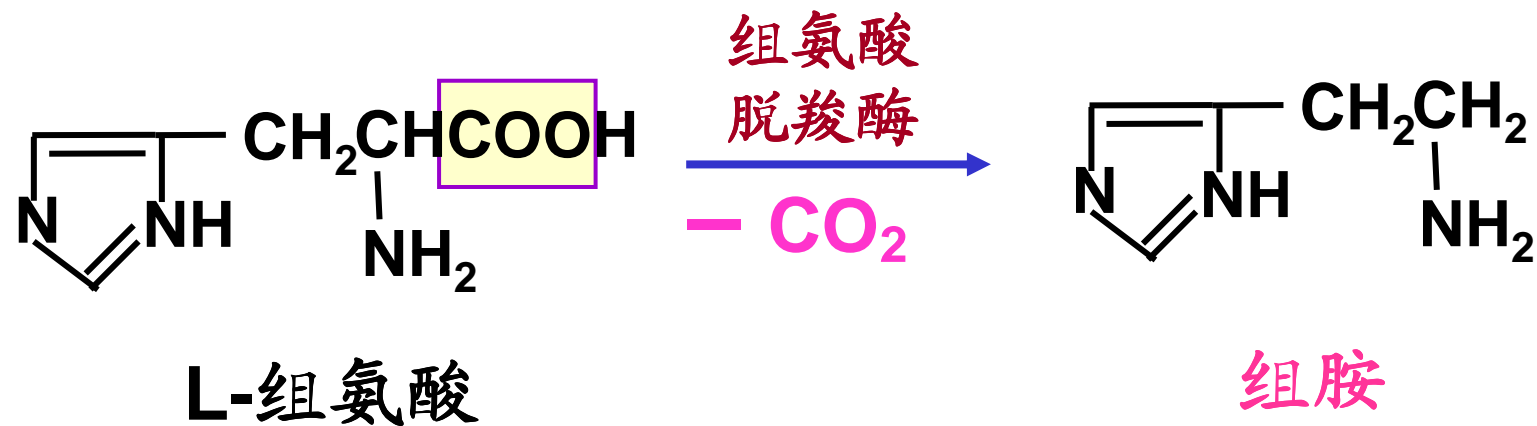


生成部位：肝，脑 Cys → 牛磺酸

酶： 磺酸丙氨酸脱羧酶

功能： 结合胆汁酸的重要组成成分

(三) 组胺 (histamine)



生成部位：肥大细胞、肺、肝、肾、肌肉、胃粘膜

His \longrightarrow 组胺

酶：组氨酸脱羧酶

功能：是强烈的血管舒张剂，扩张血管，降低血压；
增加毛细血管的通透性，与过敏反应有关；
促进胃液分泌。

(四) 5-羟色胺

(5-hydroxytryptamine, 5-HT)



生成部位: 脑、肾、肝等各组织



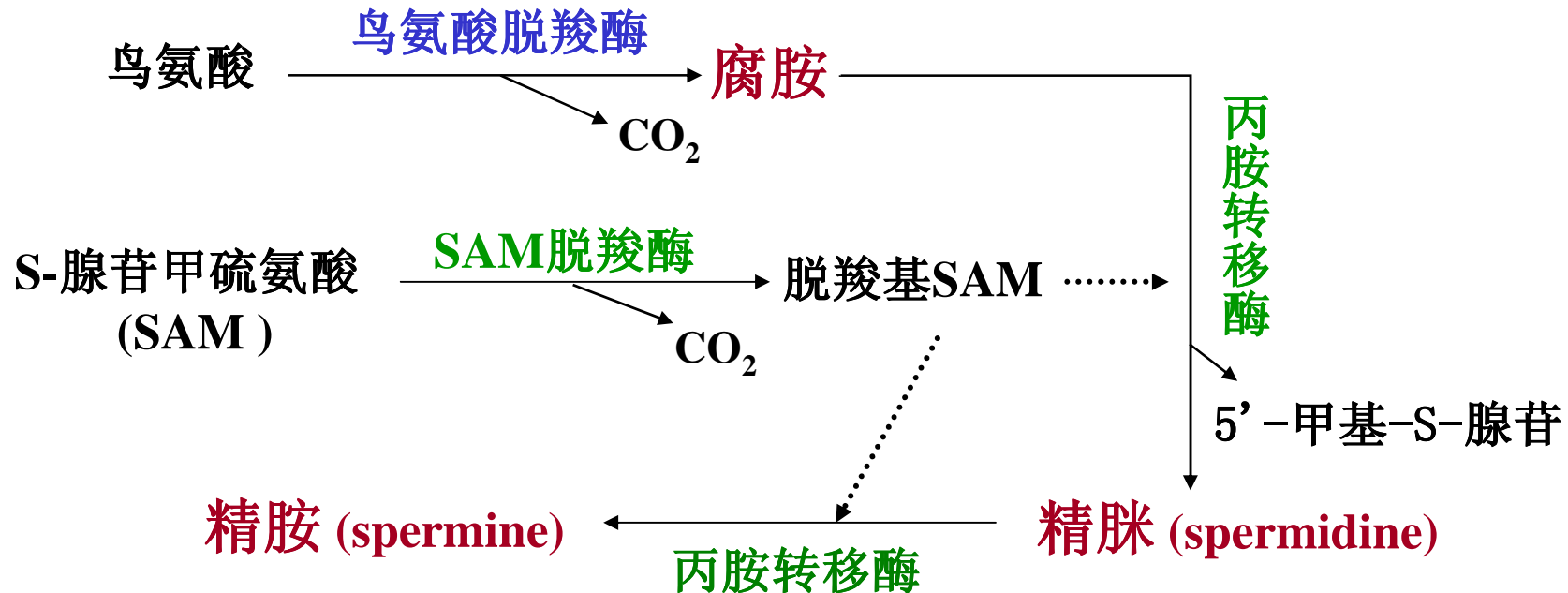
酶: 色氨酸羟化酶、5-羟色氨酸脱羧酶

功能: 脑中的5-HT是一种抑制性神经递质
外周组织的5-HT可收缩血管，升高血压。

(五) 多胺 (polyamines)

P₁₇₈

定义: 分子中含有2个或2个以上氨基的胺类物质



生成部位: 肝、生长旺盛的组织 (如肿瘤)

关键酶: 鸟氨酸脱羧酶

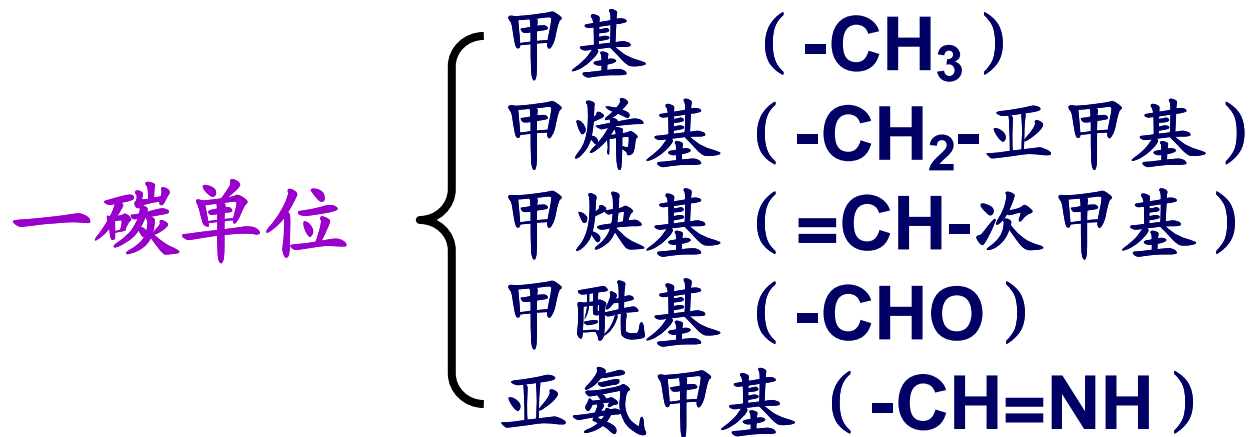
(ornithine decarboxylase, ODC)

功能: 调节细胞生长, 促进核酸及蛋白质合成

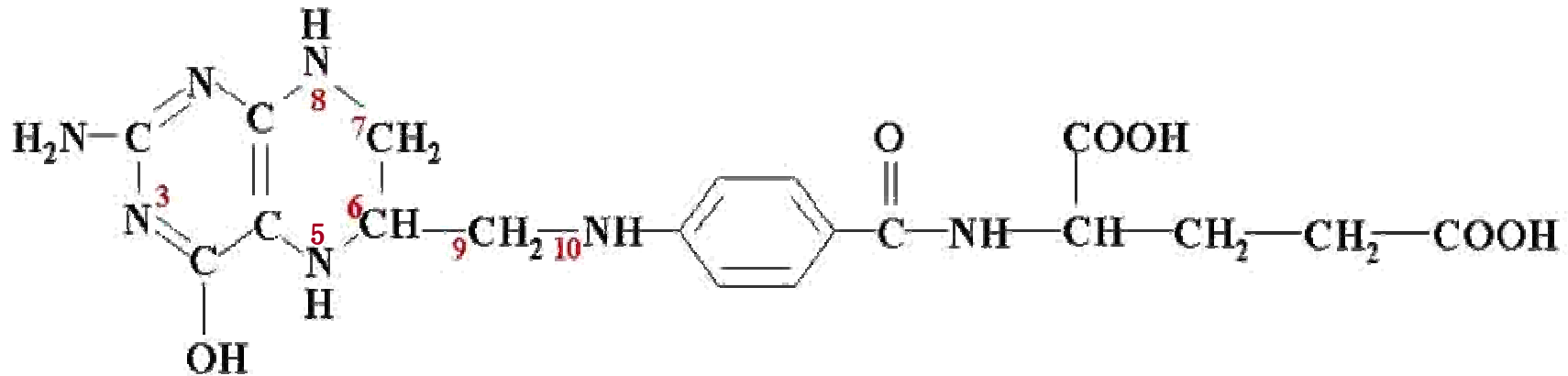
二、一碳单位的代谢

(一) 一碳单位的定义 (one carbon unit)

某些氨基酸在分解代谢过程中产生的含有一个碳原子的基团，称为一碳单位。一碳单位不能游离存在，常与四氢叶酸结合而转运和参与代谢。



(二) 一碳单位的载体 (四氢叶酸, FH_4)



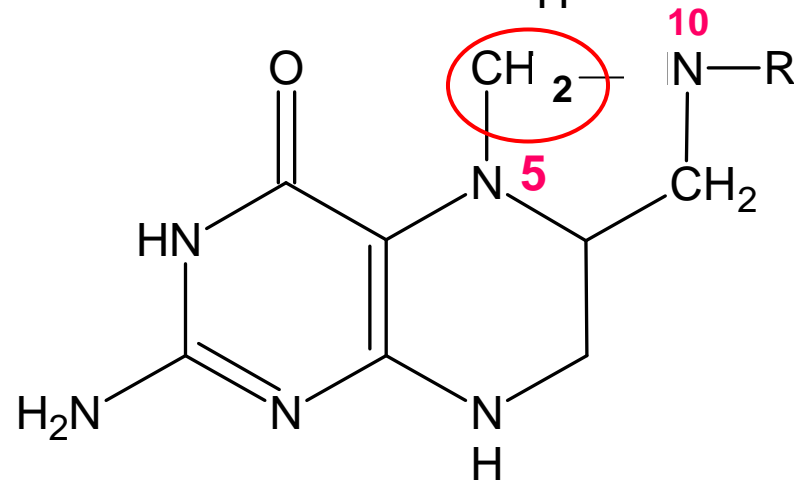
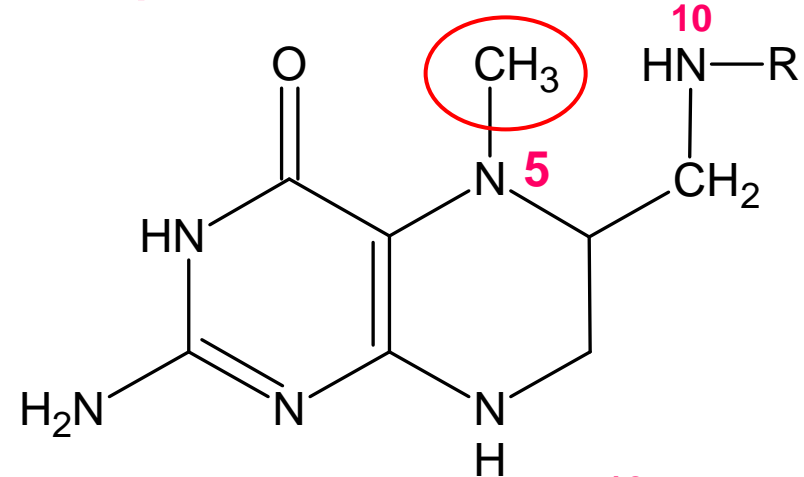
5,6,7,8-四氢叶酸(FH_4)

• FH_4 的生成



- FH_4 携带一碳单位的形式

(一碳单位通常是结合在 FH_4 分子的 N^5 、 N^{10} 位上)



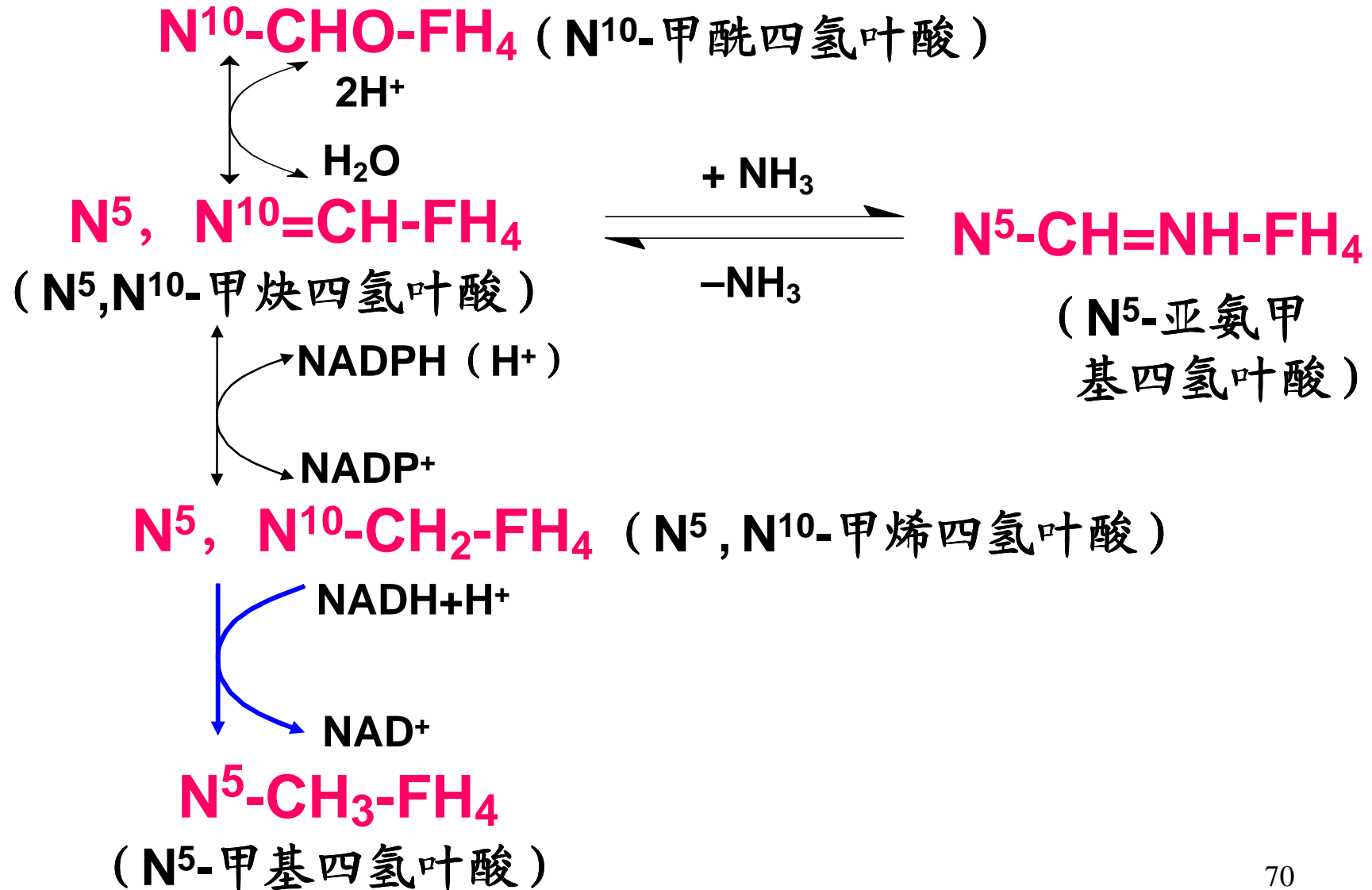
(三) 一碳单位的生成

能产生一碳单位的氨基酸主要是：

Ser、Gly、His、Trp



(四) 一碳单位的相互转变



(五) 一碳单位的生理功用

- ▶ 参与嘌呤、嘧啶核苷酸及甲硫氨酸等的合成
将氨基酸与核苷酸代谢密切相连
- ▶ 参与许多物质的甲基化过程（间接供体）
- ▶ 一碳单位代谢障碍会影响DNA、蛋白质的合成，
引起巨幼红细胞性贫血。
- ▶ 磺胺类药及甲氨蝶呤等是通过影响一碳单位代谢
及核苷酸合成而发挥药理作用

一碳单位与抗菌、抗肿瘤：

- 细菌：存在着二氢叶酸合成酶，催化：



↑ 类似物

磺胺药，竞争性抑制二氢叶酸合成酶

- 肿瘤细胞：二氢叶酸还原酶，催化：



↑ 类似物

甲氨蝶呤，竞争性抑制二氢叶酸还原酶

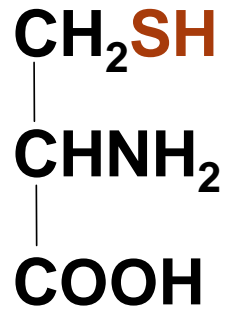
结果：



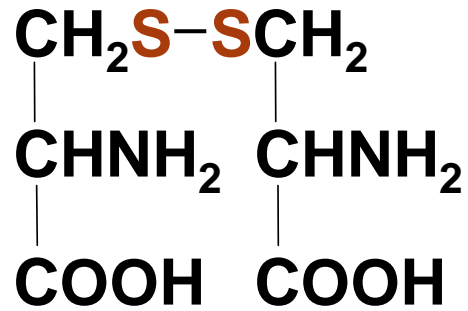
三、含硫氨基酸的代谢

含硫氨基酸

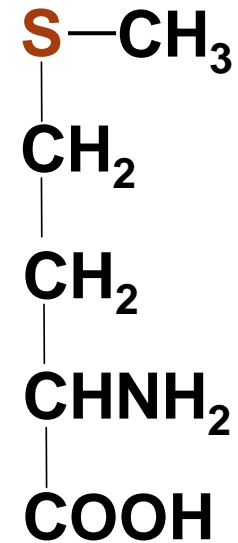
半胱氨酸



胱氨酸

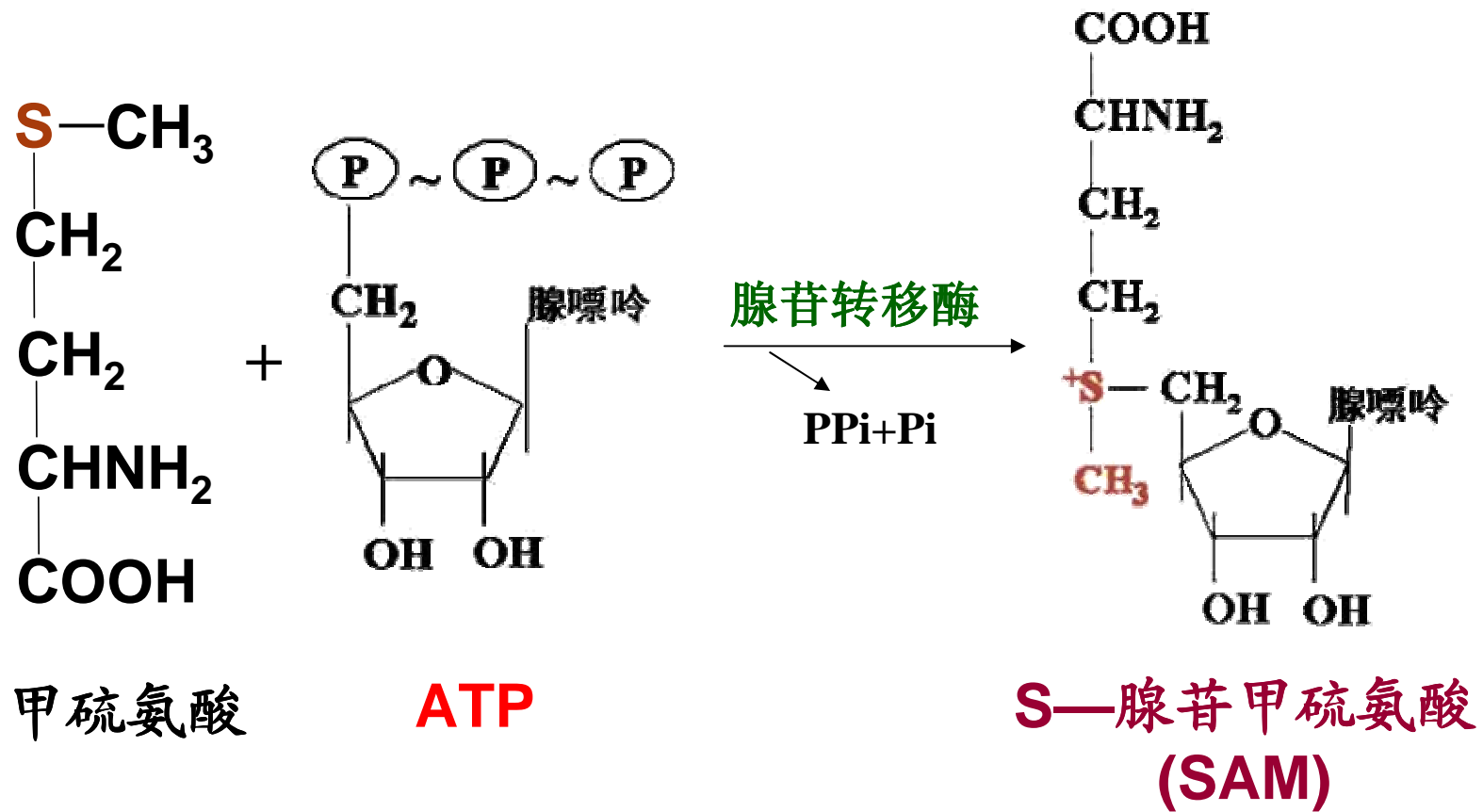


甲硫氨酸

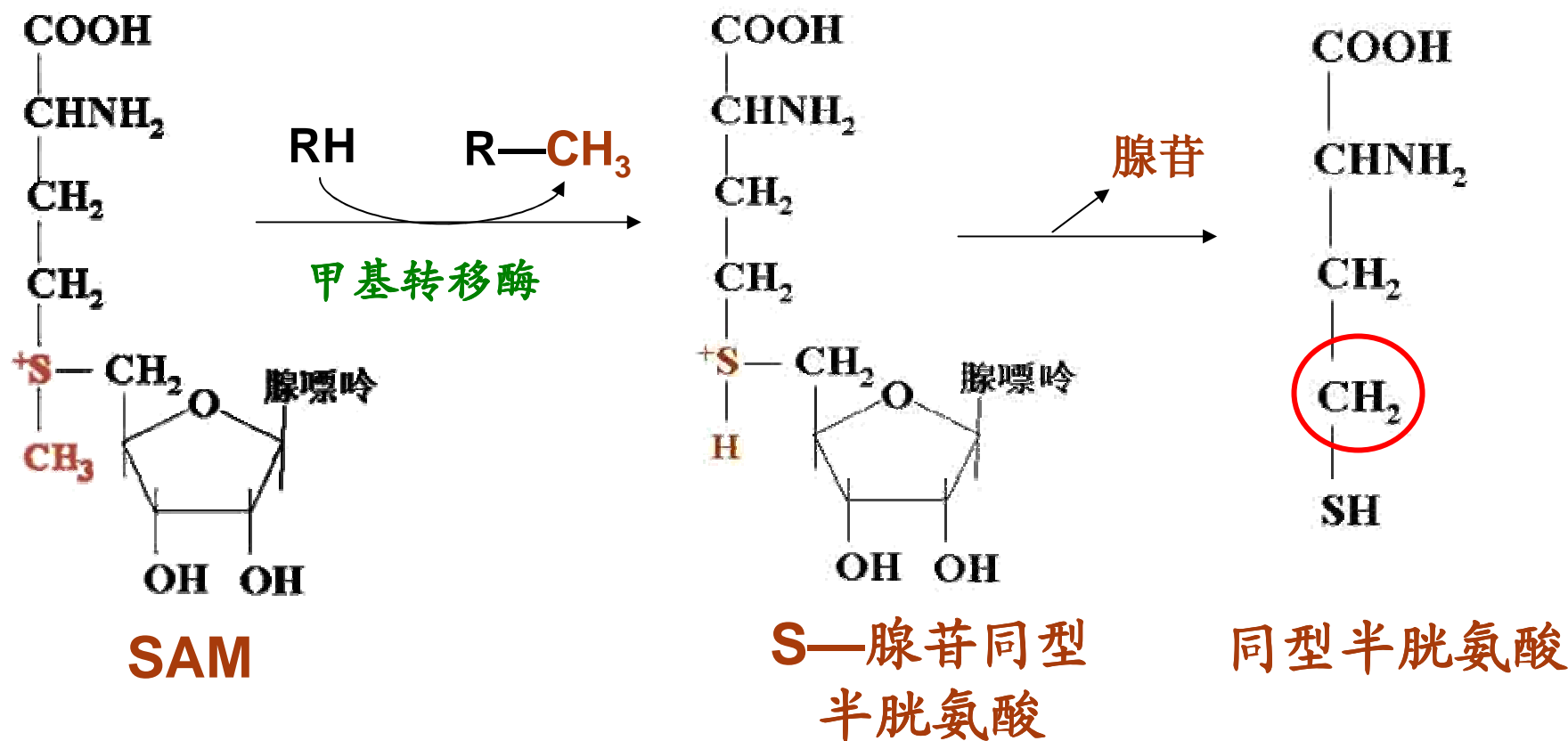


(一) 甲硫氨酸的代谢

1. 甲硫氨酸与转甲基作用



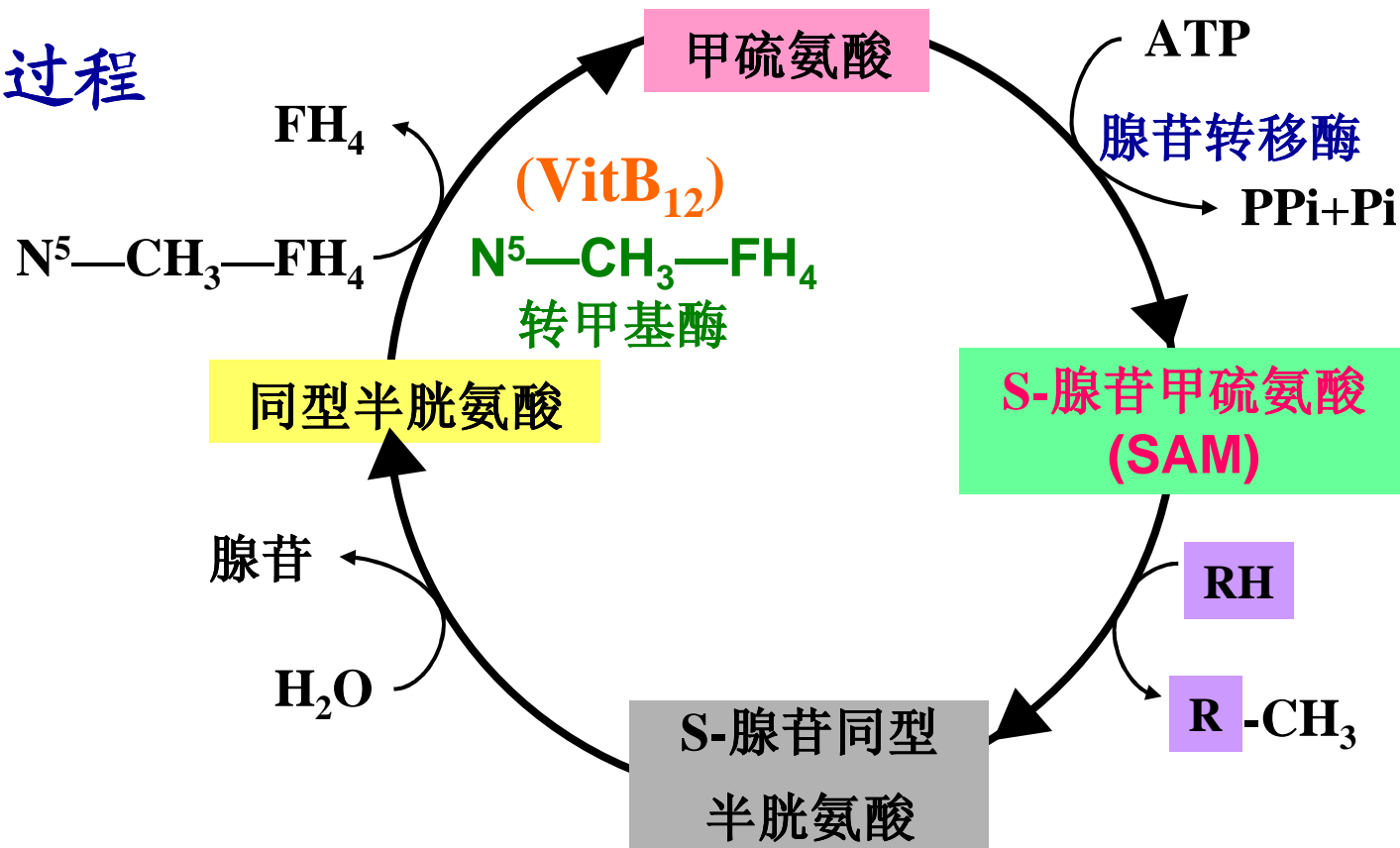
•SAM为体内甲基的直接供体



2. 甲硫氨酸循环(methionine cycle)

• **定义:** 从Met活化为SAM, SAM供出甲基后生成S-腺苷同型半胱氨酸, 然后进一步转变成同型半胱氨酸, 同型半胱氨酸接受 $N^5-CH_3-FH_4$ 提供的甲基, 重新生成Met的过程。

• **过程**



- 甲硫氨酸循环的生理意义:

- 使 $N^5-CH_3-FH_4$ 释出 $-CH_3$ 重新变成游离的 FH_4 , 继续运载一碳单位。

$N^5-CH_3-FH_4$ 是体内甲基的间接供体

- SAM提供甲基进行甲基化反应

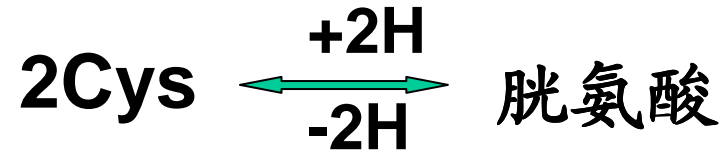
- 减少甲硫氨酸的净消耗, 重复利用以满足机体对甲基化供体的需要。

3. 肌酸的合成

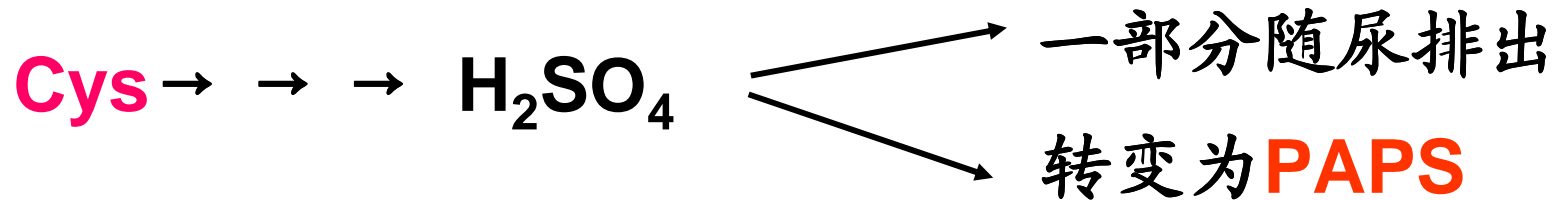
- 肌酸(creatine)和磷酸肌酸(creatine phosphate)是能量储存、利用的重要化合物。
- 肝是合成肌酸的主要器官。
- 肌酸以甘氨酸为骨架，由精氨酸提供胍基，**SAM提供甲基**而合成。
- 肌酸在肌酸激酶的作用下，转变为磷酸肌酸。
- 肌酸和磷酸肌酸代谢的终产物为肌酸酐(creatinine)。

(二) 半胱氨酸与胱氨酸的代谢

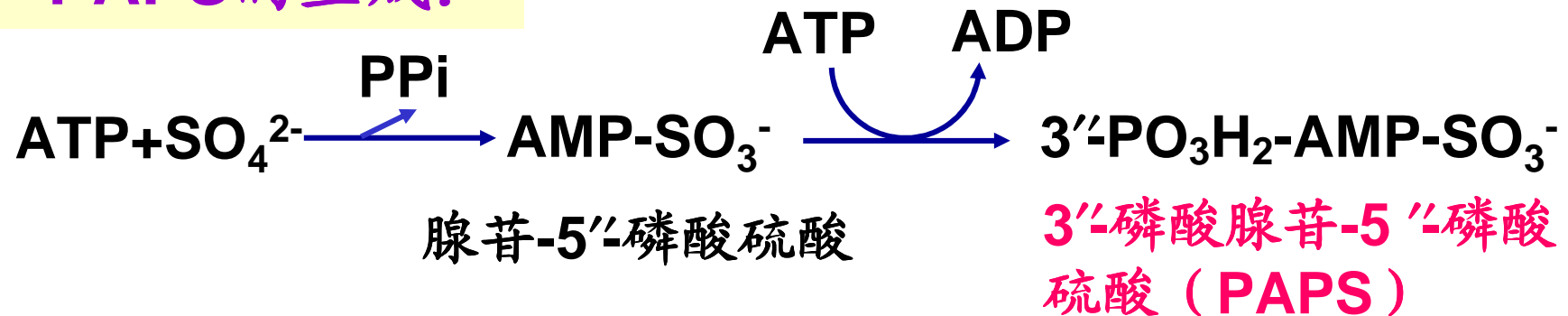
1、两者互变



2、硫酸根的代谢



PAPS的生成:



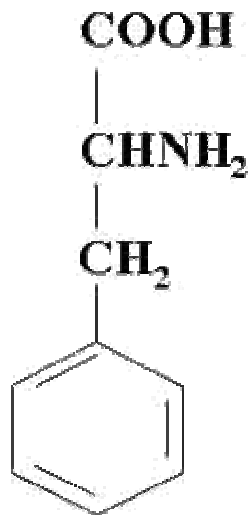
PAPS是活性硫酸根，是体内硫酸基的供体

PAPS的结构见P₁₈₄

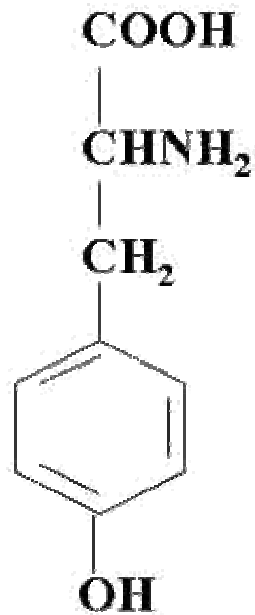
四、芳香族氨基酸的代谢

芳香族氨基酸

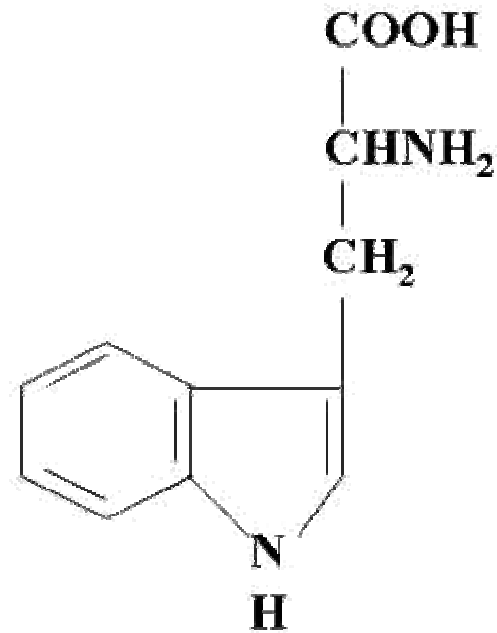
苯丙氨酸



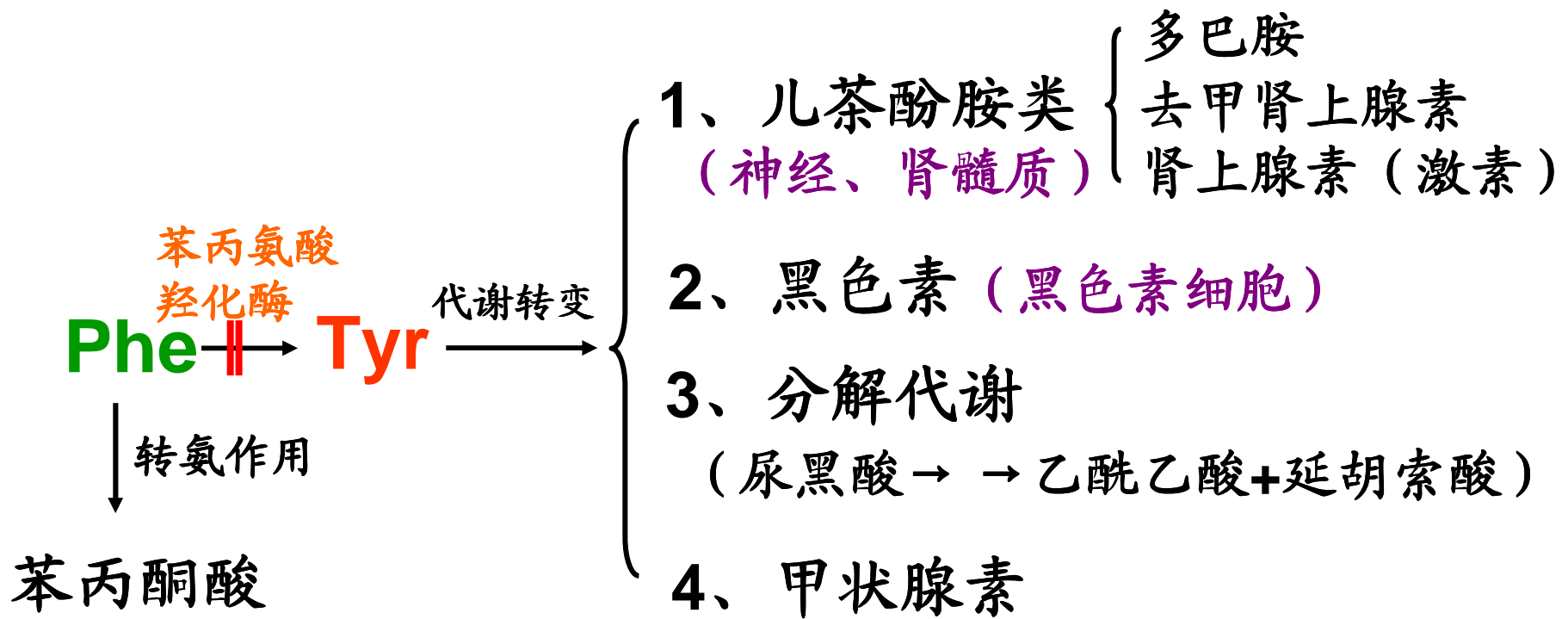
酪氨酸



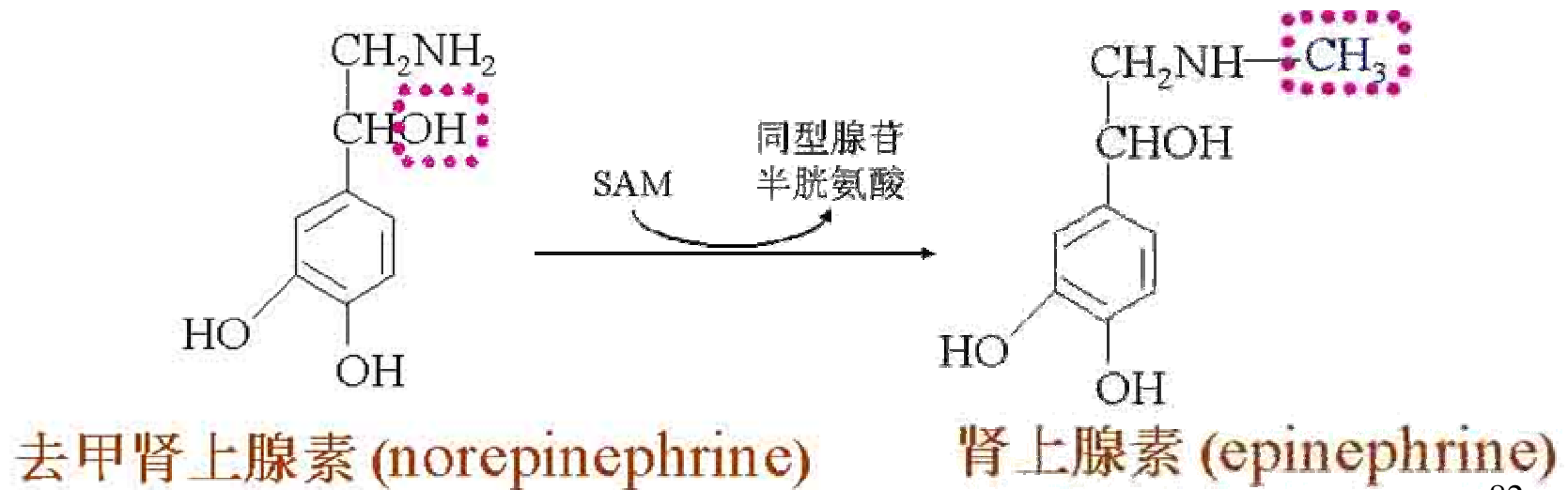
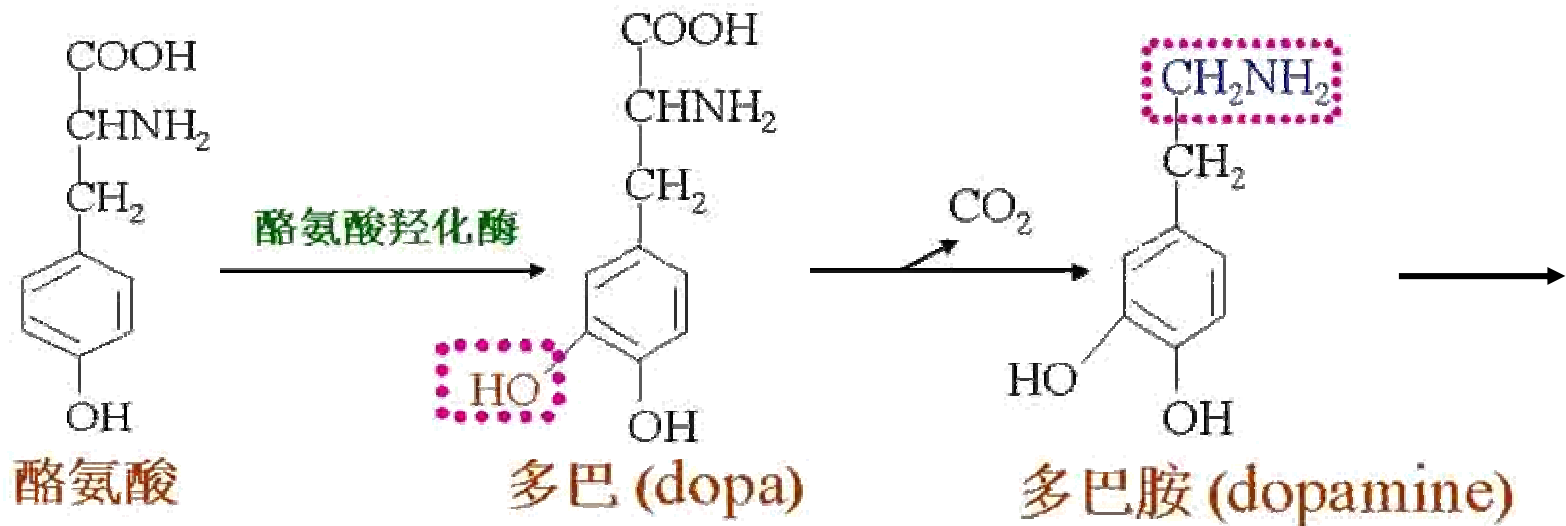
色氨酸



(一) 苯丙氨酸和酪氨酸的代谢

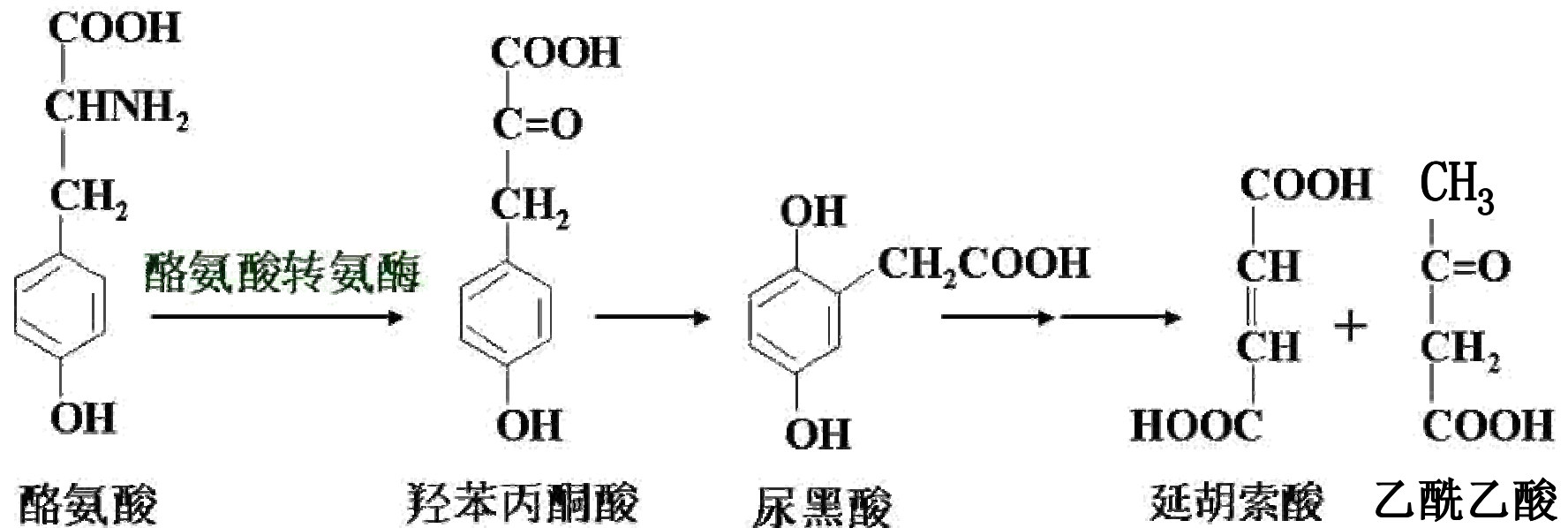


1. 儿茶酚胺(catecholamine)与黑色素(melanin)的合成



- 帕金森病(Parkinson disease)患者多巴胺生成减少。
- 在黑色素细胞中，酪氨酸可经酪氨酸酶等催化合成黑色素。
- 人体缺乏酪氨酸酶，黑色素合成障碍，皮肤、毛发等发白，称为白化病(albinism)。

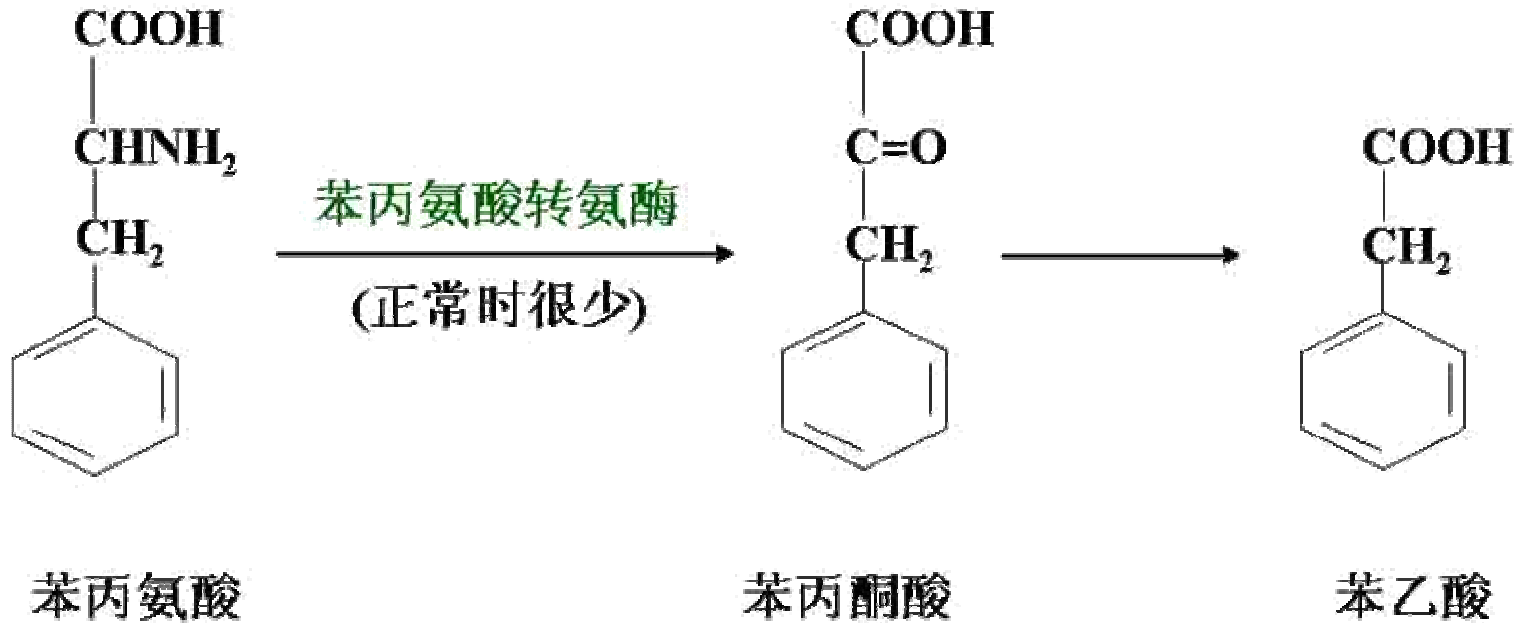
2. 酪氨酸的分解代谢



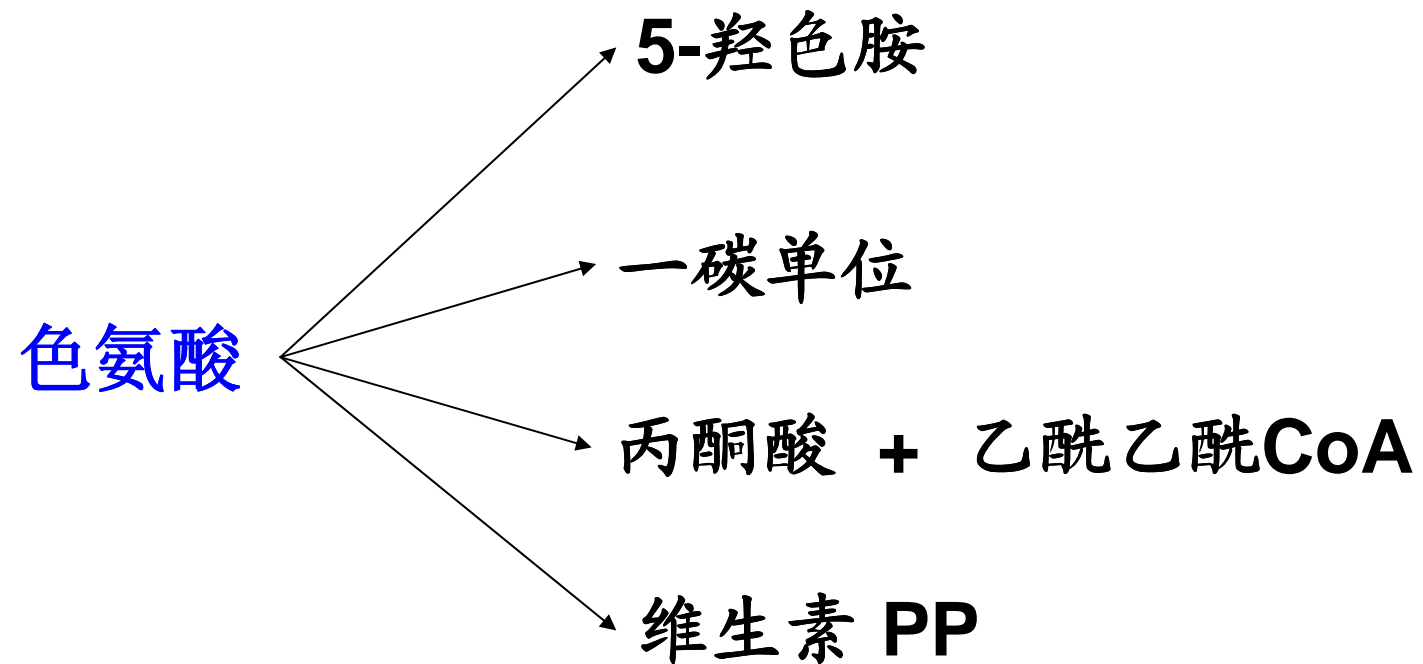
- 体内代谢尿黑酸的酶(尿黑酸氧化酶)先天缺陷时，尿黑酸分解受阻，可出现尿黑酸症。

3. 苯酮酸尿症(phenyl keronuria, PKU)

体内**苯丙氨酸羟化酶缺陷**，苯丙氨酸不能正常转变为酪氨酸，而是经转氨基作用生成苯丙酮酸、苯乙酸等。此时尿中出现大量苯丙酮酸等代谢产物，称为**苯酮酸尿症**，是一种遗传性疾病。



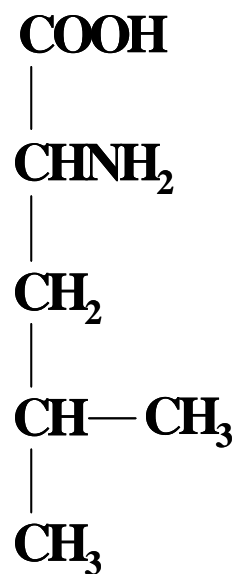
(二) 色氨酸代谢



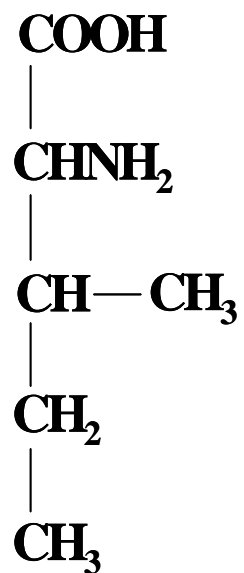
五、支链氨基酸的代谢

支链氨基酸

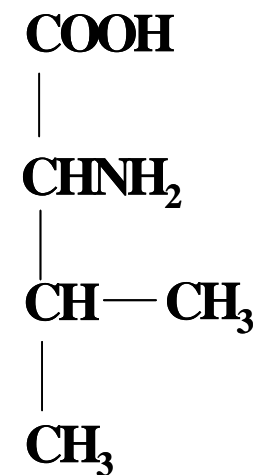
亮氨酸



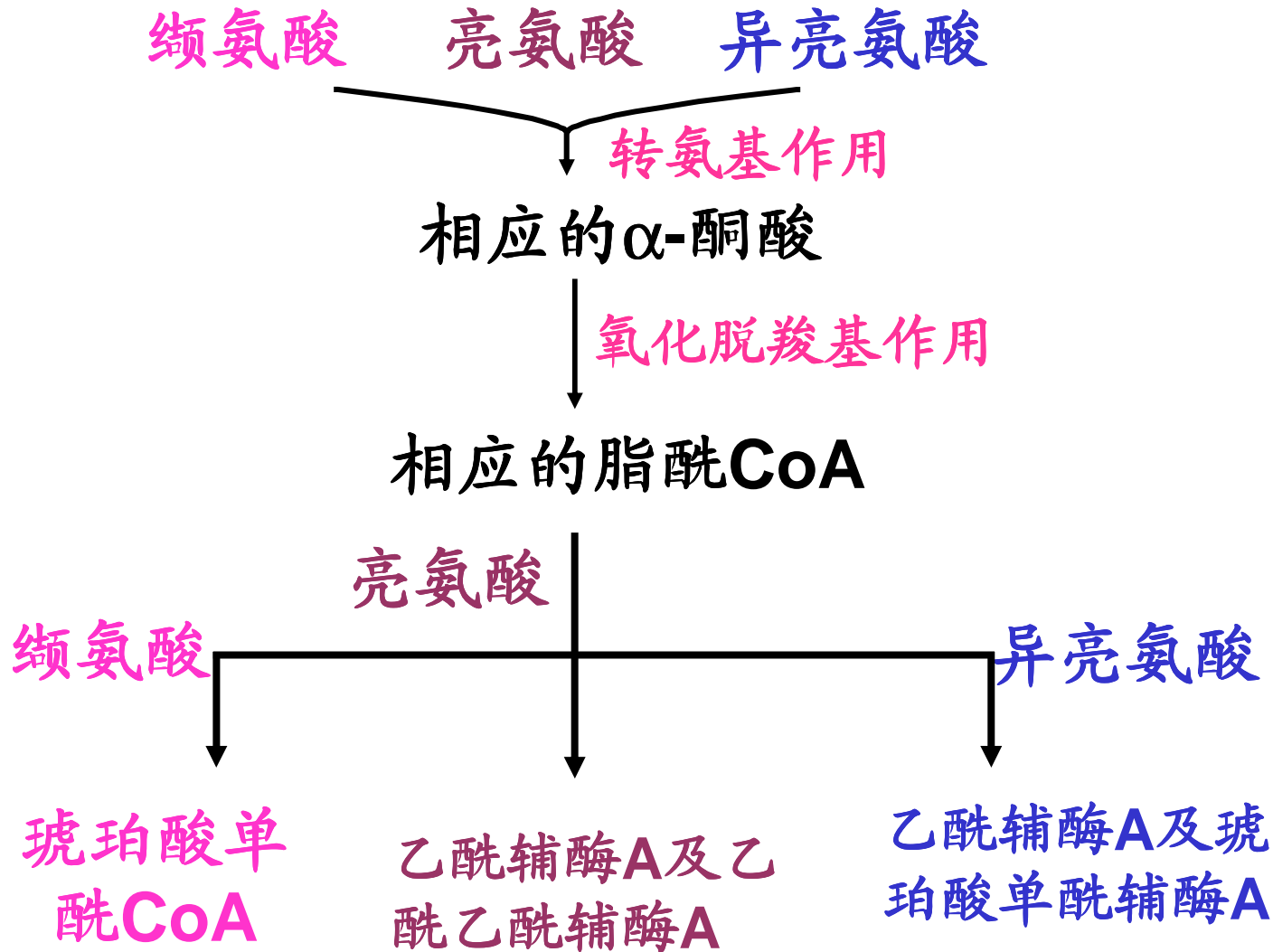
异亮氨酸



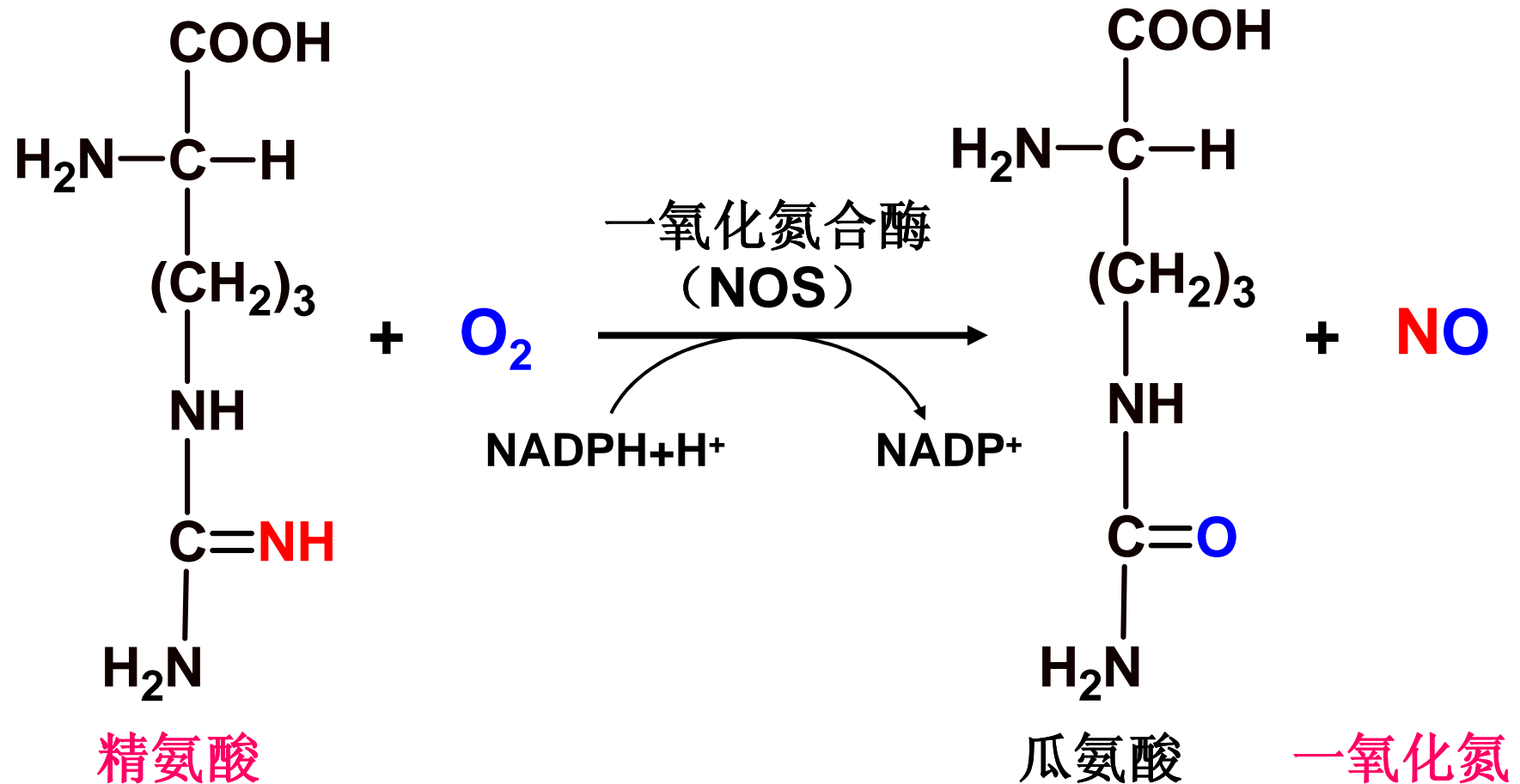
缬氨酸



➤ 代谢部位: 骨骼肌



➤ 一氧化氮的生成



Key Points

- 1、蛋白质的生理功能、必需氨基酸的概念、蛋白质的互补作用
- 2、食物蛋白质的消化、氨基酸的吸收、蛋白质的腐败作用
- 3、氨基酸的脱氨基的主要方式；转氨基作用、氧化脱氨基作用、联合脱氨基作用的两种类型
- 4、氨基酸碳骨架的代谢转变
- 5、血氨的来源及去路
- 6、氨的运输、谷氨酰胺在代谢中的作用

- 7、尿素的生成（部位、原料、限速酶、鸟氨酸循环的酶促反应过程、意义）
- 8、氨基酸脱羧酶的辅酶，**GABA**，组胺，**5-HT**，牛磺酸、多胺的生成及生理作用。
- 9、一碳单位的代谢（概念、主要载体、产生、形式及生理意义）
- 10、甲硫氨酸循环（定义、过程、意义）
- 11、**PAPS**的生成及作用
- 12、芳香族氨基酸代谢异常与遗传病的联系