



全国应用型本科院校化学课程统编教材

天然药物化学

Chemistry of Natural Medicine

罗永明 主编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国医药出版社 中国药科大学 中国药学会 中国中药协会

天然药物化学

Chemistry of Natural Medicines

第二版



中国医药出版社

天然药物化学

主 编	罗永明		
副主编	彭国平	何立巍	王凤舞
编 委	皮文霞	朱忠华	李 斌
	严鹏程	郑云枫	赵岩峰
	倪勤学	曾爱华	

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本书是根据全国应用型本科院校药学类各专业的培养目标和教学要求而编写的,具有鲜明的专业针对性和应用特色。全书共 10 章,系统地阐述了各类天然药物化学成分的结构分类、理化性质、提取分离和结构鉴定的方法与技术等,把基础知识融合到研究实例中,做到了理论与实际的有机结合,体现了基础知识、基本理论和基本操作的培养特点,以满足实际工作应用的需要。

本书适用于应用型本科院校药学类专业学生的教学,同时也可作为成人本科教育、高职教育和自学考试用参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

天然药物化学/罗永明 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2011.8

ISBN 978-7-5609-7041-7

I. 天… II. 罗… III. 生药学-药物化学-高等学校-教材 IV. R284

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 061624 号

天然药物化学

罗永明 主编

策划编辑:王新华

责任编辑:徐 航

封面设计:潘 群

责任校对:祝 菲

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉正风天下文化发展有限公司

印 刷:武汉科利德印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:18.5

字 数:485 千字

版 次:2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:33.00 元



华中科大

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

全国应用型本科院校化学课程统编教材

编 委 会

(排名不分先后)

- | | |
|-----|-----------------|
| 李青山 | 吉林大学珠海学院,教授 |
| 潘祖亭 | 武汉东湖学院,教授 |
| 尹 权 | 武汉大学,教授 |
| 李向荣 | 浙江大学城市学院,教授 |
| 孙延一 | 电子科技大学中山学院,教授 |
| 矫庆泽 | 北京理工大学珠海学院,教授 |
| 卢昌义 | 厦门大学嘉庚学院,教授 |
| 钱晓良 | 华中科技大学文华学院,教授 |
| 熊双贵 | 北京中医药大学东方学院,教授 |
| 李 伟 | 南京中医药大学,教授 |
| 陈昭国 | 武汉理工大学华夏学院,教授 |
| 干 信 | 武汉长江工商学院,教授 |
| 张 龙 | 长春工业大学,教授 |
| 曹 枫 | 湖州师范学院,教授 |
| 黄朝表 | 浙江师范大学,教授 |
| 李克华 | 长江大学工程技术学院,教授 |
| 王允祥 | 浙江农林大学,教授 |
| 罗永明 | 江西中医学院,教授 |
| 孙庆杰 | 青岛农业大学,教授 |
| 黄建华 | 河南科技学院,教授 |
| 李 峰 | 湖南文理学院,教授 |
| 高之清 | 聊城大学东昌学院,教授 |
| 刘灿明 | 湖南农业大学,教授 |
| 唐星华 | 南昌航空大学,教授 |
| 王玉田 | 辽宁医学院,教授 |
| 邴文思 | 成都理工大学工程技术学院,教授 |

前 言

进入新世纪以来,我国高等教育事业得到了巨大的发展,不仅学生数量快速增加,学校数量和层次也得到了很大的发展,因此,加强高等教育教材的建设与改革刻不容缓。本书属于全国应用型本科院校化学课程统编教材,是根据应用型本科院校药学类专业的培养目标及新时期对高等药学应用型人才的要求编写而成的。本书的编写思路是以科学发展观为指导,以适应 21 世纪高校“推进素质教育,培养创新人才”的需要,正确把握天然药物化学课程的教学内容与培养模式的改革方向,充分总结和吸收以往的教学经验和科研成果,博采和借鉴不同版本教材之所长,体现应用型本科院校的培养特色。在编写过程中,既注重基础知识和基本理论的掌握,又注重基本技能和综合应用,强调将基础知识、能力培养、素质提高融为一体,力争做到深入浅出,深浅适度,重点突出,简明实用,以满足培养应用型创新人才的需要。

全书按药学类专业所需知识和技能安排教材结构,重点突出天然药物化学成分提取、分离与鉴定的方法和技术,使基础知识、基本理论和基本操作的培养贯穿于教材始终,把基础知识融合到应用实例中,做到了理论与实际的有机结合。同时,还结合天然药物化学研究新进展,反映新的学科研究成果,拓展学生知识面,启发创新思维。在保证知识系统性、完整性的基础上,尽可能使介绍的内容符合实际工作应用的需要。适用对象以应用型本科院校学生为主,同时也可作为成人本科教育、高职教育和自学用参考教材。

本书编写任务由罗永明(江西中医学院,第一章)、李斌(江西中医学院,第二章)、彭国平(南京中医药大学,第三章)、郑云枫(南京中医药大学,第四章)、朱忠华(武汉理工大学华夏学院,第五章)、严鹏程(温州医学院,第五章)、倪勤学(浙江农林大学,第六章)、皮文霞(南京中医药大学,第七章)、赵岩峰(北京中医药大学东方学院,第八章)、何立巍(南京中医药大学,第九章)、王凤舞(青岛农业大学,第十章)、曾爱华(广东药学院)共十二位教师合作完成。在编写过程中,得到了华中科技大学出版社和编者所在院校的热情鼓励和大力支持,在此一并表示诚挚的谢意。

为使本书体现应用型本科院校药学类专业教学的特色,编者作了种种努力,但鉴于学术水平和编写能力有限,加上是首次编写应用型本科教材,书中难免有不当之处,敬请读者予以指正。

编 者

2011 年 3 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 天然药物化学成分的主要类型及生物合成	2
第三节 天然药物化学研究的作用和意义	11
第四节 天然药物化学的研究进展与发展趋势	13
第二章 天然药物化学成分的提取、分离和鉴定方法	15
第一节 天然药物化学成分的提取方法	15
第二节 天然药物化学成分的分离方法	19
第三节 天然药物化学成分的结构研究	33
第三章 糖和苷类化合物	48
第一节 概述	48
第二节 糖和苷的分类	48
第三节 糖的化学性质及苷键的裂解	58
第四节 糖和苷的提取与分离	66
第五节 糖和苷的结构研究	69
第六节 糖和苷类化合物的研究实例	74
第四章 苯丙素类化合物	77
第一节 概述	77
第二节 简单苯丙素类	78
第三节 香豆素类	80
第四节 木脂素	88
第五节 苯丙素类化合物的研究实例	99
第五章 醌类化合物	106
第一节 概述	106
第二节 醌类化合物的结构与分类	106
第三节 醌类化合物的理化性质	112
第四节 醌类化合物的提取与分离	115
第五节 醌类化合物的结构研究	117
第六节 醌类化合物的研究实例	122
第六章 黄酮类化合物	125
第一节 概述	125
第二节 黄酮类化合物的结构与分类	126
第三节 黄酮类化合物的理化性质	135
第四节 黄酮类化合物的提取与分离	140
第五节 黄酮类化合物的检识与结构研究	145

第六节 黄酮类化合物的研究实例·····	159
第七章 萜类和挥发油·····	162
第一节 概述·····	162
第二节 萜类的结构、分类及重要化合物·····	164
第三节 萜类化合物的理化性质·····	176
第四节 萜类化合物的提取与分离·····	179
第五节 萜类化合物的结构研究·····	181
第六节 挥发油·····	185
第八章 三萜类化合物·····	195
第一节 概述·····	195
第二节 三萜类化合物的结构与分类·····	196
第三节 三萜类化合物的理化性质·····	206
第四节 三萜类化合物的提取与分离·····	209
第五节 三萜类化合物的结构研究·····	211
第六节 三萜类化合物的研究实例·····	217
第九章 甾体及其苷类·····	221
第一节 概述·····	221
第二节 强心苷类·····	223
第三节 甾体皂苷·····	236
第四节 其他甾体化合物·····	244
第五节 甾体化合物的研究实例·····	251
第十章 生物碱·····	256
第一节 概述·····	256
第二节 生物碱的结构与分类·····	258
第三节 生物碱的理化性质·····	269
第四节 生物碱的提取与分离·····	274
第五节 生物碱的结构测定·····	279
第六节 生物碱类化合物的研究实例·····	285
主要参考文献·····	290

第一章 绪 论

第一节 概 述

天然药物是指来源于植物、动物和微生物等天然生物资源及其经人工修饰而获得的药物,以植物来源为主,种类繁多。自古以来,人类在与疾病作斗争的过程中,不断积累了丰富的天然药物应用经验,形成了传统医药学。在中国,天然药物又称中草药,是中华民族几千年文明的结晶:《神农本草经》记载药物 365 种;明代的《本草纲目》记载药物 1 892 种;迄今记载药物最全的《中华本草》共收录中草药达 8 980 种;《民族药卷》分别收录藏药 396 种,蒙药 422 种,维吾尔药 423 种和傣药 400 种。这些天然药物的应用,对民族的生存和繁衍起着不可替代的作用,为保障人民的身体健康作出了巨大的贡献。随着人类文明的发展和科学技术的进步,天然药物的来源不断拓展,应用技术不断丰富,研究与应用产生了质的飞跃。天然药物的应用形式从用生物体、器官或生物组织入药转变为用生物体的有效化学组分或化学成分及其人工合成产物入药,成为现代药物的一个重要组成部分,实现了传统药理学向现代药物学的转变。

天然药物化学是运用现代科学理论与方法研究天然药物中化学成分的一门学科。天然药物之所以能够防病治病,其物质基础就是其中所含的化学成分;天然药物中具有生物活性、能起到防病治病作用的单一化学成分称为有效成分,如小檗碱(berberine)、麻黄碱(ephedrine)、芦丁(rutin)等;不具有生物活性、不能起防病治病作用的化学成分称为无效成分,如普通的蛋白质、碳水化合物、油脂等。另外,通常将反映某天然药物临床疗效的生物活性的化学成分称为有效成分,而把某天然药物中不反映临床疗效但具有其他方面生物活性的化学成分称为活性成分。

天然药物中的化学成分十分复杂:从化学结构看,一种天然药物含有多种结构类型的化学成分,而且每一种结构类型的化学成分的数目都很多;从生物活性看,一种天然药物具有多方面的药效通常是由于含有多种有效成分,且某一方面的药效通常含有一种以上的有效成分。天然药物中复杂的化学成分构成了其多方面临床功效或多种药理作用的物质基础。需要特别指出的是,有效成分与无效成分的划分是相对的,一些曾被认为是无效成分的物质如多糖、蛋白质等,通过深入研究也发现其中不少具有重要的生物活性。另外,常将含有一种主要有效成分或一组结构相近有效成分的天然药物提取分离部分称为有效部位,如人参总皂苷、银杏总黄酮、苦参总碱等。这些有效部位中还含有少量的其他杂质。

天然药物化学的研究对象是天然药物中防治疾病的物质基础——化学成分,主要研究天然药物中化学成分(主要是有效成分和活性成分)的结构分类、理化性质、提取分离、结构测定等方面的理论知识和实践技术。由于天然药物中化学成分结构复杂、种类繁多、含量差别大、理化性质迥异,所以天然药物中化学成分的提取、分离和精制是一项艰巨而细致的工作。

第二节 天然药物化学成分的主要类型及生物合成

一、天然药物化学成分的主要类型

天然药物的化学成分结构复杂、数量繁多,既包括组成生物体的化学物质,也包括生物体新陈代谢过程中的一系列产物,以及生命活动的作用物质。因此天然药物化学成分通常可根据其化学结构、生理活性、来源、生源关系和生源结合化学结构进行分类。常见类型的天然药物化学成分如下。

1. 生物碱

生物碱是存在于生物体内的一类含氮有机化合物,通常具有碱的性质,能与酸结合成盐。生物碱具有多样而显著的生物活性,是天然药物化学重要的研究领域之一。

2. 糖和苷类

糖类是植物中普遍存在的化学成分,糖类又可分为单糖、低聚糖和多糖等。糖类极性较大,除多糖外其他都易溶于水。天然药物中常见的多糖有淀粉、菊糖、果胶、树胶和黏液质等,均是由10个以上单糖通过糖苷键聚合而成的高分子化合物,无一般单糖的性质,在天然药物化学成分的提取和精制中通常作为杂质而被除去。

苷类是指糖或糖的衍生物与非糖物质(称为苷元或配基)通过糖的端基碳原子连接而成的化合物。苷类也是极性较大的化合物,能溶于水、甲醇和乙醇等极性溶剂,而难溶于氯仿、苯和乙酸乙酯等低极性溶剂。苷元则大多难溶于水,易溶于有机溶剂。

3. 醌类

醌类是分子中具有醌式结构的一类化合物,其中蒽醌类(anthraquinone)化合物数量较多。天然存在的醌类化合物母核上常具有酚羟基,呈一定的酸性,在植物体内以游离形式和与糖结合成苷的形式存在。

4. 苯丙素类

苯丙素类是以苯丙基为基本骨架单位的一类化合物,其典型的化合物有香豆素(coumarin)和木脂素(lignan)。香豆素具有苯并 α -吡喃酮母核,具有内酯环的性质,环上常常有羟基、烷氧基、苯基和异戊烯基等取代基,其中异戊烯基的活泼双键与苯环上的邻位羟基可形成呋喃环和吡喃环的结构。木脂素是一类由苯丙素氧化聚合而成的结构多样的天然产物,多数呈游离状态,只有少数与糖结合成苷而存在,分子中具有手性碳,故大多具有光学活性。游离的木脂素亲脂性较强,成苷后的木脂素极性增大,水溶性也增加。木脂素类结构类型多样,生物活性显著。

5. 黄酮类

黄酮类是指两个苯环通过中间三碳链连接而成的一类化合物。该类化合物在植物体中多数与糖类结合成苷而存在,部分以游离状态存在。黄酮类化合物分子中具有酚羟基,故显酸性,在植物界分布广泛,生物活性多样。

6. 萜类

萜类是指由甲戊二羧酸(mevalonic acid, MVA)衍生而成的一类化合物。该类化合物基本母核的组成符合 $(C_5H_8)_n$ 的通式,可分为单萜、倍半萜、二萜、三萜等。萜类化合物在自然界

分布广泛,种类繁多且生物活性多样。游离的萜类化合物亲脂性较强,但苷化后也具有一定的亲水性。单萜和倍半萜类是植物挥发油的主要成分。

7. 甾体化合物

甾体化合物是指结构中具有环戊烷并多氢菲母核的一类化合物。根据其17位上的侧链又可分为若干类型:当17位上的侧链是不饱和内酯环时,称为强心苷类;17位上的侧链具含氧螺杂环时,称为甾体皂苷类;17位上的侧链为脂肪烃时,称为植物甾醇等。甾体化合物是自然界广泛存在的一类化学成分,种类很多,生物活性不同,对动、植物的生命活动起着重要的作用。游离的甾体化合物通常是亲脂性的,苷化后也具有较强的亲水性。甾体皂苷的水溶液多具有发泡性、溶血性。

8. 有机酸

有机酸是指分子结构中具有羧基(不包括氨基酸)的一类酸性有机化合物。有机酸在植物体内大多与钾、钠、钙、镁离子及生物碱结合成盐而存在,常见的有柠檬酸、苹果酸、琥珀酸等。低级脂肪酸易溶于水、乙醇等,难溶于有机溶剂;高级脂肪酸及芳香酸较易溶于有机溶剂而难溶于水;有机酸盐一般溶于水而难溶于有机溶剂。

9. 鞣质

鞣质又称单宁(tannin)或鞣酸(tannic acid),是一类分子较大、结构复杂的多元酚类化合物。鞣质具有较强的极性,在提取天然药物中的有效成分时常作为杂质而被除去。

10. 氨基酸、蛋白质和酶

分子中含有氨基和羧基的化合物称为氨基酸,构成生物有机体蛋白质的氨基酸大多是 α -氨基酸。氨基酸一般易溶于水,难溶于有机溶剂。在等电点时氨基酸在水中的溶解度最小,因此,可利用调节等电点的方法对氨基酸类化合物进行分离。蛋白质是由 α -氨基酸通过肽链结合而成的一类高分子化合物,由于组成氨基酸的不同和空间构型的不同而形成多种蛋白质。蛋白质大多能溶于水形成胶体溶液。高温、强酸、强碱和浓醇等因素可导致蛋白质变性。酶是生物体内具有催化能力的蛋白质,其催化作用具有专一性,通常一种酶只能催化某一种特定的反应,如蛋白酶只能催化蛋白质分解成氨基酸,脂肪酶只能催化脂肪水解成为脂肪酸和甘油。植物中所含的苷类往往与某种特殊的酶共存于同一组织的不同细胞中,当细胞裂解酶与苷接触时即可使苷发生水解。

除上述类型化合物外,植物中还有一些数量较少的结构类型。另外,近年来从微生物和海洋生物中分离得到许多结构新颖的天然化合物还无法按照上述类别进行归类。

二、天然药物化学成分的生物合成

天然药物以植物来源为主,因此在介绍天然药物化学成分时主要介绍来源于植物的化学成分。而林林总总的植物化学成分是如何产生的?它们在植物体内又有何种内在联系和形成规律?为了回答这些问题,有必要了解其化学成分的来源,掌握植物中化学成分的生成、分布、富集和代谢规律,这是进行天然药物化学成分研究的重要基础。

植物在新陈代谢过程中发生着一系列的生物合成反应,通常用生源(biogenesis)或生物合成(biosynthesis)来表述这一生物化学过程。生物合成反应产生出结构千差万别的化学成分,这些成分按生物合成途径可分为一次代谢产物和二次代谢产物。一次代谢产物是每种植物中普遍存在的、维持有机体正常生存的必需物质,如叶绿素、糖类、蛋白质、脂类和核酸等。二次

代谢是在特定的条件下,以一些重要的一次代谢产物如乙酰辅酶 A、丙二酸单酰辅酶 A、莽草酸及一些氨基酸等作为前体或原料,进一步经不同的代谢过程而生成的生物碱、黄酮、萜类等。二次代谢对维持植物生命活动不起重要作用,二次代谢产物并非存在于每种植物之中,但二次代谢产物的结构富于变化,其中不少具有明显的生物活性,是天然药物化学研究的主要对象。植物体内的物质代谢与生物合成过程如图 1-1 所示。

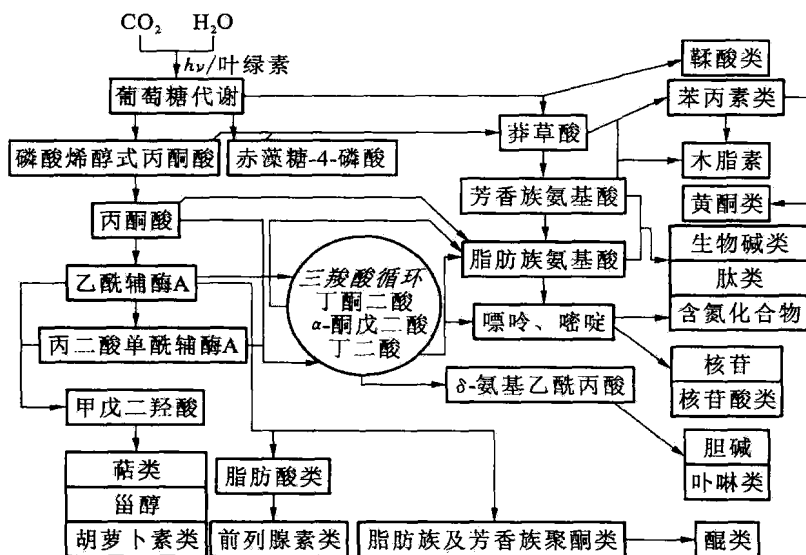


图 1-1 植物体内的物质代谢途径及其代谢产物之间的关系

(一) 天然药物化学成分生物合成的主要构件

天然药物化学成分类型众多、结构复杂、千变万化,然而其结构间存在着一定的联系,仔细加以分析便可发现它们都是由一定的基本单位按不同的方式组合而成的。如苯丙素类化合物具有 C_6C_3 单位;萜类化合物具有重复的 C_5 单位;脂肪酸、酚类、醌及聚酮类化合物具有 C_2 单位;生物碱类化合物具有氨基酸单位;黄酮类化合物具有 $C_6C_3C_6$ 单位等。从生物合成的观点来看,所有天然有机化合物都是由有限的前体物(关键中间体)生物合成而来的。这些被称为有限前体物或关键中间体的物质是构成天然有机化合物分子的基本构件(building block)或单元(unit),主要包括以下几种。

1. C_1 单元

C_1 单元是最简单的生物合成的构件,通常形成 CH_3 ,且常连接氧(OCH_3)或氮(NCH_3),偶尔接于碳上(CCH_3)。它来源于甲硫氨酸(L-methionine)的 SCH_3 。

2. C_2 单元

C_2 单元又称为乙酸乙酯单元,来源于乙酰辅酶 A 或丙酰辅酶 A,由 C_2 单元形成的酯中简单的有 CH_2CH_3 ,而更多的是形成长链烷化物(如脂肪酸等)或芳香体系部分(如酚类、聚酮类等)。

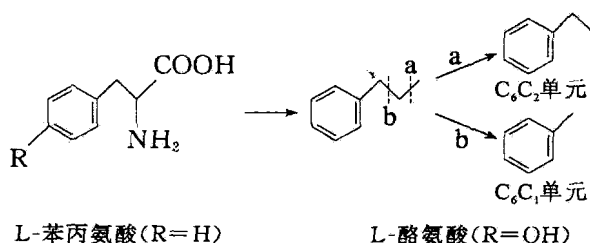
3. C_5 单元

C_5 单元通常称为异戊烯单元,是由甲戊二羧酸(MVA)脱羧或由 2-甲基-D-赤藓糖-4-磷酸酯(MEP)形成的。 C_5 单元是形成萜类和甾体化合物的单元。

4. C_6C_3 单元

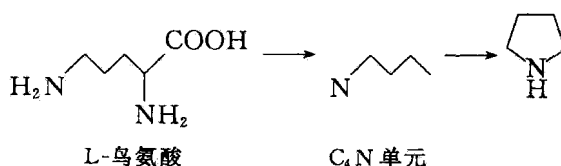
C_6C_3 单元通常称为苯丙素单元,被认为是 L-苯丙氨酸或 L-酪氨酸脱氨基后形成的。

C_3 侧链处于饱和或不饱和状态,且可被氧化降解失去一个碳形成 C_6C_2 单元或失去两个碳形成 C_6C_1 单元。 C_6C_3 单元是合成酚类、苯丙素类化合物的单元。



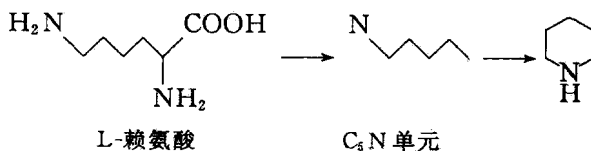
5. C_4N 单元

C_4N 单元来源于 L-鸟氨酸,氮来自于 δ -氨基,而非 α -氨基,即 L-鸟氨酸中羧基与 α -氨基同时失去。



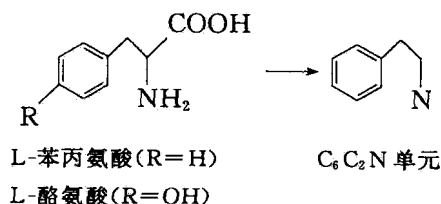
6. C_5N 单元

C_5N 单元与 C_4N 单元产生途径相同,但底物是 L-赖氨酸,且保留的是 ϵ -氨基氮。该单元多形成多环体系的天然含氮化合物。



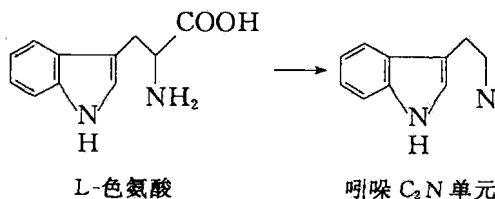
7. C_6C_2N 单元

C_6C_2N 单元来源于 L-苯丙氨酸或 L-酪氨酸,更多的是后者。



8. 吲哚 C_2N 单元

吲哚 C_2N 单元是由色氨酸脱羧产生的,常见于吲哚生物碱中。



上述几个含氮的构件统称为氨基酸单元,故又可将生物合成的主要构件概括成 C_1 、 C_2 、 C_5 、 C_6C_3 和氨基酸单元。许多天然化合物仅由一种单元所形成,但是也有很多天然化合物是由一种以上的复合单元形成的,如图 1-2 所示。

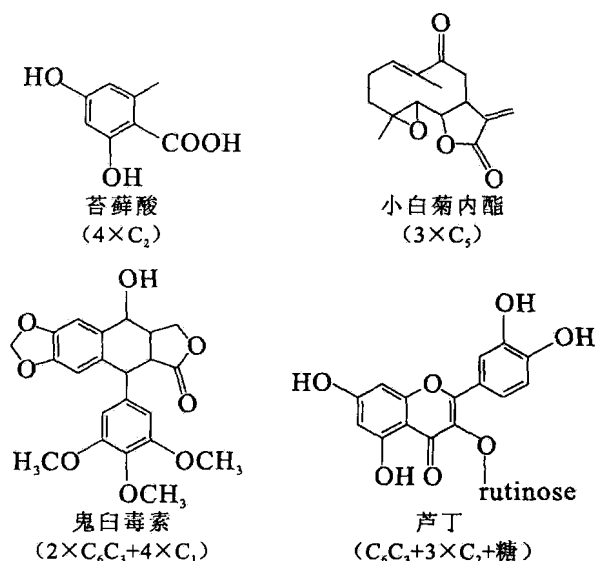


图 1-2 由基本构件生物合成的复杂天然产物

(二) 天然药物化学成分生物合成的原理

天然药物化学成分生物合成的机制涉及有机化学或生物化学的反应。这些反应主要有：烷基化、醇醛缩合与克莱森缩合、席夫碱形成与 Mannich 反应、Wager-Meerwein 重排与碳正离子重排、转氨化与氨基化、脱羧与羧基化、氧化与还原以及苷化。这些反应的历程和热力学类似于有机化学。产物合成过程中由多次环合和各种酶促反应引起的 C—C、C—N、C—O 键形成与裂解，以及环系的种种修饰(如脱氢酶、转氨酶、脱羧酶、氧化/还原酶、异构酶、羟化酶、转甲基酶等)都能使天然药物中化学成分的数量增加。

(三) 主要生物合成途径

1. 乙酸-丙二酸途径(acetate-malonate pathway)

脂肪酸类、酚类、萜醌类等化合物是由乙酸-丙二酸途径合成的。

1) 脂肪酸的生物合成

乙酰辅酶 A(acetyl-CoA)是这一合成过程的起始物质，丙二酸单酰辅酶 A(malonyl-CoA)起延伸碳链的作用。由缩合及还原两个反应交叉进行，生成各种长碳链的脂肪酸，得到的饱和脂肪酸含碳数均为偶数(见图 1-3)。如果起始物质为丙酰辅酶 A(propionyl-CoA)，则产生含碳数为奇数的脂肪酸。

2) 酚类的生物合成

酚类的生物合成过程中只发生缩合反应。乙酰辅酶 A 直线聚合后再进行环合，生成各种酚类化合物，其特点是产物具有间苯酚结构(见图 1-4)。

3) 萜及萜醌类的生物合成

乙酸-丙二酸途径通过多酮环合生成各种醌类化合物或聚酮类化合物(见图 1-5)。

2. 甲戊二羧酸途径(mevalonic acid pathway)

萜类、甾体化合物均由甲戊二羧酸途径生成。由乙酰辅酶 A 歧式聚合生成的甲戊二羧酸单酰辅酶 A 是植物体内生物合成各种萜类、甾体化合物的基本单位(见图 1-6)。生物体内真正的异戊基单位为焦磷酸 γ, γ -二甲烯丙酯(DMAPP)及其异构体焦磷酸异戊烯酯(IPP)，它们均由甲戊二羧酸(MVA)变化而来，在相互连接时一般为头尾相接，自三萜起是尾尾相接方式。

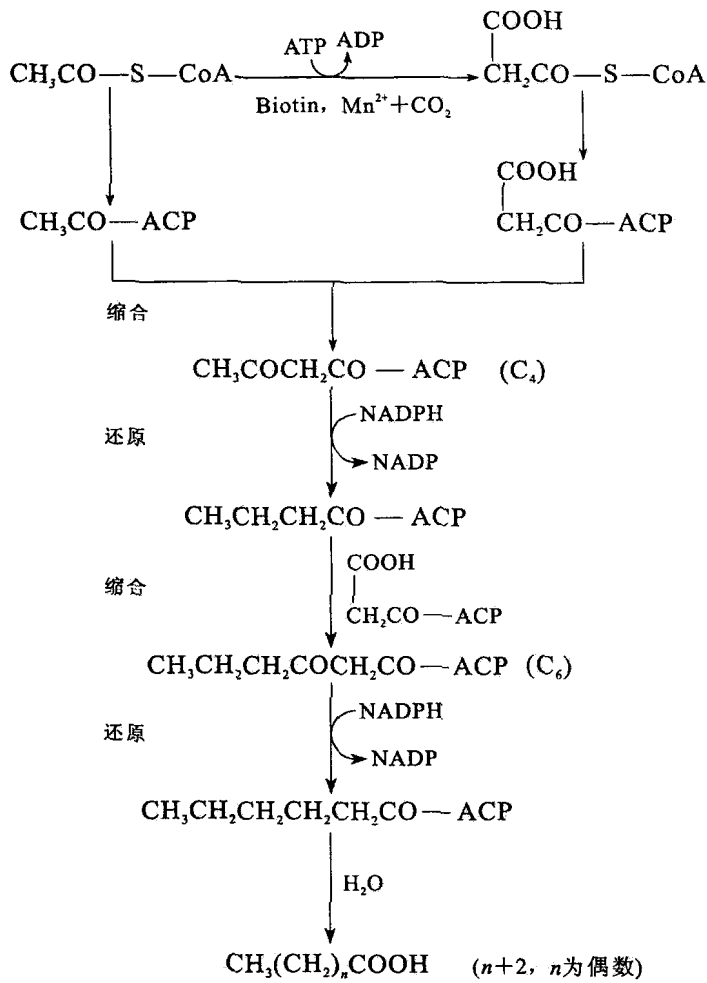


图 1-3 饱和脂肪酸的生物合成途径

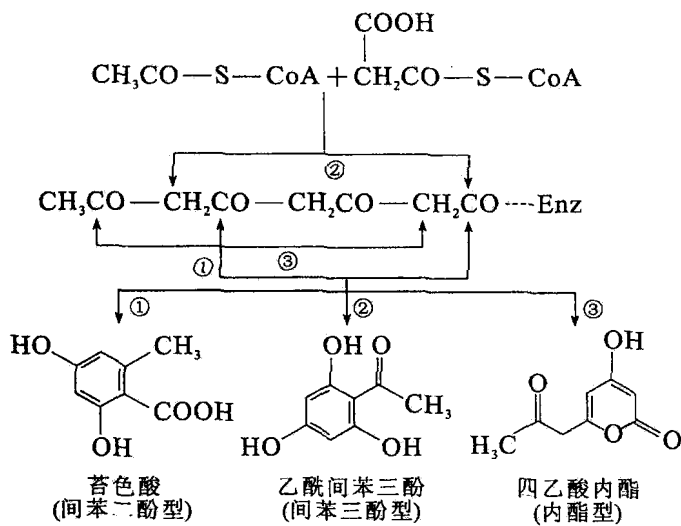


图 1-4 酚类的生物合成途径

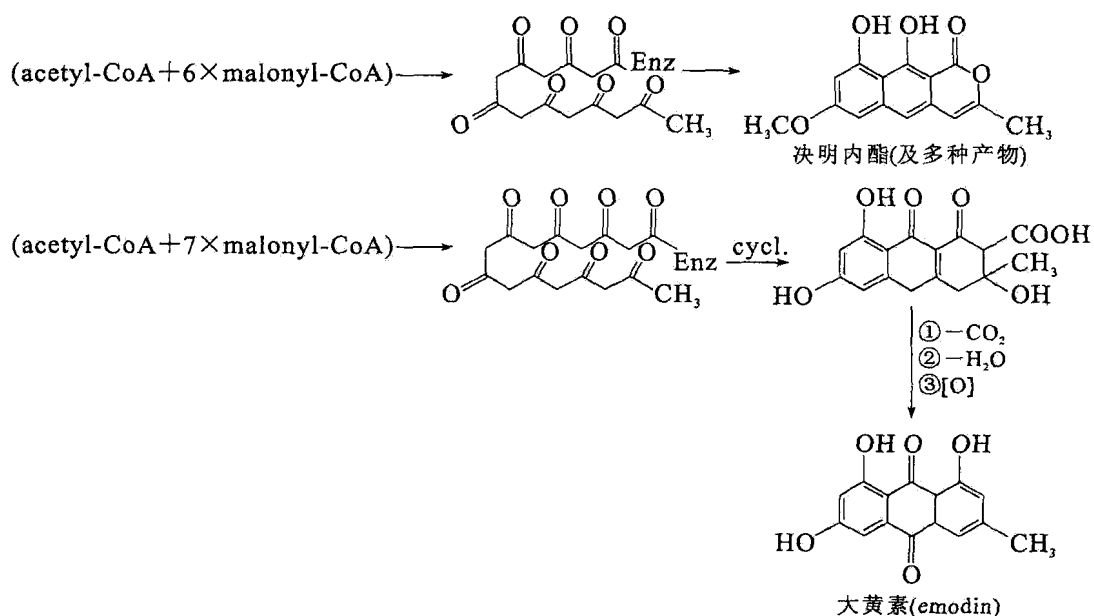


图 1-5 萘醌类的生物合成途径

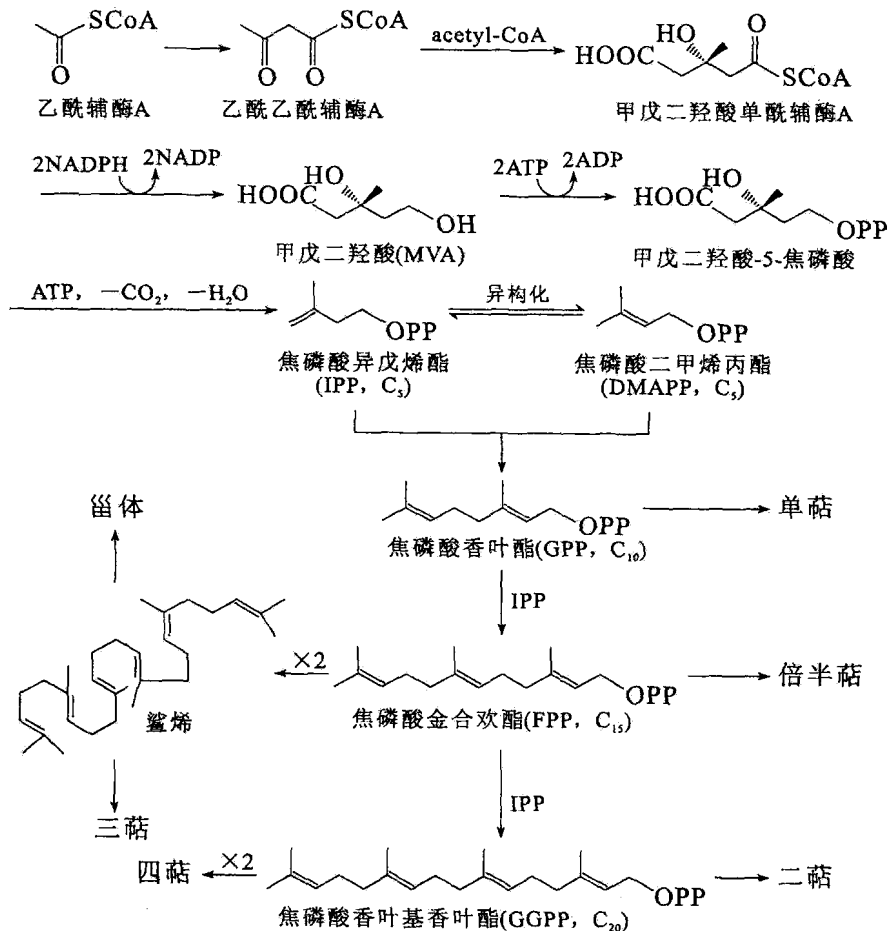


图 1-6 萜类、甾体化合物的生物合成途径

3. 莽草酸途径(shikimic acid pathway)及桂皮酸途径(cinnamic acid pathway)

1) 莽草酸途径

一级代谢过程中的丙酮酸磷酸酯(PEP)和赤藓糖-4-磷酸酯(DEP)缩合后,通过环合、还原等过程,生成莽草酸、奎宁酸、分支酸等重要中间体,进而生物合成一系列天然产物(见图 1-7)。

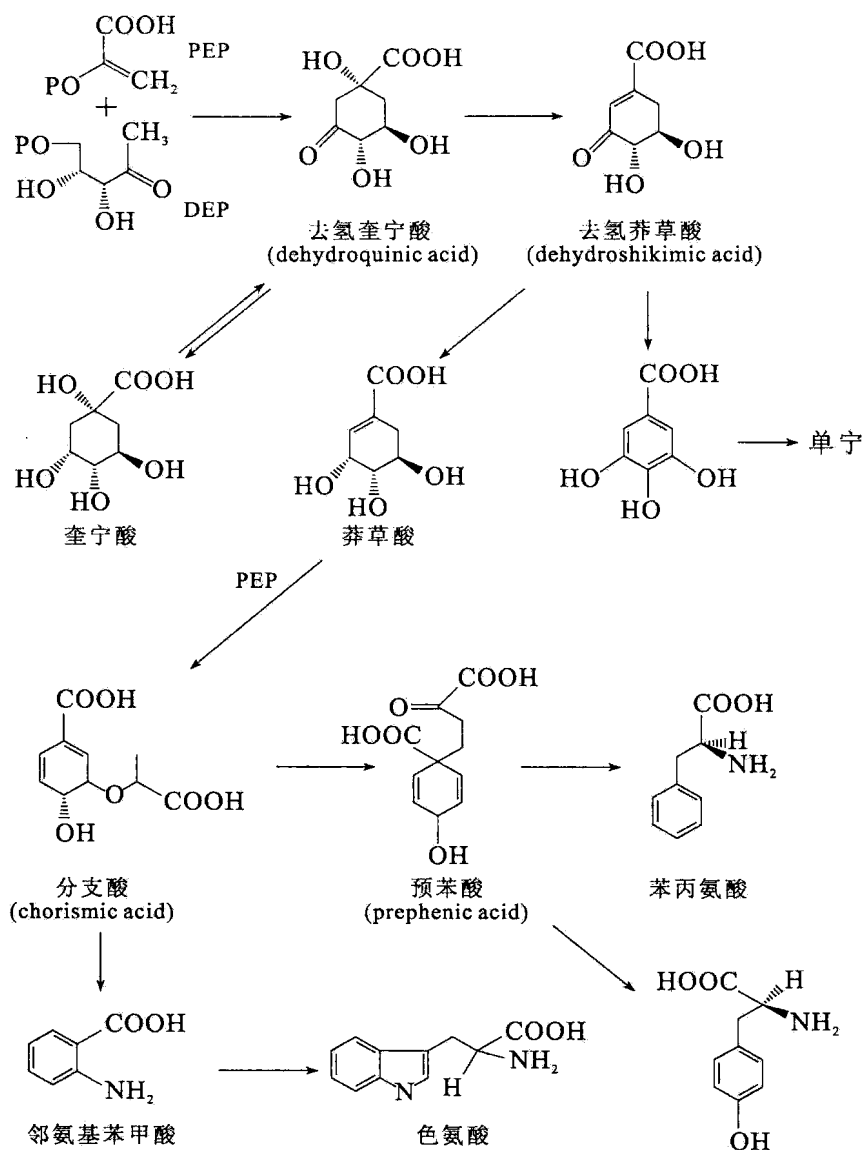


图 1-7 莽草酸途径生物合成莽草酸、奎宁酸、分支酸等中间体

2) 桂皮酸途径

由莽草酸途径生成的苯丙氨酸,经脱氨及氧化等反应分别生成桂皮酸。之后由桂皮酸、苯甲酸生物合成各种含 C_6C_3 及 C_6C_1 结构的天然化合物,如苯丙素类、木脂素类、香豆素类等(见图 1-8)。