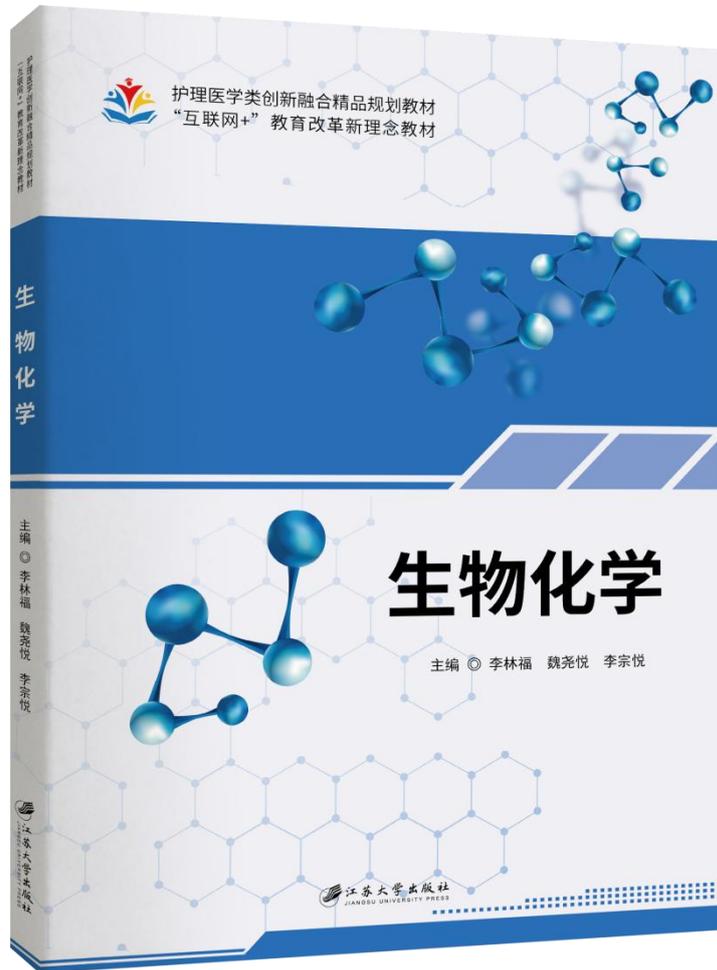


生物化学



类目：医学类

书名：生物化学

主编：李林福 魏尧悦 李宗悦

出版社：江苏大学出版社

开本：大 16 开

书号：978-7-5684-2677-0

使用层次：通用

出版时间：2026 年 1 月

定价：49.80 元

印刷方式：双色

是否有资源：有

责任编辑：李菊萍
封面设计：旗语书装

医学类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革创新理念教材



医学类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革创新理念教材

生物化学

生物化学

生物化学

主编 © 李林福 魏尧悦 李宗悦

主编 © 李林福 魏尧悦 李宗悦



定价：49.80元

江苏大学出版社

江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS



医学类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革创新理念教材

生物化学

主 编 © 李林福 魏尧悦 李宗悦
副主编 © 刘晓燕 陶成交 包七十三
 赵丽芳 赵博宇 李凤丽
 张慧姝 孙先锋 何 晨
 王立芳 李翠祥

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

图书在版编目 (CIP) 数据

生物化学 / 李林福, 魏尧悦, 李宗悦主编. -- 镇江:
江苏大学出版社, 2026. 1. -- ISBN 978-7-5684-2677-0
I. Q5
中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025F7Y801 号

生物化学

Shengwu Huaxue

主 编 / 李林福 魏尧悦 李宗悦

责任编辑 / 李菊萍

出版发行 / 江苏大学出版社

地 址 / 江苏省镇江市京口区学府路 301 号 (邮编: 212013)

电 话 / 0511-84446464 (传真)

网 址 / <http://press.ujs.edu.cn>

印 刷 / 河北龙大印务有限公司

开 本 / 880 mm×1 230 mm 1/16

印 张 / 13.5

字 数 / 389 千字

版 次 / 2026 年 1 月第 1 版

印 次 / 2026 年 1 月第 1 次印刷

书 号 / ISBN 978-7-5684-2677-0

定 价 / 49.80 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系 (电话: 0511-84440882)

前 言

生物化学是关于生命化学本质的科学。生物化学主要研究生物体的化学组成与化学变化及其调控规律，尤其关注生物大分子的结构与功能、物质和能量的代谢与调节、遗传信息的传递与表达，从而在分子水平上揭示生命现象的化学本质与活动规律。生物化学诞生至今，已经取得了很大的进展，特别是 DNA 双螺旋结构的提出，开启了生命科学研究的分子时代，并助推了分子生物学的诞生和发展。目前生物化学携手分子生物学，成为引领生命科学领域发展的重要基础性学科，其发展成果与技术应用已渗透到与生命科学相关的基础性与应用性学科领域，在工业、农业、医药、卫生等领域亦得到广泛应用。

本书对生物化学的基础知识进行了较为详细的阐述，内容深浅适度，且注重连贯性与系统性。与目前多数生物化学教材不同，本书编入了糖类化学和脂类化学的内容，使内容更加完整和系统，适用范围更广，在教学中可以根据实际需要进行取舍。

全书共十二章，包括糖类化学、脂类化学、蛋白质化学、核酸化学、酶、维生素、生物氧化、糖类代谢、脂类代谢、氨基酸代谢、核苷酸代谢、蛋白质的生物合成。

由于生物化学内容不断更新与发展，更由于我们水平和经验有限，本书难免存在疏漏之处，敬请广大师生和其他读者批评指正。

编 者

2025 年 10 月

目录

绪论 / 1

简答题 / 4

第一章 糖类化学 / 5

第一节 单糖 / 6

第二节 低聚糖 / 13

第三节 多糖 / 16

简答题 / 22

第二章 脂类化学 / 23

第一节 脂肪 / 24

第二节 类脂 / 28

简答题 / 32

第三章 蛋白质化学 / 33

第一节 概述 / 34

第二节 氨基酸 / 36

第三节 蛋白质的分子结构 / 44

第四节 蛋白质的主要性质 / 55

简答题 / 59

第四章 核酸化学 / 60

第一节 概述 / 61

第二节 核酸的化学组成 / 62

第三节 核酸的分子结构 / 66

第四节 核酸的理化性质 / 76

简答题 / 79

第五章 酶 / 80

第一节 酶的概述 / 81

第二节 酶的催化作用 / 85

第三节 影响酶促反应速率的因素 / 91

简答题 / 98

第六章 维生素 / 99

第一节 水溶性维生素 / 100

第二节 脂溶性维生素 / 108

简答题 / 112

第七章 生物氧化 / 113

第一节 生物氧化概述 / 114

第二节 电子传递链 / 119

第三节 氧化磷酸化 / 124

简答题 / 127

第八章 糖类代谢 / 128

第一节 多糖及二糖的酶促降解 / 129

第二节 糖的分解代谢 / 131

第三节 糖的合成代谢 / 146

简答题 / 154

第九章 脂类代谢 / 155

第一节 脂肪的分解代谢 / 156

第二节 脂肪的合成代谢 / 163

简答题 / 171

第十章 氨基酸代谢 / 172

第一节 蛋白质的酶促降解 / 173

第二节 氨基酸的分解代谢 / 173

第三节 氨基酸的合成代谢 / 183

简答题 / 186

第十一章 核苷酸代谢 / 187

第一节 核酸的降解 / 188

第二节 核苷酸的分解代谢 / 188

第三节 核苷酸的合成代谢 / 190

简答题 / 194

第十二章 蛋白质的生物合成 / 195

第一节 RNA 在蛋白质生物合成中的作用 / 196

第二节 蛋白质生物合成的过程 / 201

简答题 / 206

参考文献 / 207



绪 论

一、生物化学概述

(一) 生物化学的定义

生物化学 (biochemistry) 是运用化学的理论、方法和技术, 从分子水平研究生命现象的一门科学。它以生物体为研究对象, 研究生物体的物质组成、分子结构及其功能, 生物体内物质代谢及其调控, 以及生物体内遗传信息的传递等。

(二) 生物化学的分类

根据研究内容, 生物化学可以分为静态生物化学和动态生物化学。静态生物化学研究生物体的化学物质组成及这些物质的结构、性质和功能。静态生物化学按照研究的物质不同又可以分为糖类化学、脂类化学、蛋白质化学、核酸化学、酶学等。动态生物化学研究组成生物体的有机化合物在机体内发生的各种化学变化及其联系, 即生命物质在体内的物质代谢、能量代谢及代谢调控。分子生物学 (molecular biology) 是从分子水平研究生物大分子的结构和功能, 从而阐明生命现象本质的科学, 其研究对象主要是蛋白质、核酸等生物大分子。

根据研究对象, 生物化学可以分为动物生物化学、植物生物化学、微生物生物化学。如果研究对象包括动物、植物和微生物, 则称之为普通生物化学。

根据研究领域, 生物化学可以分为工业生物化学、农业生物化学、医学生物化学、食品生物化学等。

二、生物化学的研究内容

(一) 研究生物体内物质的组成、结构、性质及功能

1. 生物体的化学组成

自然界所有的生物在化学本质上都是由水、无机离子和有机分子组成的。组成生物体最基本的化学元素是 C、H、O、N, 这 4 种元素与 S、P、Cl、Ca、K、Na 和 Mg 共 11 种元素, 占生物体总质量的 99% 以上, 称为常量元素; Fe、Cu、Co、Mn 和 Zn 是存在于生物体中的主要微量元素; Al、As、B、Br、Cr、F、Ga、I、Mo、Se、Si 在生物体中的含量极少。

2. 生物分子

生物分子是生物体和生命现象的结构和功能基础, 是生物化学研究的基本对象。

生物分子分为大分子和小分子两类。多糖、结合状态的脂质、蛋白质、核酸是生物大分子, 它们种类繁多、分子结构复杂, 是构成生物体的基本物质, 各种生命活动都依赖于生物大分子的特有结构和功能。生物小分子包括大分子的构件分子、参与代谢或代谢调节的分子以及一些次生代谢产物, 如单糖 (葡萄糖、果糖、半乳糖等) 是多糖的构件分子, 氨基酸、核苷酸分别是蛋白质、核酸的构件分子; 辅酶、维生素、激素则参与代谢或代谢调节; 萜类、生物碱、毒素、抗生素等是植物和微生物体内的次生代谢产物。

3. 生物分子结构与功能的关系

分子结构是功能的基础, 功能则是结构的体现。DNA 的一级结构决定蛋白质的一级结构, 蛋白



生物化学的
研究内容

质的一级结构决定蛋白质的空间结构，蛋白质的空间结构决定蛋白质的生物学功能。

生物大分子的功能通过分子之间的相互识别和相互作用实现。生物超分子也称为复合物，是生物分子相互作用和识别的一种特殊的中间物质，是许多生命现象发生的必需物质，如酶与底物、抗体与抗原以及受体与激素形成的复合物等。研究超分子的形成、解离及其功能是生物化学重要的研究内容。

（二）研究新陈代谢及其调控

1. 新陈代谢

新陈代谢是生物最基本的特征，新陈代谢包括物质代谢和能量代谢两个方面，这两个方面是相互联系的。生物体内的物质代谢过程包括营养物质的消化吸收、中间代谢及代谢废物的排泄三个阶段，其中，中间代谢是生物化学重要的研究内容。

中间代谢是物质在细胞内所进行的一系列化学反应过程，包括物质的分解与合成。物质在分解过程中产生能量，供生命活动之需；物质的合成需要能量。无论是分解代谢还是合成代谢，都是由若干化学反应完成的，绝大多数的化学反应是在酶的催化下进行的，并且这些化学反应是高度有序的，在细胞中有严格的定位和反应方向。尽管各类有机物中间代谢的途径各异，但其彻底氧化分解的产物都是二氧化碳和水，并且二氧化碳和水以及能量的产生方式有共同的规律。各类有机物的代谢途径之间是相互联系的。

2. 代谢调控

生物体内的物质代谢对生物体的生理机能有着重要的影响，因此，生物体内存在着精密细致、完善而绝妙的调节机制，以保证物质代谢的正常进行。代谢调节是由一些分子及其有关化学反应完成的。生物体内的代谢调控可以在三个水平上进行：①细胞水平的代谢调节。通过酶的调节作用来实现，包括酶量和酶活性的调节。②激素水平的代谢调节。即通过激素的作用对代谢进行调节，如胰岛素对糖代谢的调节。激素是由动植物分泌的、在体内协调组织与组织之间或器官与器官之间物质代谢平衡的一类活性物质（含量很低），因此，激素水平的代谢调节也称为组织器官水平的代谢调节。③整体水平的代谢调节。人及高等动物除具备酶水平的调节和激素水平的调节之外，还具有整体水平的神经系统的调节。神经系统的调节具有整体性，协调全部代谢。整体水平的调节主要通过神经体液途径进行，绝大多数激素的合成和分泌直接或间接受到神经系统的支配。

（三）研究遗传信息的传递、表达及其调控

基因的储存、传递使生物的性状得以代代相传，生命得以延续。基因信息传递涉及生物的遗传、变异、生长、分化等诸多生命过程，也与多种疾病的发病机制有关。

生物的遗传信息储存在 DNA 的核苷酸排列顺序之中。DNA 通过复制把遗传信息传递给子代细胞，再通过转录将遗传信息传递给 RNA，然后在三种 RNA 的协同作用下，翻译出蛋白质；蛋白质执行各种生物学功能，使后代表现出与亲代相似的遗传特征。这个过程即遗传信息的传递与表达。

遗传信息的传递与表达是极其复杂的过程，除了需要合成核酸、蛋白质的原料之外，还需要众多的酶及蛋白质因子参与构成生物合成体系及参与合成过程的调控。目前，对原核生物遗传信息的传递、表达及其调控的研究比较多，但在真核生物遗传信息的传递、表达及其调控机制方面还有许

多问题尚待深入研究。研究基因在染色体中的定位、核苷酸的排列顺序及功能，DNA复制、RNA转录、蛋白质生物合成过程中基因传递的机制，基因传递与表达的时空调节规律等是生物化学极为重要的研究课题。

简答题

1. 简述生物化学的定义及分类。
2. 简述生物化学的主要研究内容。



第一章

糖类化学

学习目标

1. 准确阐述糖类的定义、分类及结构特征；
2. 掌握单糖、多糖的化学组成与性质；
3. 理解糖类在生物体中的生理功能与代谢意义，尤其要明晰其与营养支持、机体免疫的关联。

糖类是自然界分布最广泛、含量最丰富的一类有机化合物。绿色植物、藻类及一些微生物（如光合细菌）可以通过光合作用合成糖类。糖类的基本元素组成是碳、氢、氧，大多数单糖符合 $(\text{CH}_2\text{O})_n$ 的结构通式，所以，习惯上将糖类称为“碳水化合物”。但是，符合 $(\text{CH}_2\text{O})_n$ 结构通式的化合物不一定是糖类，如乳酸 ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$)、乙酸 ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$)、甲醛 (CH_2O) 等；有些糖类则不符合这个通式，如脱氧核糖 ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_4$)、鼠李糖 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_5$) 等。糖类的化学本质是多羟基醛或多羟基酮及其缩聚物或衍生物。

糖类按水解情况可以分为三类：单糖、低聚糖、多糖。单糖是不能再水解为更小分子的糖，为多羟基醛（如葡萄糖）或多羟基酮（如果糖），是低聚糖和多糖的单体；低聚糖也称为寡糖，是由 2~10 个单糖缩合而成的糖，如蔗糖、乳糖等；多糖是由 10 个以上单糖缩合而成的糖，一般聚合度都大于 20，如淀粉、纤维素、果胶等。另外，糖类还可以与其他物质形成复合糖，如糖蛋白、糖脂、糖苷等。

糖类广泛存在于生物体内，植物体内糖的含量占其干重的 85%~90%，微生物体内糖的含量占其干重的 10%~30%，动物体内含糖量较低，约占其干重的 2%。糖类具有重要的生物学功能。糖类是生物体重要的结构成分，植物的根、茎、叶的主要成分是纤维素，肽聚糖是细菌细胞壁的成分，昆虫、甲壳动物的外壳含有几丁质（含氮多糖）。糖类是生物体的主要能源物质，多糖、低聚糖在生物体内降解为单糖（葡萄糖），氧化分解产生能量，供生命活动之需。糖类作为碳源，可为其他生物分子的合成提供碳架，如糖代谢的中间产物是合成氨基酸、核苷酸、脂肪酸的碳架。糖蛋白和糖脂中的糖链在细胞识别、信息传递等方面起重要作用。

第一节 单糖

根据官能团结构，可将单糖分为醛糖和酮糖，前者为多羟基醛，后者为多羟基酮；根据分子中碳原子的数目，可将单糖分为丙糖、丁糖、戊糖、己糖等。自然界中最简单的单糖是甘油醛和二羟丙酮，最重要的也是最常见的单糖则是葡萄糖 (glucose) 和果糖 (fructose)。葡萄糖是己醛糖，果糖是己酮糖。

一、单糖的结构

(一) 单糖的链状结构

单糖都有手性碳原子（二羟丙酮除外），因此存在旋光异构体。例如，己醛糖的结构式是 $\text{CH}_2\text{OH}(\text{CHOH})_4\text{CHO}$ ，分子中有 4 个手性碳原子，有 16 个旋光异构体（8 个 D-型，8 个 L-型），葡萄糖是其中之一。单糖的链状结构用费歇尔 (Fischer) 投影式表示，见图 1-1。

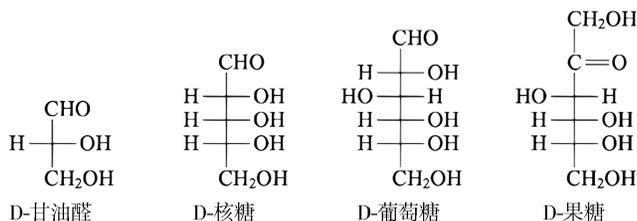


图 1-1 单糖的链状结构 (Fischer 投影式)

单糖的构型是通过与甘油醛比较而确定的，一般用 D/L 标记法。规定：单糖分子中离羰基最远的手性碳上的羟基，与 D-甘油醛手性碳上的羟基在同一侧的为 D-型，不在同一侧的为 L-型。

单糖分子中如果含有 n 个手性碳原子，则最多有 2^n 个旋光异构体。互为镜像的一对旋光异构体称为对映体，其比旋光度数值相同，旋光方向相反，如 D-甘油醛和 L-甘油醛。只有一个手性碳原子的构型不同，其余手性碳原子的构型都相同的两个旋光异构体，称为差向异构体，如葡萄糖和半乳糖、葡萄糖和甘露糖是差向异构体，见图 1-2。

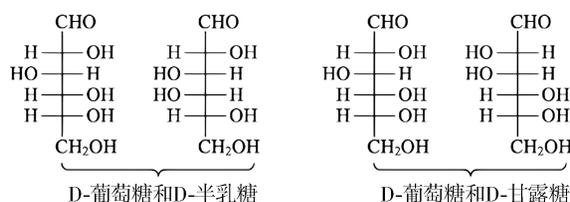


图 1-2 葡萄糖与半乳糖、甘露糖是差向异构体

自然界中的单糖绝大多数为 D-型。醛糖的 D-型异构体见图 1-3。

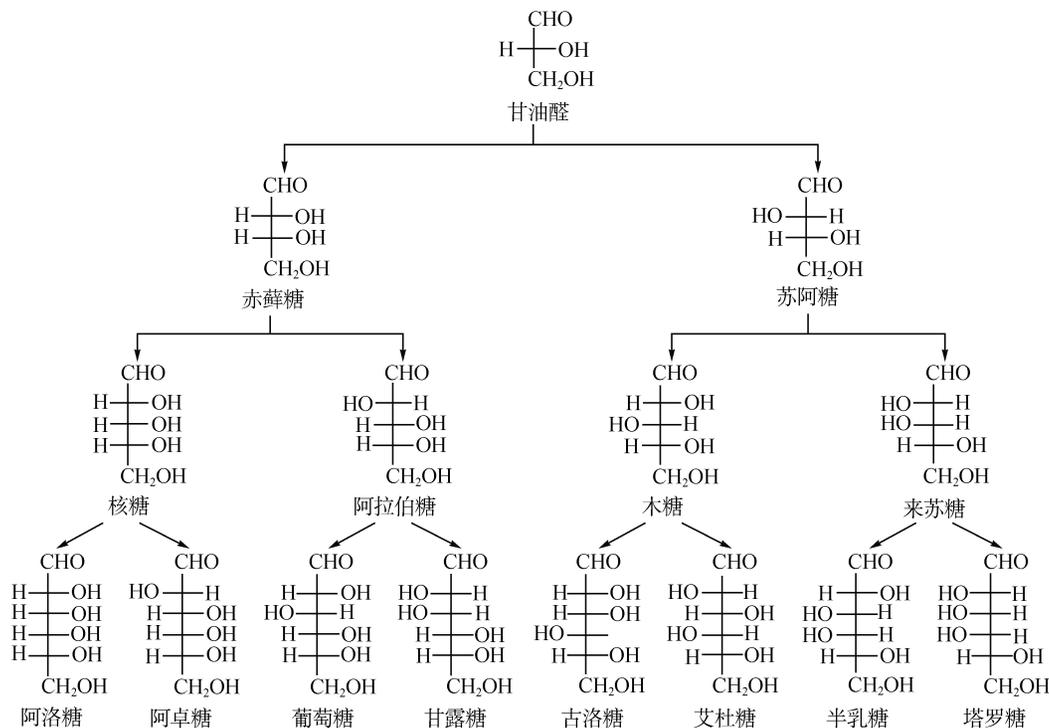


图 1-3 D-型醛糖

(二) 单糖的环状结构

单糖分子中既含有羰基，又含有羟基，因此可以形成缩醛式的环状结构。下面以葡萄糖为例进行说明。

葡萄糖是多羟基醛，但其化学性质与醛有差别，如葡萄糖不与 NaHSO_3 加成，只与 1 分子 ROH 反应，有变旋现象，这些性质说明葡萄糖除了开链结构外，还存在着环状结构。葡萄糖可以形成六元环和五元环两类环状结构，自然界存在的主要是六元环的葡萄糖(见图 1-4)。



单糖的环状结构

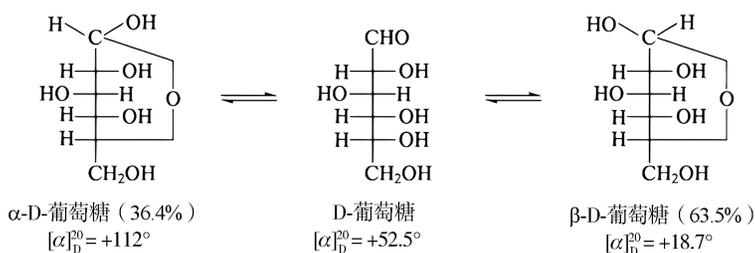


图 1-4 葡萄糖的环状结构(吡喃型)

葡萄糖(单糖)从链状结构转变为环状结构后, C₁ 转变为手性碳, 形成一对非对映异构体, 这两个异构体称为异头物, C₁ 上的羟基称为半缩醛羟基。半缩醛羟基与决定单糖构型的羟基在同一侧的, 称为 α -型, 不在同一侧的称为 β -型。由于六元环葡萄糖的结构与杂环化合物吡喃相似, 故把六元环葡萄糖称为吡喃型, 全称为 α (或 β)-D-吡喃葡萄糖; 而五元环葡萄糖与呋喃的结构相似, 故把五元环葡萄糖称为呋喃型, 全称为 α (或 β)-D-呋喃葡萄糖。吡喃和呋喃的结构见图 1-5。



图 1-5 吡喃和呋喃的结构

葡萄糖的 C₁ 和 C₄ 构成的环为五元环, 见图 1-6。

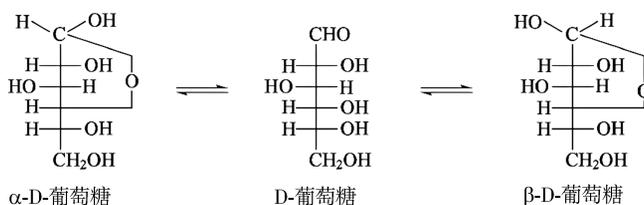


图 1-6 葡萄糖的环状结构(呋喃型)

自然界的葡萄糖多以吡喃型存在, 核糖、果糖多以呋喃型存在。

1. 单糖环状结构的哈沃斯(Haworth)投影式

葡萄糖由 Fischer 式改写成为 Haworth 式如图 1-7 所示。

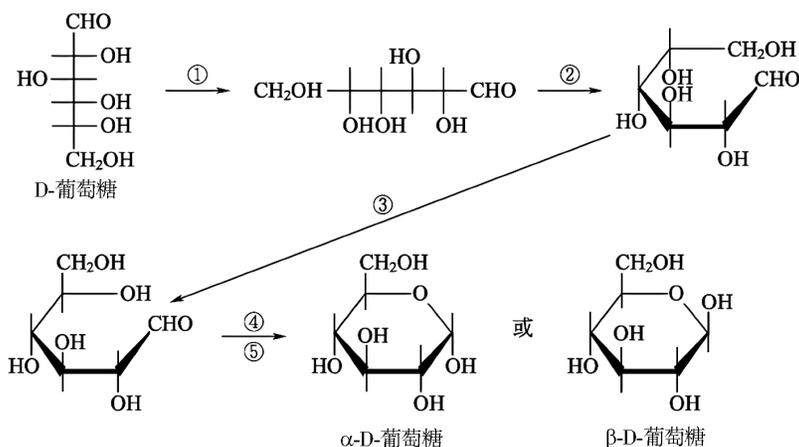


图 1-7 葡萄糖由 Fischer 式改写为 Haworth 式

葡萄糖的 Haworth 式可以简写，糖环用实线表示，用短竖线代表—OH，—H 省略不写(见图 1-8)。

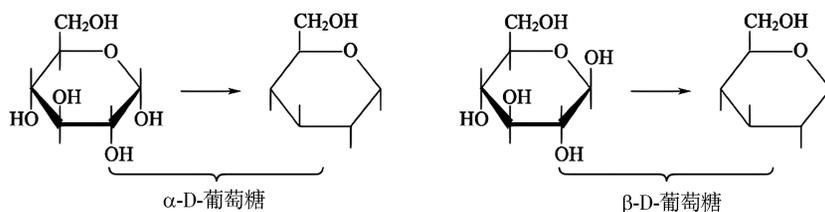


图 1-8 葡萄糖的 Haworth 式及其简写形式

Haworth 式的书写规则：①先写糖环，氧原子写在六元环的右上方(或五元环的正上方)；②碳原子顺时针排列；③Fischer 式中向右的羟基写在平面之下，向左的羟基写在平面之上；④半缩醛羟基在平面之下的为 α -型，在平面之上的为 β -型；⑤ CH_2OH (伯醇基)写在平面之上。

2. 其他单糖的 Haworth 式

(1)核糖及脱氧核糖。核糖及脱氧核糖属于戊糖，是核酸的组成成分，RNA 中的戊糖是 β -D-核糖，DNA 中的戊糖是 β -D-2-脱氧核糖，其结构见图 1-9。

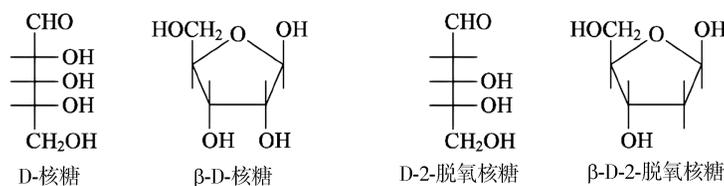


图 1-9 核糖及脱氧核糖的链状结构和 Haworth 式环状结构

(2)半乳糖。半乳糖是己醛糖，与葡萄糖是差向异构体，是乳糖的组分，1 分子半乳糖与 1 分子葡萄糖构成乳糖。半乳糖的结构见图 1-10。

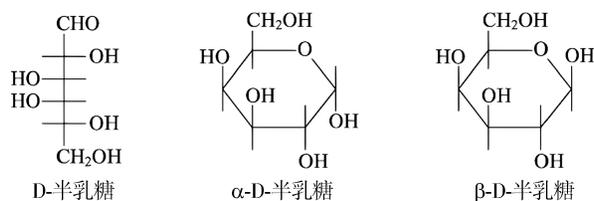


图 1-10 半乳糖的链状结构和 Haworth 式环状结构

(3)果糖。果糖是己酮糖，与葡萄糖是同分异构体。天然果糖是 D-型左旋糖，存在于水果、蜂蜜中，其甜度比葡萄糖和蔗糖都高。1 分子葡萄糖与 1 分子果糖构成蔗糖。天然果糖以呋喃型存在，其结构见图 1-11。

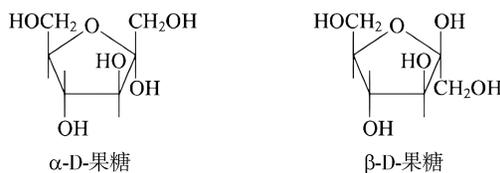


图 1-11 果糖的 Haworth 式环状结构

Haworth 式书写简单，是生物化学中表示单糖结构最常用的，但实际上由于单糖分子中碳原子是 sp^3 杂化，成环碳原子及氧原子并不在一个平面上，因此，吡喃环存在两种典型构象，即椅式构象和船式构象，与环己烷相似，椅式构象是优势构象。葡萄糖的椅式构象见图 1-12。

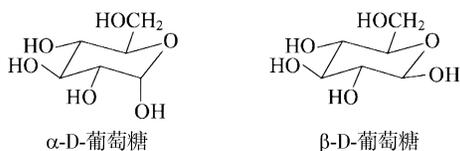


图 1-12 葡萄糖的椅式构象

从葡萄糖的椅式构象看， β -D-葡萄糖比 α -D-葡萄糖稍稳定。

二、单糖的性质

(一) 单糖的物理性质

1. 甜度

单糖和低聚糖都有甜味，甜味的强弱可用甜度来表示。通常以 10% 或 15% 的蔗糖水溶液在 20℃ 时的甜度为 100，其他糖与之比较，得到的是相对甜度，也叫比甜度。单糖的甜度因其构型、物理状态不同而异，如 β -D-果糖溶液的相对甜度是 100~175，结晶的相对甜度是 180； α -D-葡萄糖溶液的相对甜度是 40~79，结晶的相对甜度是 74； β -D-葡萄糖溶液的相对甜度比 α -D-葡萄糖溶液的低，结晶的相对甜度是 82。

多糖没有甜味。

2. 旋光性及变旋现象

物质能使平面偏振光的振动平面发生旋转的性质称为旋光性，单糖分子中含有手性碳原子，因此有旋光性。具有旋光性的物质称为光学活性物质或旋光性物质，使偏振光振动平面按逆时针方向旋转的物质称左旋体，用“-”表示；使偏振光振动平面按顺时针方向旋转的物质称右旋体，用“+”表示。

比旋光度是旋光性物质的重要物理常数。比旋光度是指在一定温度、一定波长下，被测物质浓度为 1.0g/mL 的溶液在样品管长度为 1dm 的条件下测得的旋光度。当温度为 20℃，光源是钠光时，比旋光度用符号 $[\alpha]_D^{20}$ 表示。几种单糖的比旋光度 $[\alpha]_D^{20}$ 见表 1-1。

表 1-1 几种单糖的比旋光度 $[\alpha]_D^{20}$

单糖	α -型	β -型	平衡
D-(+)-葡萄糖	+113.4°	+18.7°	+52.5°
D-(+)-半乳糖	+114°	+15.4°	+80.5°
D-(+)-甘露糖	+34°	-17°	+14.6°
D-(-)-果糖	-21°	-133.5°	-92.4°

糖刚溶解于水时，比旋光度是变化的，一段时间后就稳定于一恒定值，这种现象称为变旋现象。单糖都有变旋现象。发生变旋现象的原因是 α -型、 β -型异构体的互变平衡。因此，对于有变旋现象的糖，在测定其旋光度时，必须使糖溶液静置一段时间再测定。

3. 溶解度

单糖易溶于水，其分子中的多个羟基增加了它的水溶性，尤其是在热水中的溶解度。各种单糖的溶解度不一样，果糖的溶解度最高，其次是葡萄糖。单糖不溶于丙酮、乙醚等有机溶剂。

(二)单糖的化学性质

1. 异构化反应

单糖与稀碱(或弱碱)作用，分子重排，发生异构化反应。例如，葡萄糖与 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 溶液反应，得到葡萄糖、果糖、甘露糖的混合物(见图 1-13)。

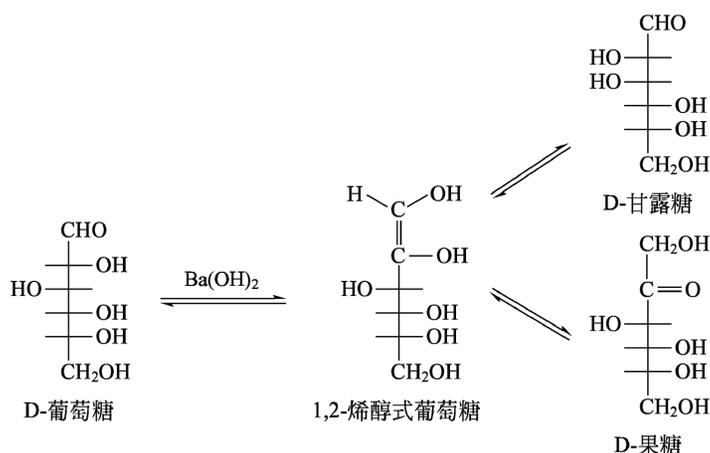


图 1-13 单糖的异构化反应

2. 氧化反应

单糖可以被氧化剂氧化，产物因氧化剂不同而异。

碱性条件下，单糖与弱氧化剂作用生成糖酸。常见的弱氧化剂是班氏(Benedict)试剂、斐林(Fehling)试剂和托伦(Tollens)试剂。单糖与 Benedict 试剂或 Fehling 试剂在沸水中共热数分钟， Cu^{2+} 被还原，产生砖红色氧化亚铜沉淀，可用于单糖的定性，由于 Fehling 试剂不稳定，因此常用 Benedict 试剂。单糖与 Tollens 试剂发生银镜反应。

单糖分子中有自由的醛基或游离的半缩醛羟基，因此存在着链状结构与环状结构的互变平衡，能被弱氧化剂氧化，属于还原糖。酮糖与醛糖在弱碱溶液中会发生异构化反应，因此，果糖也可以与 Benedict 试剂反应，这一点与酮的性质不同。

醛糖能被溴水氧化为糖酸，酮糖不能被溴水氧化，这可以用来鉴别醛糖和酮糖。

单糖与 HNO_3 等强氧化剂反应，醛基和伯羟基同时被氧化，形成糖二酸。

在葡萄糖氧化酶的作用下，葡萄糖的伯羟基被氧化，形成葡萄糖醛酸。葡萄糖醛酸可以和钙、铁成盐作为药物，利于吸收，如葡萄糖醛酸钙。

3. 还原反应

单糖可以被还原成多元醇。糖醇主要应用于食品加工业和医药领域。葡萄糖可还原为山梨醇，果糖可还原为山梨醇和甘露醇的混合物，木糖被还原为木糖醇。木糖醇的甜度比蔗糖低，可在无糖食品中作为甜味剂替代蔗糖，目前木糖醇已被广泛用于糖果、果酱、饮料等食品加工。几种糖醇的结构见图 1-14。

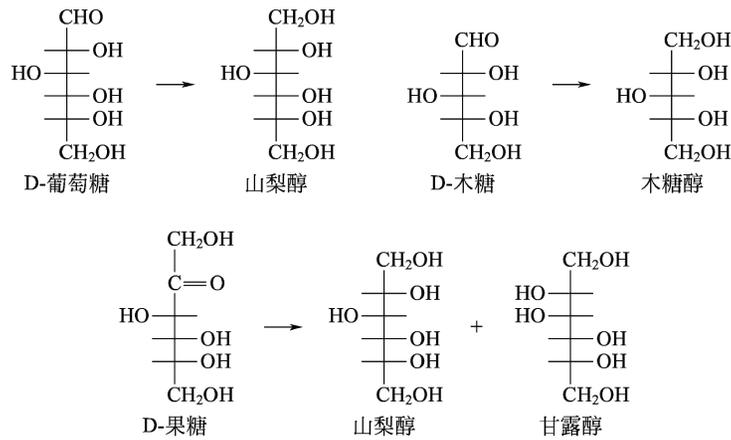


图 1-14 几种糖醇的结构

4. 酯化反应

单糖分子中有羟基，能与磷酸、硫酸等脱水生成糖酯，生物体内最常见的糖酯是磷酸糖酯和硫酸糖酯。在生物体内，几种单糖的磷酸酯是糖代谢的中间产物，如甘油醛-3-磷酸、葡萄糖-6-磷酸、果糖-6-磷酸等。葡萄糖的核苷二磷酸酯(如 UDPG)参与多糖的生物合成。几种单糖的磷酸酯见图 1-15。

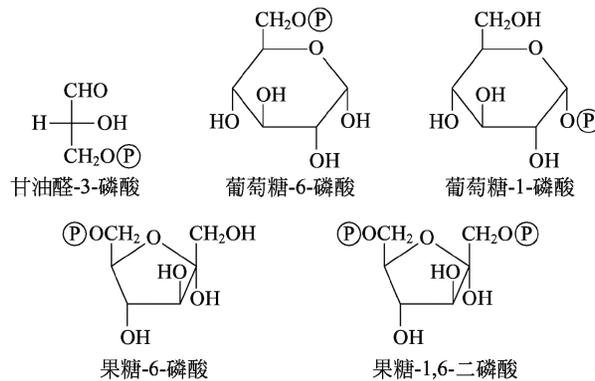


图 1-15 几种单糖的磷酸酯

5. 成苷反应

单糖分子上的半缩醛羟基与其他分子的羟基(或活性氢原子)反应，失水而形成的化合物，称为糖苷。糖苷中提供半缩醛羟基的部分称为糖基，非糖部分称为配基。糖苷中糖基与配基之间的连接键称为糖苷键。糖苷键有 α -糖苷键和 β -糖苷键两种类型，按位置分为 1,4-糖苷键、1,6-糖苷键、1,3-糖苷键等。低聚糖、多糖是由单糖通过糖苷键连接而成的。

根据糖基和配基(R)可将糖苷命名为 $\alpha(\beta)$ -D-R 基某糖苷，如 α -D-甲基葡萄糖苷、 β -D-甲基葡萄糖苷，见图 1-16。

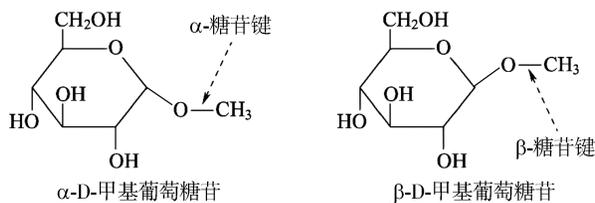


图 1-16 甲基葡萄糖苷的类型和结构

糖苷的性质稳定，其分子中无游离的半缩醛羟基，因此，糖苷无还原性，无变旋现象。

糖苷在自然界中广泛存在，有些糖苷有药用价值，有些则有毒。如银杏中的有效成分银杏黄酮醇苷，具有扩张冠状动脉血管、改善血液循环的作用；黄豆苷(大豆、葛根中含有)可以促进血液循环，增加脑血流量，对心血管疾病有显著疗效。

苦杏仁苷存在于苦桃仁、杏仁、李子仁、木薯等中，水解时产生龙胆二糖(由两个葡萄糖以 β -1,6-糖苷键形成)和苦杏仁腈，苦杏仁腈水解可以产生苯甲醛和 HCN，所以苦杏仁苷属于生氰糖苷。苦杏仁苷的结构及其水解产物见图 1-17。

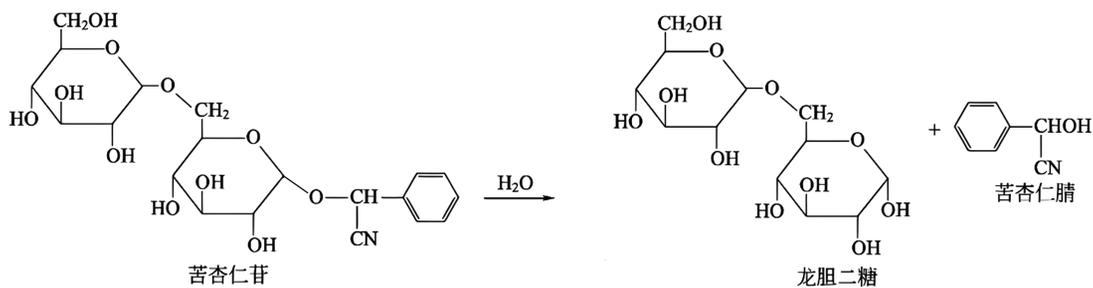


图 1-17 苦杏仁苷的结构及其水解产物

花青素是广泛存在于自然界的水溶性色素，花卉、水果、蔬菜呈现的许多颜色(蓝色、紫色、红色、红紫色等)都是由花青素产生的，花青素以与糖类形成糖苷(花青素苷)的形式存在。

第二节 低聚糖

低聚糖又称寡糖，是由 2~10 个单糖通过糖苷键连接形成的。二糖(双糖)是最常见的低聚糖，它们均溶于水，有甜味，有旋光性，可结晶。根据结构和性质可将二糖分为还原性二糖和非还原性二糖。

一、还原性二糖

还原性二糖是由一分子单糖的半缩醛羟基与一分子单糖的醇羟基失水形成的，分子中有游离的半缩醛羟基，存在链状结构和环状结构的互变平衡，因此，还原性二糖有还原性和变旋现象。麦芽糖和乳糖都是还原性二糖。

(一) 麦芽糖

麦芽糖是由 1 分子 α -D-葡萄糖 C_1 上的半缩醛羟基与 1 分子 D-葡萄糖 C_4 上的醇羟基之间脱水缩合，通过 α -1,4-糖苷键连接而成的。其结构见图 1-18。

麦芽糖分子中第二个葡萄糖有游离的半缩醛羟基，因此，在水溶液中，它的环状结构可以变成开链结构， α -麦芽糖和 β -麦芽糖通过开链式结构互变平衡，所以，麦芽糖有变旋现象，有还原性。

麦芽糖为白色晶体，通常为 β -型，易溶于水，能被酵母直接发酵。麦芽糖是淀粉酶促水解的产物，甜度为蔗糖的 1/3，可作为食品的膨松剂、冷冻食品的填充剂和稳定剂。麦芽糖大量存在于发芽的谷粒，特别是麦芽中。利用大麦芽中的淀粉酶，可使淀粉水解为麦芽糖与糊精的混合物，其中麦芽糖约占 1/3，这种混合物称为饴糖。



还原性二糖

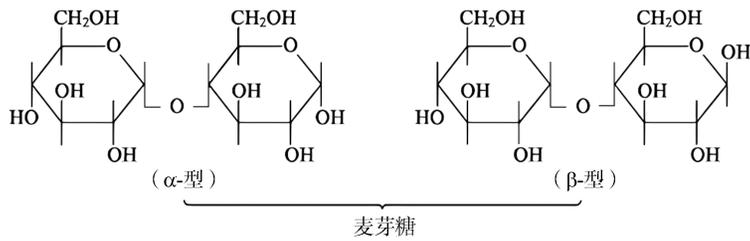


图 1-18 麦芽糖的结构

(二)乳糖

乳糖是 1 分子 β -D-半乳糖的半缩醛羟基与 1 分子 D-葡萄糖以 β -1,4-糖苷键相连而成的。其结构见图 1-19。

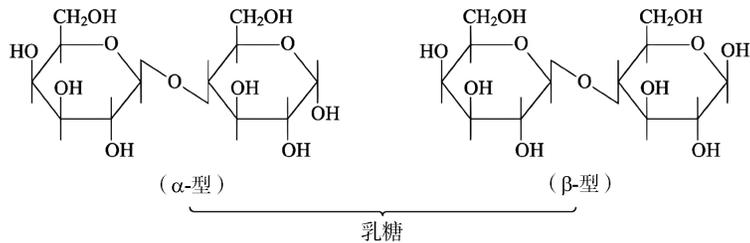


图 1-19 乳糖的结构

乳糖有变旋现象和还原性。乳糖存在于动物的乳汁中，牛乳含乳糖 4.6%~5.0%。乳糖为白色结晶，其溶解度小，甜度仅为蔗糖的 1/6， α -异构体比 β -异构体甜度高，溶解性好。食品工业中乳糖可用于焙烤食品，增加风味。

二、非还原性二糖

非还原性二糖是由两分子单糖的半缩醛羟基失水，以糖苷键相连形成的，分子中无游离的半缩醛羟基，因此无还原性，也无变旋现象。

(一)蔗糖

蔗糖由 1 分子 α -D-葡萄糖和 1 分子 β -D-果糖通过 α,β -1,2-糖苷键相连而成。其结构见图 1-20。

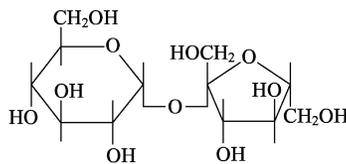


图 1-20 蔗糖的结构

蔗糖是白色结晶，易溶于水，有旋光性，无变旋现象，无还原性。

在稀酸或转化酶的作用下，蔗糖水解为等量的 D-葡萄糖和 D-果糖，即转化糖，旋光性由右旋变为左旋，这种作用称为转化作用。蜂蜜中含有大量的转化糖。

蔗糖是植物光合作用的产物，在甘蔗和甜菜中含量丰富，一些甜味水果(如香蕉、菠萝、柿子等)中也富含蔗糖。日常食用的糖主要是蔗糖，红糖、白糖、冰糖都是蔗糖。蔗糖是食品加工中最重

要的糖，广泛应用于糕点、饮料和蜜饯等食品制作。蔗糖可以被酵母分泌的蔗糖酶所水解，在用于烘焙面包的面团中，蔗糖是不可缺少的添加剂，它不仅有利于面团的发酵，而且在烘烤过程中发生的美拉德反应可以增进面包的风味和色泽。

(二) 海藻糖

海藻糖是由两个葡萄糖分子以 1,1-糖苷键构成的非还原性二糖，有 3 种异构体，即海藻糖(α, α)、异海藻糖(β, β)和新海藻糖(α, β)。海藻糖的结构见图 1-21。

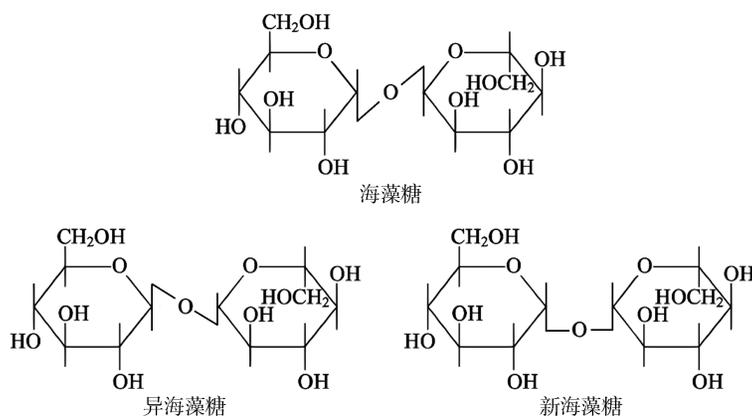


图 1-21 海藻糖的 3 种异构体

海藻糖广泛存在于海藻、真菌、蕨类及酵母中。与其他糖类一样，海藻糖可广泛应用于饮料、巧克力及糖果、烘烤制品和速冻食品等的制作中。

三、其他低聚糖

棉籽糖是自然界中广泛存在的三糖，棉籽糖由 1 分子 α -D-半乳糖、1 分子 α -D-葡萄糖和 1 分子 β -D-果糖组成，其结构见图 1-22。

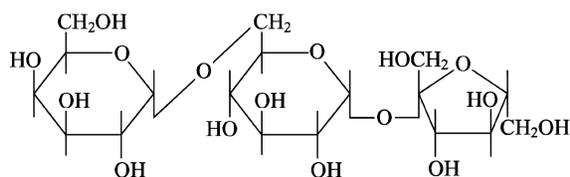


图 1-22 棉籽糖的结构

棉籽糖与水苏糖一起组成大豆低聚糖的主要成分，是除蔗糖外的另一种广泛存在于植物中的低聚糖。工业生产棉籽糖主要有两种方法：一种是从甜菜糖蜜中提取；另一种是从脱毒棉籽中提取。

低聚果糖又称寡果糖或蔗果三糖族低聚糖，是由 1~3 个果糖基通过 β -2,1-糖苷键与蔗糖中的果糖基结合生成的蔗果三糖、蔗果四糖和蔗果五糖等的混合物。低聚果糖存在于天然植物中，如菊芋、芦笋、洋葱、香蕉、番茄、大蒜、牛蒡、蜂蜜及某些草本植物中。低聚果糖在营养学范畴属于功能性低聚糖，是一类可溶性膳食纤维。

第三节 多糖

多糖是由许多单糖分子通过糖苷键结合而成的天然高分子化合物。

多糖按生物学功能可分为结构多糖和储存多糖，植物细胞壁中的纤维素、甲壳动物外壳中的几丁质、细菌细胞壁中的肽聚糖都是结构多糖，是生物体的结构成分；淀粉、糖原是储存多糖，是生物体能量的储存形式，在体内降解为葡萄糖后氧化分解产生能量，供生命活动之需。

多糖按组成可分为同多糖和杂多糖。同多糖是由相同的单糖组成的多糖，如淀粉、纤维素、糖原等；杂多糖是由不同的单糖构成的多糖，如半纤维素、阿拉伯树胶、海藻胶等。

多糖没有甜味，在水溶液中只形成胶体溶液，没有还原性，有旋光性，但没有变旋现象。

一、淀粉

淀粉是植物体内的储存多糖，在种子、块根、块茎中含量丰富，粮食的主要成分是淀粉。淀粉以颗粒状存在于胚乳细胞中。淀粉粒的形状、大小随来源而异，形状有圆形、椭圆形、多角形等，大小在 0.001~0.15mm 之间，马铃薯淀粉粒最大，谷物淀粉粒最小。

淀粉的组成单位是 α -D-葡萄糖。

(一) 淀粉的种类和结构

淀粉分为两类：一类是直链淀粉，另一类是支链淀粉。淀粉中直链淀粉含量一般为 10%~30%，有的玉米品种直链淀粉含量达 50%~85%，称为高直链淀粉玉米，糯玉米中支链淀粉含量高达 99%。一些淀粉中直链淀粉和支链淀粉的含量见表 1-2。

表 1-2 一些淀粉中直链淀粉和支链淀粉的含量

两种淀粉的含量	淀粉来源						
	高直链淀粉玉米	玉米	糯玉米	小麦	大米	马铃薯	木薯
直链淀粉含量/%	50~85	26	1	25	17	21	17
支链淀粉含量/%	15~50	74	99	75	83	79	83

1. 直链淀粉

直链淀粉是 α -D-葡萄糖通过 α -1,4-糖苷键连接起来的糖链，聚合度为 100~1000。直链淀粉没有分支，其结构见图 1-23。

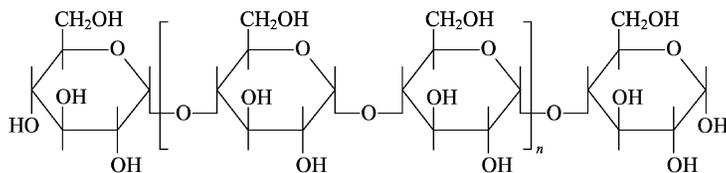


图 1-23 直链淀粉的结构

直链淀粉通常卷曲成螺旋状，每一圈有 6 个葡萄糖残基，见图 1-24。

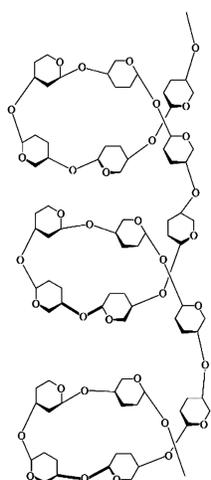


图 1-24 直链淀粉的螺旋状构象

2. 支链淀粉

支链淀粉有分支， α -D-葡萄糖通过 α -1,4-糖苷键连接成主链和支链的糖链，支链通过 α -1,6-糖苷键与主链相连。支链淀粉的分子量比直链淀粉大很多，聚合度通常为 300~6000，分支短链的长度为 15~25 个葡萄糖基，分支与分支间隔平均为 25 个葡萄糖残基。支链淀粉的结构见图 1-25。

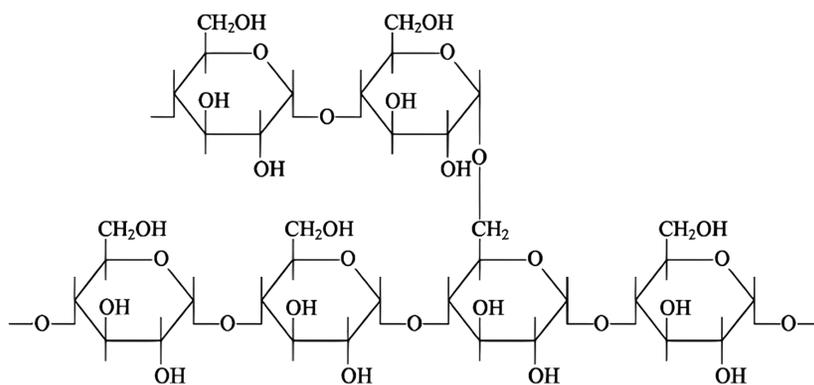


图 1-25 支链淀粉的结构

支链淀粉的构象是树枝状的，见图 1-26。由于有大量的分支，因此分子中有大量的非还原端，只有一个还原端。

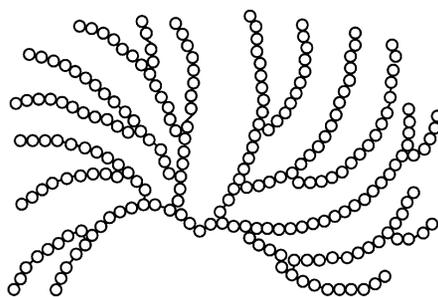


图 1-26 支链淀粉树枝状构象示意图

直链淀粉和支链淀粉在淀粉粒中的排列见图 1-27。



图 1-27 直链淀粉和支链淀粉在淀粉粒中的排列示意图

(二) 淀粉的性质

1. 淀粉与碘的反应

直链淀粉遇碘呈蓝色，支链淀粉遇碘呈紫红色，糊精遇碘呈蓝紫、紫、橙等颜色。直链淀粉可以吸附碘，使碘吸收的可见光的波长向短波长方向移动，从而呈现蓝色，支链淀粉和糊精也能吸附碘，但与直链淀粉吸附碘的程度不同，因此呈现的颜色不同。淀粉与碘发生呈色反应除因为淀粉对碘具有吸附作用外，主要原因是淀粉能与碘形成包合物。直链淀粉呈螺旋状，每个螺圈有 6 个葡萄糖残基，每个葡萄糖残基上都有羟基在螺旋的外面，碘分子与这些羟基作用，使碘分子嵌入淀粉螺旋体的轴心部位，这种作用称为包合作用，生成的淀粉-碘复合物称为包合物。在淀粉与碘生成的包合物中，每个碘分子与 6 个葡萄糖残基配合，淀粉链以直径 1.3nm 绕成螺旋状，碘分子处在螺旋的轴心部位。

淀粉与碘生成的包合物的颜色，与淀粉的聚合度有关。直链淀粉没有分支，形成的螺旋结构的螺圈数一般超过 10 个，包合物呈现蓝色。支链淀粉有许多分支，支链中的葡萄糖残基平均有 15~25 个，这样形成的包合物呈紫色。糊精的聚合度更低，与碘发生呈色反应时呈蓝紫、紫、橙、浅黄等颜色。

淀粉与碘在常温下发生呈色反应，加热时蓝色消失。

2. 淀粉的水解

淀粉可以在酸或酶的作用下水解。工业上用淀粉作原料，通过水解可以得到不同的产物，如糊精、淀粉糖浆、麦芽糖浆等。

淀粉水解的过程是淀粉→红色糊精→无色糊精→麦芽糖→葡萄糖。

糊精是淀粉水解过程中所产生的分子量不等的多糖苷片段。糊精具有旋光性、黏性、还原性，能溶于水。

3. 溶解性

天然淀粉粒不溶于冷水，在 60~80℃ 热水中，直链淀粉形成溶胶，遇冷形成凝胶；纯支链淀粉易分散于冷水中，在热水中继续加热形成黏性很大的凝胶。

淀粉的糊化

生淀粉分子靠分子间氢键结合而排列得很紧密，形成束状的胶束，这样的淀粉称为 β -淀粉。 β -淀粉在水中经加热后，一部分胶束被溶解形成空隙；水分子进入胶束内部，与余下的部分淀粉分子结合，胶束逐渐被溶解，空隙逐渐扩大；淀粉粒因吸水，体积膨胀数十倍，生淀粉的胶束消失，这种现象称为膨润现象。继续加热，胶束则全部崩溃，淀粉粒溶胀破裂，形成半透明的胶体溶液，这种现象称为淀粉的糊化，糊化后的淀粉称为 α -淀粉。

粉末水产饲料中的预糊化淀粉即为淀粉糊化后的干燥物，是粉末水产饲料中的营养性黏合原料，用量大，对饲料的质量和成本有很大影响。

水分、温度和时间是淀粉糊化的3个条件。不同来源的淀粉的糊化温度不同。常用糊化开始的温度和糊化完成的温度表示淀粉的糊化温度。颗粒大、结构疏松的淀粉比颗粒小、结构紧密的淀粉易于糊化，糊化温度亦低。含支链淀粉多的淀粉易于糊化，糊化后黏度大；淀粉中直链淀粉含量高，糊化后弹性好。

二、糖原

糖原是人和动物体内的储存多糖。糖原也是由 α -D-葡萄糖构成的多糖，结构与支链淀粉相似，但分支程度更大，每隔4个葡萄糖基就有一个分支，其侧链含有的葡萄糖残基较少。糖原分子比支链淀粉大，高级结构更紧密，更适合储存能量。

糖原主要以颗粒的形式存在于动物的肝脏和肌肉组织的细胞质中，肝糖原经酶促降解为葡萄糖进入血液，进而被运送到各组织以供利用；肌糖原酶促降解的产物主要是葡萄糖-6-磷酸，葡萄糖-6-磷酸氧化分解，为肌肉收缩提供能量。在哺乳动物中，糖原的合成与分解取决于机体的血糖水平。

三、纤维素

纤维素是植物细胞壁的主要结构成分，通常与半纤维素、果胶和木质素结合在一起。纤维素是自然界最丰富的有机化合物，植物体的所有木质成分中都含有大量的纤维素，棉花含97%~99%的纤维素，谷类中纤维素含量为30%~43%，木材中纤维素含量为41%~53%。人体消化道内不存在水解纤维素的酶，因此纤维素不能被人体利用。水果、蔬菜中的纤维素含量丰富，是膳食纤维的主要来源。食草动物可以利用纤维素，是因为其消化道中含有能水解纤维素的微生物。

纤维素是 β -D-葡萄糖以 β -1,4-糖苷键形成的多糖，分子无分支，聚合度差异很大，有1000~15000个葡萄糖残基。纤维素的结构见图1-28。

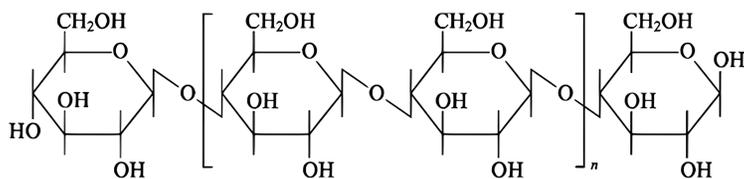


图 1-28 纤维素的结构

纤维素分子中的 β -1,4-糖苷键使纤维素分子形成高刚性的、伸展的构象。线性的纤维素分子之间以氢键相连,形成聚合链束(微晶束),称为纤维。

纤维素不溶于水,但其含有大量的羟基,能够吸附水,所以木材受潮会发生膨胀。纤维素不能用稀酸、稀碱水解,在高浓度强酸中加热可水解为纤维二糖。

纤维素作为工业原料,可用于生产纸张、纺织品、化学合成物、炸药、胶卷、医药用品、食品等。改性纤维素可用于食品加工,如羧甲基纤维素(CMC),是食品工业中使用最广泛的改性纤维素。

四、其他多糖

(一)几丁质

几丁质又称为甲壳素、壳多糖,是甲壳动物和昆虫外骨骼的结构成分,也存在于大多数真菌和许多藻类的胞壁中。构成几丁质的单体是N-乙酰-D-葡萄糖胺。几丁质的结构与纤维素相似,也是线性聚合物,是N-乙酰-D-葡萄糖胺以 β -1,4-糖苷键相连而成的。其结构见图1-29。



其他多糖

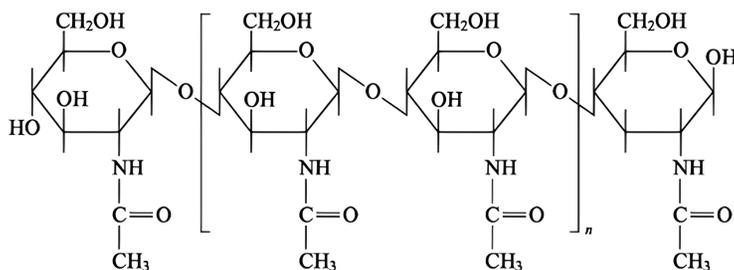


图 1-29 几丁质的结构

几丁质在自然界中的含量仅次于纤维素,常与非糖物质如蛋白质结合在一起。几丁质脱去乙酰基的产物去乙酰壳多糖即为壳聚糖,是一种带正电荷的无毒的聚合物,可以用作处理废水和工业废液的吸附剂。高分子科学和生物医学工程研究发现,壳聚糖与人体细胞有良好的亲和性,可用作手术线或烧伤患者预防感染的人造皮肤和外科药用辅料。

几丁质可用于制备可溶性甲壳质和氨基葡萄糖,可作化妆品和功能性食品的添加剂,可制备照相感光乳剂等。

(二)琼胶

琼胶也称为琼脂,是从石花菜、江篱等红藻中提取分离制成的一种海藻胶。琼胶在食品工业、医药工业、日用化工、生物工程等许多领域有广泛的应用。琼胶是非均匀的多糖混合物,可分离出琼脂糖和琼脂胶两种成分,琼脂糖是主要成分。

琼脂糖是线性分子,是由 β -D-吡喃半乳糖和3,6-脱水- α -L-吡喃半乳糖通过 β -1,4-糖苷键和 α -1,3-糖苷键连接交替形成的重复二糖单位,其结构见图1-30。

琼胶中能形成凝胶的成分是琼脂糖,琼脂胶不能形成凝胶。琼脂糖分子中的半乳糖残基,大约每10个中有一个被硫酸酯化。

琼脂胶是琼脂糖的衍生物,重复单位与琼脂糖相似,但酯化程度更高,除5%~10%的单糖残基被硫酸酯化外,单糖残基还在一定程度上被甲酸和丙酮酸酯化。琼脂胶在琼胶中的含量较少。

琼胶不溶于冷水,溶于热水,1%~2%的琼胶即可形成凝胶。动物和微生物不能消化琼胶,琼胶在生物学上用于制备微生物的培养基。

除琼胶外，常见的海藻胶还有鹿角藻胶(也称为卡拉胶)和褐藻胶，均是从褐藻(如鹿角藻、海带、巨藻等)中提取的。

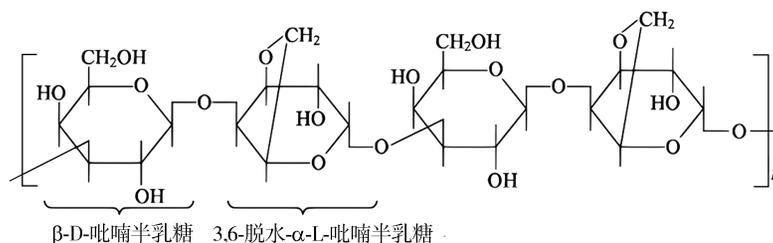


图 1-30 琼脂糖的结构

(三) 肽聚糖

肽聚糖是细菌细胞壁的主要成分。细胞壁对维持细菌的形状和保护细胞膜有重要作用。用革兰染色技术可以把细菌分为两类：革兰氏阳性(G^+)菌和革兰氏阴性(G^-)菌。这两类细菌革兰染色的不同显色反应是由于细胞壁对乙醇的通透性和抗脱色能力存在差异，这主要是由肽聚糖的厚度和结构决定的。一般来说，革兰氏阳性菌的细胞壁比革兰氏阴性菌的细胞壁厚。革兰氏阳性菌的细胞壁肽聚糖层较厚(30~40nm)，多达 20 层，占细胞壁成分的 60%~90%；革兰氏阴性菌的细胞壁肽聚糖层很薄(15~20nm)，在大肠杆菌和其他细菌中仅为单层。肽聚糖是由连有小肽的聚糖成分组成的。聚糖成分是由交替的两种氨基糖(*N*-乙酰葡萄糖胺和 *N*-乙酰胞壁酸)通过 β -1,4-糖苷键连接形成的糖链(见图 1-31)。

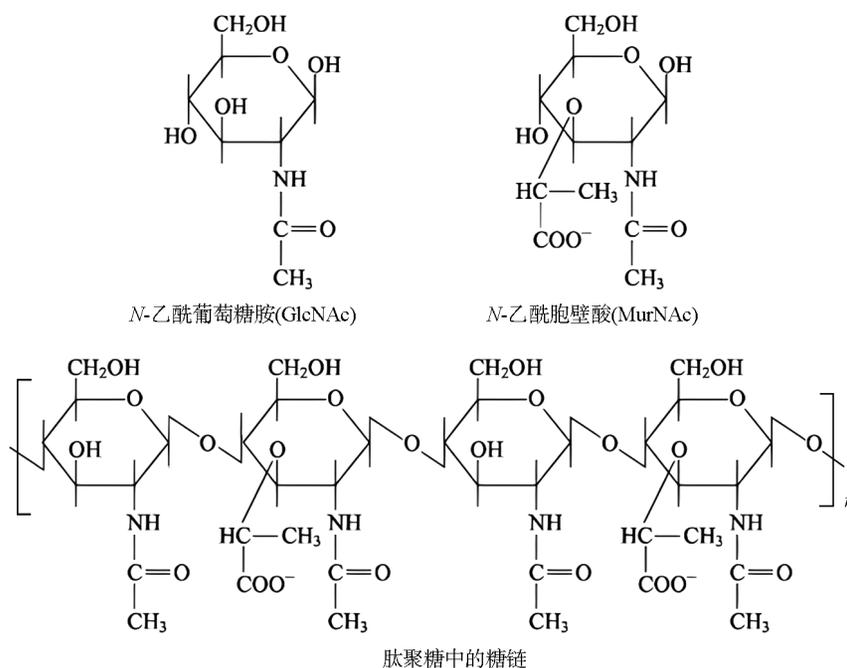


图 1-31 肽聚糖中的两种氨基糖及糖链

N-乙酰胞壁酸上连接一个四肽，对于不同的细菌，四肽中的氨基酸组成有差异，如金黄色葡萄球菌肽聚糖中的四肽氨基酸序列为 L-丙氨酸—D-异谷氨酸—L-赖氨酸—D-丙氨酸。一个肽聚糖分子中的四肽与相邻肽聚糖分子中的四肽通过甘氨酸桥(由 5 个甘氨酸残基构成)相连，形成坚韧的肽聚糖套层(见图 1-32)。

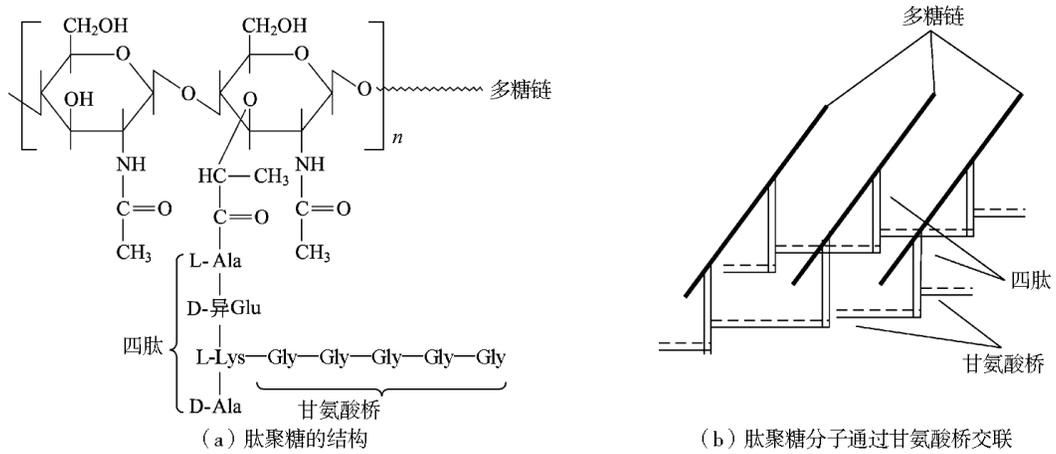


图 1-32 肽聚糖的结构和分子间的交联示意图

简答题

1. 什么是糖类？
2. 简述糖类的分类及举例。



第二章

脂类化学

学习目标

1. 准确阐述脂类的定义、分类标准及各类脂类的结构特点；
2. 掌握脂肪、脂肪酸、磷脂及胆固醇等常见脂类的化学组成与理化性质；
3. 了解脂类在生物体内的消化、吸收过程以及关键生理功能。

脂类是生物体内不溶于水而溶于有机溶剂的一类有机物的总称。

脂类是广泛存在于生物体内的天然有机化合物，人们日常食用的植物油（花生油、大豆油、菜籽油、橄榄油、芝麻油等）、动物脂肪（猪、牛、羊等动物的脂肪）、可可脂、动物羽毛和水果表面的蜡等，都属于脂类。脂类化合物在结构、性质和功能上有较大差异，它们的共同特点是具有脂溶性，具有酯的结构或成酯的可能。

脂类按化学结构可以分为单纯脂类、复合脂类和衍生脂类。单纯脂类是脂肪酸和醇形成的酯，包括脂肪和蜡。脂肪是脂肪酸与甘油所形成的酯，蜡是脂肪酸与高级一元醇所形成的酯。复合脂类分子中除脂肪酸和醇之外，还含有磷酸、含氮化合物或其他物质，包括磷脂、糖脂、硫脂、脂蛋白等。衍生脂类包括脂肪酸、类固醇、脂溶性维生素、萜类。习惯上把脂肪之外的脂类称为类脂。

脂类具有重要的生理功能。脂肪是生物体重要的能源物质，1g 脂肪氧化可产生 38.9kJ 的能量，而 1g 糖产生的能量是 16.7kJ；脂肪有防止机械损伤及防止热量散发的保护作用；脂肪可以作为脂溶性维生素的溶剂，促进维生素的吸收；脂肪能提供脂肪酸，作为体内激素等生理活性物质合成的前体。磷脂是生物膜的重要结构组分，生物膜中最丰富的脂类是甘油磷脂，动植物细胞膜中还存在着其他类脂，如鞘磷脂和糖鞘脂、类固醇。胆固醇可以转变为多种类固醇激素、维生素 D₃、胆汁酸等。糖脂与细胞识别、种特异性、组织免疫等有密切的关系。

脂类是人体重要的营养物质，脂类代谢与人体健康有密切的关系。

第一节 脂肪

一、脂肪的组成和结构

脂肪是 1 分子甘油和 3 分子脂肪酸所形成的酯，因此又称为甘油三酯或三酰甘油。脂肪的结构见图 2-1。

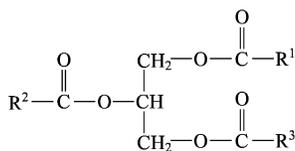


图 2-1 脂肪的结构

图 2-1 中，R¹、R²、R³ 为脂肪酸的烃基，其相同时，称为单纯甘油酯；不同时，称为混合甘油酯。多数天然脂肪是单纯甘油酯和混合甘油酯的混合物。

脂肪是生物体中能源储存物质的原因是脂肪酸中的碳为还原状态，氧化后释放大量的能量。同时，脂肪高度疏水，所占体积小，有机体易于携带。

脂肪在常温下有液态和固态两种存在状态，这与脂肪中脂肪酸的种类和数量有关。常温下为液态的称为油，固态的称为脂，所以脂肪也称为油脂。脂肪的性质主要取决于其所含的脂肪酸。

(一) 脂肪酸

1. 脂肪酸的分类

脂肪酸是脂肪族羧酸，绝大多数没有支链。根据碳原子数目，脂肪酸可以分为短链脂肪酸(C₆~

C₁₀)和长链脂肪酸(C₁₂~C₂₆)；按其烃基中是否含有双键，分为饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸；按人体能否合成，分为非必需脂肪酸和必需脂肪酸。

(1)饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸。饱和脂肪酸烃基中没有双键，常温下是固态；不饱和脂肪酸常温下是液态。

不饱和脂肪酸烃基中含有双键，因此也称为烯酸。根据烃基中双键的数目，又分为单不饱和脂肪酸(MUFA)和多不饱和脂肪酸(PUFA)。单不饱和脂肪酸分子中只有一个双键，多不饱和脂肪酸分子中含有2个及以上的双键。

脂肪酸可用“碳原子数：双键数 $\Delta^{\text{双键位置}}$ ”表示，如18：0表示十八个碳原子的饱和脂肪酸，即硬脂酸；18：1 Δ^9 表示十八个碳原子的单不饱和脂肪酸，双键的位置为C₉，即油酸。

常见的天然脂肪酸见表2-1。

表2-1 常见的天然脂肪酸

名称(俗称)	简写符号	结构式	来源
酪酸	4：0	CH ₃ (CH ₂) ₂ COOH	奶油
月桂酸	12：0	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	鲸蜡、椰子油
豆蔻酸	14：0	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ COOH	肉豆蔻油、椰子油
软脂酸	16：0	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ COOH	动植物油
硬脂酸	18：0	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	动植物油
花生酸	20：0	CH ₃ (CH ₂) ₁₈ COOH	花生油
油酸	18：1 Δ^9	CH ₃ (CH ₂) ₇ CH=CH(CH ₂) ₇ COOH	动植物油
亚油酸	18：2 $\Delta^{9,12}$	CH ₃ (CH ₂) ₄ (CH=CHCH ₂) ₂ (CH ₂) ₆ COOH	花生油等植物油
α -亚麻酸	18：3 $\Delta^{9,12,15}$	CH ₃ (CH ₂ CH=CH) ₃ (CH ₂) ₇ COOH	坚果、亚麻仁油
花生四烯酸	20：4 $\Delta^{5,8,11,14}$	CH ₃ (CH ₂) ₄ (CH=CHCH ₂) ₄ (CH ₂) ₂ COOH	卵磷脂、脑磷脂

(2)必需脂肪酸。必需脂肪酸(EFA)指维持人和动物正常生命活动所必需的，但体内不能合成或合成量不足，必须由食物提供的脂肪酸。

常见的必需脂肪酸有亚油酸、 α -亚麻酸。

人体可以合成饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸，如油酸。由于人体缺乏 Δ^9 以上的去饱和酶，不能在C₉与末端C之间形成2个及以上的双键，所以不能合成亚油酸和 α -亚麻酸。

营养学上通常把多不饱和脂肪酸(PUFA)分为n-3族和n-6族(ω -3族和 ω -6族)，从—CH₃数，第3个碳原子上有双键的PUFA，称为n-3族(ω -3族)，第6个碳原子上有双键的PUFA，称为n-6族(ω -6族)。亚油酸是n-6族， α -亚麻酸是n-3族。

(3)二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)。这两种PUFA都是n-3族，只存在于海水动物的脂肪中(由海洋浮游植物提供)，对海水鱼类、甲壳类的幼体发育起重要作用。目前，绝大多数海水鱼类的开口饵料是轮虫，用酵母培养的轮虫存在营养缺陷，即缺乏DHA和EPA，因此，在使用轮虫之前，必须进行营养强化，以提高轮虫体内DHA和EPA的含量。

人体中， α -亚麻酸可以转化为EPA和DHA，对维持人体健康有重要意义。

2. 脂肪酸的结构特点

高等动植物体内，脂肪酸碳链的长度多为14~20个碳原子，并且绝大多数为偶数，16~18个碳原子的脂肪酸最常见。12个碳原子以下的饱和脂肪酸大量存在于乳脂中。高等动植物体内的单不饱和脂肪酸，双键多在C₉和C₁₀之间，多不饱和脂肪酸的两个双键之间，一般相隔一个亚甲基

($-\text{CH}_2$)，只有少数植物体内的多不饱和脂肪酸存在共轭双键。高等动植物体内不饱和脂肪酸的双键都是顺式构型。如亚油酸的结构，见图 2-2。

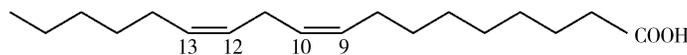


图 2-2 亚油酸的结构

(二)甘油

甘油是无色、无臭、有甜味的黏稠液体，化学名为丙三醇，分子中含有 3 个羟基，因此能与 3 分子脂肪酸成酯。甘油能与水混溶，不溶于乙醚、氯仿等有机溶剂。



脂肪的性质

二、脂肪的性质

(一)物理性质

纯净的脂肪无色、无臭、无味，相对密度小于 1。天然脂肪是几种脂肪的混合物，因此无固定的熔点，但有一定的范围。脂肪的熔点与其所含的脂肪酸有关，含饱和脂肪酸较多的脂肪熔点较高，含不饱和脂肪酸较多的脂肪熔点较低。脂肪不溶于水，在酒精、乙酸、丙酮等溶剂中的溶解度较小，一般用乙醚、石油醚提取脂肪。脂肪可以用作脂溶性维生素及色素的溶剂。

(二)化学性质

1. 水解与皂化

脂肪可以被酸、碱、酶水解。脂肪在碱性条件下的水解反应称为皂化作用(或皂化反应)。脂肪的皂化反应见图 2-3。

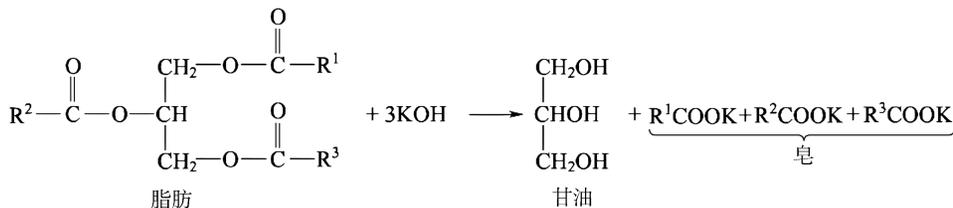


图 2-3 脂肪的皂化反应

完全皂化 1g 油脂所需 KOH 的质量(mg)称为皂化价(皂化值)。

$$\text{油脂平均分子量} = \frac{3 \times 56 \times 1000}{\text{皂化价}}$$

根据皂化值的大小可以推断油脂的分子量。油脂的分子量愈小，皂化值愈高。另外，若游离脂肪酸含量增大，皂化值随之增大。油脂的皂化值是指导肥皂生产的重要数据。

2. 加成反应

(1)氢化。在催化剂的作用下，脂肪中不饱和脂肪酸的双键经加氢饱和，液态的油可以全部氢化或部分氢化，形成固态或半固态的脂，以适应不同的需要。

氢化植物油可用于制作人造奶油、代可可脂、植脂末等，对健康的负面影响是部分氢化会产生反式脂肪酸。

不饱和脂肪酸中与双键相邻的亚甲基上的氢因受到双键的活化, 特别容易被除去, 因此容易在这个位置形成自由基。油脂自动氧化过程中产生氢过氧化物, 本身并无异味, 但由于氢过氧化物不稳定, 会发生分解与聚合反应, 生成不同的氧化产物, 生成小分子物质是油脂产生异味的原因。氢过氧化物的分解首先发生在过氧键位置, 然后再形成醛、酮、醇、酸等, 是一个复杂的过程。

油脂的不饱和程度越高, 越容易发生自动氧化。油脂与氧的接触面积越大, 温度越高, 越容易发生自动氧化。自由基的产生需要能量, 光及射线都是有效的氧化促进剂, 可提高自由基的生成速度, 从而促进油脂的自动氧化。金属离子(特别是过渡金属离子)能缩短自动氧化过程中的诱导期, 是助氧化剂, 能加速氧化过程。

酸价(酸值)可反映油脂中游离脂肪酸的含量, 是衡量油脂质量的一个重要指标。酸价是中和 1g 油脂中的游离脂肪酸所需要的 KOH 的质量(mg)。酸价越低, 说明油脂质量越好, 新鲜度和精炼程度越高。油脂酸败后, 酸价升高。目前, 我国食用植物油标准中规定了油脂的酸价的限值。

第二节 类脂

磷脂、蜡和甾体化合物(类固醇)等, 虽然它们在化学组成和结构上有较大差别, 但由于这些物质在物态及物理性质方面与油脂类似, 因此把它们称为类脂化合物, 简称类脂。

一、磷脂

磷脂是含磷酸的复合脂类, 是生物膜的结构成分。磷脂可分为甘油磷脂和鞘磷脂两类, 这两类磷脂分子中醇的种类不同, 甘油磷脂的结构骨架是甘油, 鞘磷脂的结构骨架是鞘氨醇。生物膜中最丰富的磷脂是甘油磷脂。

(一) 甘油磷脂

1. 甘油磷脂的结构

甘油磷脂含有甘油骨架。

甘油分子中 C_1 和 C_2 上的 $-OH$ 分别与 2 分子脂肪酸成酯, C_3 上的 $-OH$ 与 1 分子磷酸成酯, 形成的化合物为磷脂酸。磷脂酸是最简单的甘油磷脂, 游离存在的磷脂酸很少, 仅存在于甘油磷脂的降解过程中或作为代谢中间物出现在生物合成中。磷脂酸的结构见图 2-5。

甘油磷脂可以看作是磷脂酸的衍生物。磷脂酸分子中的磷酸与一个含羟基的化合物失去 1 分子水, 形成的化合物即为甘油磷脂。甘油磷脂的结构通式见图 2-6。

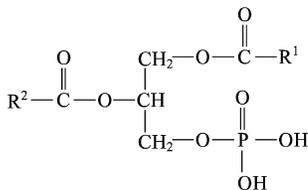


图 2-5 磷脂酸的结构

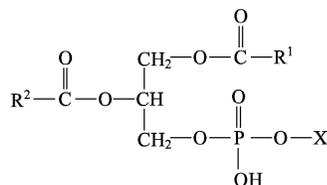


图 2-6 甘油磷脂的结构通式

不同的甘油磷脂分子中, X(醇基)不同。通常, 甘油磷脂中 $R^1\text{COOH}$ 是饱和脂肪酸, $R^2\text{COOH}$

是不饱和脂肪酸。甘油磷脂含极性头部和非极性尾部，为两亲性物质。

2. 重要的甘油磷脂

(1)卵磷脂。卵磷脂由磷脂酸和胆碱组成，因此称为磷脂酰胆碱。卵磷脂的结构见图 2-7。

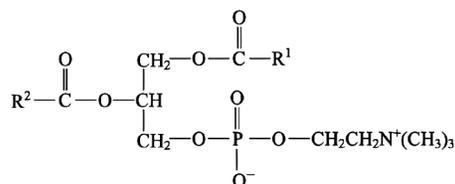


图 2-7 卵磷脂(磷脂酰胆碱)的结构

卵磷脂存在于植物的种子、动物的卵和神经组织中，是生物界分布最广的一种磷脂。卵磷脂是生物膜的重要组成部分，且具有保护生物膜的作用，参与体内脂肪代谢。

(2)脑磷脂。脑磷脂包括磷脂酰乙醇胺和磷脂酰丝氨酸两种物质，在动植物体内含量丰富。脑磷脂的结构见图 2-8。

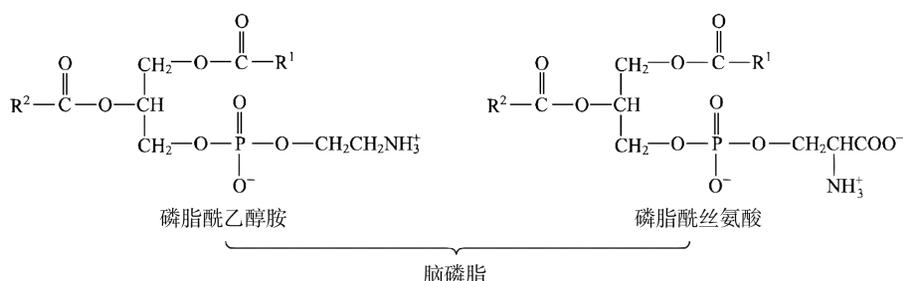


图 2-8 脑磷脂的结构

3. 甘油磷脂的性质

甘油磷脂是白色蜡状固体，溶于非极性溶剂中。甘油磷脂分子中含有不饱和脂肪酸，容易被氧化；可被磷脂酶水解，生成仅含一分子脂肪酸的产物(溶血磷脂酸)，可使细胞膜溶解。在一定条件下，各种甘油磷脂可以互相转化，如磷脂酰丝氨酸脱羧转化为磷脂酰乙醇胺，磷脂酰乙醇胺甲基化转化为磷脂酰胆碱。

(二)鞘磷脂

鞘磷脂也称为鞘脂(鞘脂包括鞘磷脂和糖鞘脂)，结构骨架是鞘氨醇。鞘氨醇是一个十八碳的不饱和二元醇，在 C₄ 和 C₅ 之间有一个反式双键，C₂ 上有一个—NH₂。鞘氨醇 C₂—NH₂ 与 1 分子脂肪酸以酰胺键连接，形成神经酰胺，是所有鞘脂类的代谢前体。鞘氨醇和神经酰胺的结构见图 2-9。

鞘磷脂由神经酰胺 C₁—OH 与磷酰胆碱结合而成，见图 2-10。

组成鞘磷脂的高级脂肪酸中，除软脂酸、硬脂酸和二十四烷酸外，还有神经酸(顺-Δ¹⁵-二十四碳烯酸)。鞘脂类在哺乳动

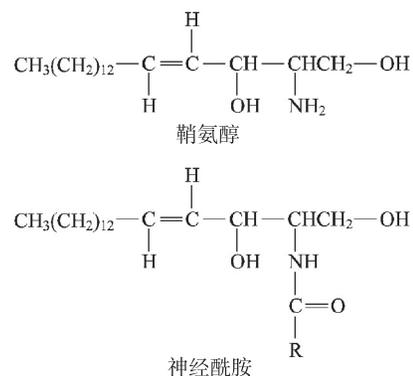


图 2-9 鞘氨醇和神经酰胺的结构

物的中枢神经系统组织中含量特别丰富。

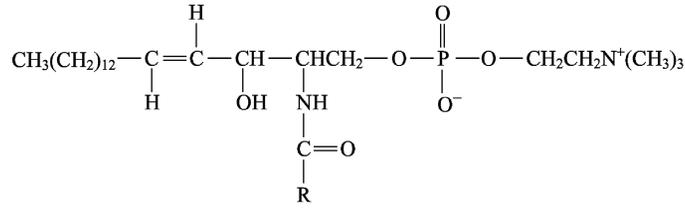


图 2-10 鞘磷脂的结构

二、糖脂

(一)糖鞘脂

糖鞘脂是由糖的半缩醛羟基与神经酰胺 C₁-OH 以糖苷键相连而成的，包括脑苷脂和神经节苷脂。

1. 脑苷脂

脑苷脂是含有一个单糖残基的糖鞘脂，单糖通过 β-糖苷键与神经酰胺相连。半乳糖脑苷脂(半乳糖神经酰胺)在动物神经组织的细胞膜中含量丰富，有些哺乳动物的非神经组织细胞膜中含有葡萄糖脑苷脂。半乳糖脑苷脂的结构见图 2-11。

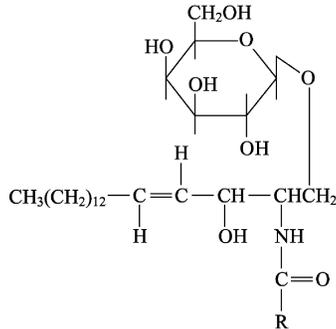


图 2-11 半乳糖脑苷脂的结构

2. 神经节苷脂

神经节苷脂是结构最复杂的糖鞘脂，是由含一个或多个唾液酸(主要成分为 N-乙酰神经氨酸)的寡糖链与神经酰胺相连而成的。人神经系统的神经元细胞膜至少含有 15 种神经节苷脂，其功能可能与通过神经元的神经冲动传递有关。

(二)甘油糖脂

甘油糖脂是由一个或多个单糖基与甘油单酯或二酰甘油中的 C₃-OH 以糖苷键相连而成的，常见的糖基有半乳糖、6-脱氧-D-葡萄糖、甘露糖和葡萄糖。甘油糖脂存在于植物、微生物、动物神经系统的细胞膜中。

三、蜡

蜡是高级脂肪酸与高级一元醇形成的酯。天然蜡中往往含有一些游离脂肪酸和脂肪醇。蜡不能

被脂肪酶水解,也不易皂化,对人和动物体无营养价值。植物的叶子和果实,动物的皮肤、羽毛及外骨骼上通常有一薄层蜡,起防水保护作用。蜡常温下是固体,能溶于醚、苯、氯仿等有机溶剂。常见的天然蜡见表 2-2。

表 2-2 常见的天然蜡

名称	组成	
	脂肪酸	脂肪醇
鲸蜡	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{CH}_2\text{OH}$
巴西棕榈蜡	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{28}\text{CH}_2\text{OH}$ 和 $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{24}\text{CH}_2\text{OH}$
白蜡	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{24}\text{COOH}$	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{24}\text{CH}_2\text{OH}$

四、类固醇

类固醇也称为甾类化合物,是真核生物生物膜的组成成分,也是激素、维生素等生理活性物质的前体。类固醇的结构特点是具有含有环戊烷多氢菲的母核,带有角甲基的环戊烷多氢菲称甾核,见图 2-12。

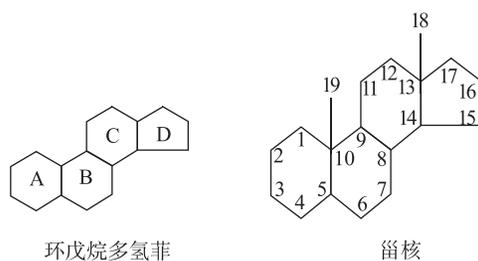


图 2-12 环戊烷多氢菲和甾核的结构



类固醇

(一)胆固醇

胆固醇是脊椎动物细胞的重要成分,在动物的脑、神经组织、卵黄中含量较高,因 1784 年从胆石中提取出来而得名。植物细胞中一般不存在胆固醇。胆固醇的结构见图 2-13。

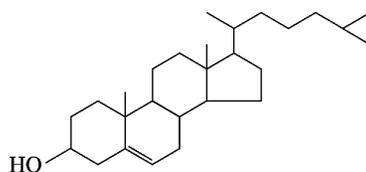


图 2-13 胆固醇的结构

胆固醇在组织中一般以非酯化的游离态存在,但在肾上腺、血浆及肝中,大多与脂肪酸结合成酯。

胆固醇具有重要的生理功能。胆固醇是构成生物膜的重要成分,是胆汁酸盐、类固醇激素的前体,7-脱氢胆固醇可以转变为维生素 D_3 (见图 2-14)。

7-脱氢胆固醇存在于动物的皮下,由胆固醇转化而来。人体内胆固醇的来源:一是从食物中摄取,二是体内合成。合成胆固醇的原料是糖代谢和脂肪酸代谢的中间产物乙酰辅酶 A,成人每天可以

合成 1~1.5g 胆固醇。



图 2-14 7-脱氢胆固醇转变为维生素 D₃

胆汁酸盐作为乳化剂，可促进脂肪的消化吸收。类固醇激素主要有睾酮、雌二醇、孕酮、肾上腺皮质激素等，是胆固醇的衍生物。类固醇激素是信号分子，可传递细胞间的信息。类固醇激素由某一特别组织产生，经血液传递到靶组织，与受体蛋白结合，可调节细胞的代谢及基因表达。

胆固醇分子中的羟基能与脂肪酸成酯，形成胆固醇酯，是血液中脂蛋白的成分。人体内胆固醇含量过高，会引起动脉粥样硬化。

(二)其他固醇

植物固醇是植物细胞的重要组分。植物固醇主要有豆固醇和谷固醇，大豆、麦芽中含量较多。真菌、酵母中含有麦角固醇。麦角固醇在紫外线照射下可以转化为维生素 D₂ (见图 2-15)。



图 2-15 麦角固醇转化为维生素 D₂

人体不能合成植物固醇。植物固醇的吸收率低。植物固醇的摄入能降低胆固醇的吸收。

简答题

1. 简述脂类的分类及其主要生物学功能。
2. 简述磷脂的分类及其在生物膜中的作用。