

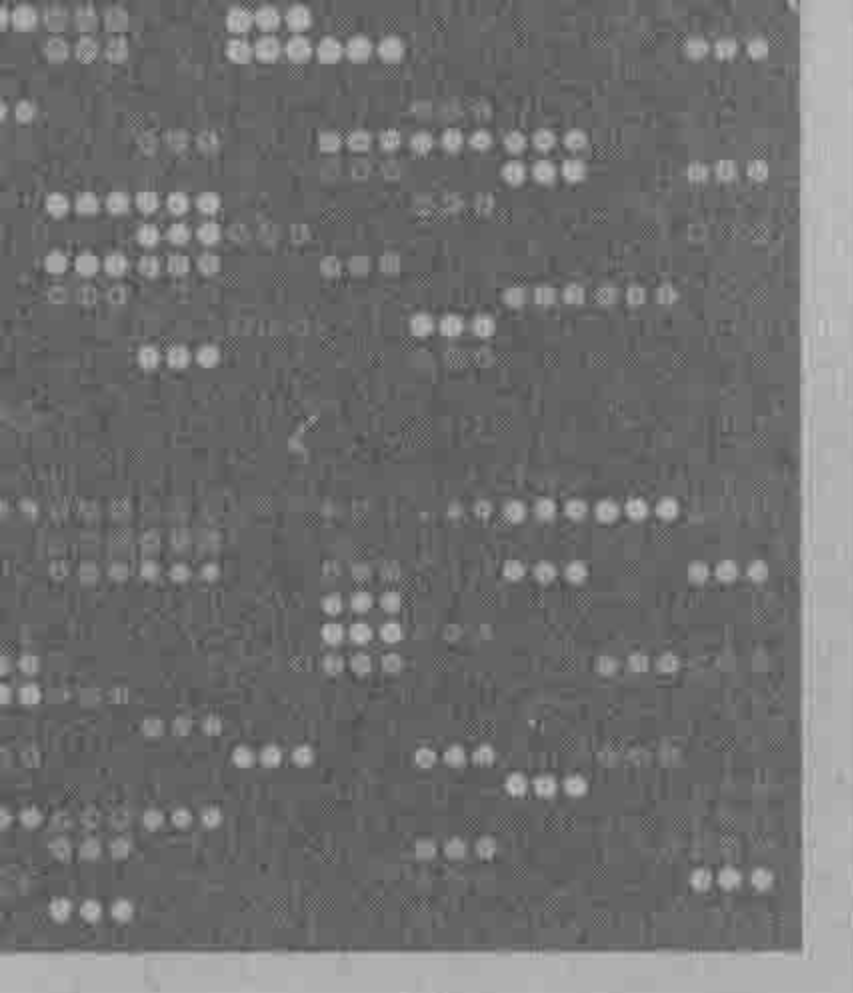
黄酮及黄酮醇 的抗癌作用

张 强 著

The Anti-Cancer Activity
of Flavones
and Flavonols



化学工业出版社



黄酮及黄酮醇 的抗癌作用

张 强 著

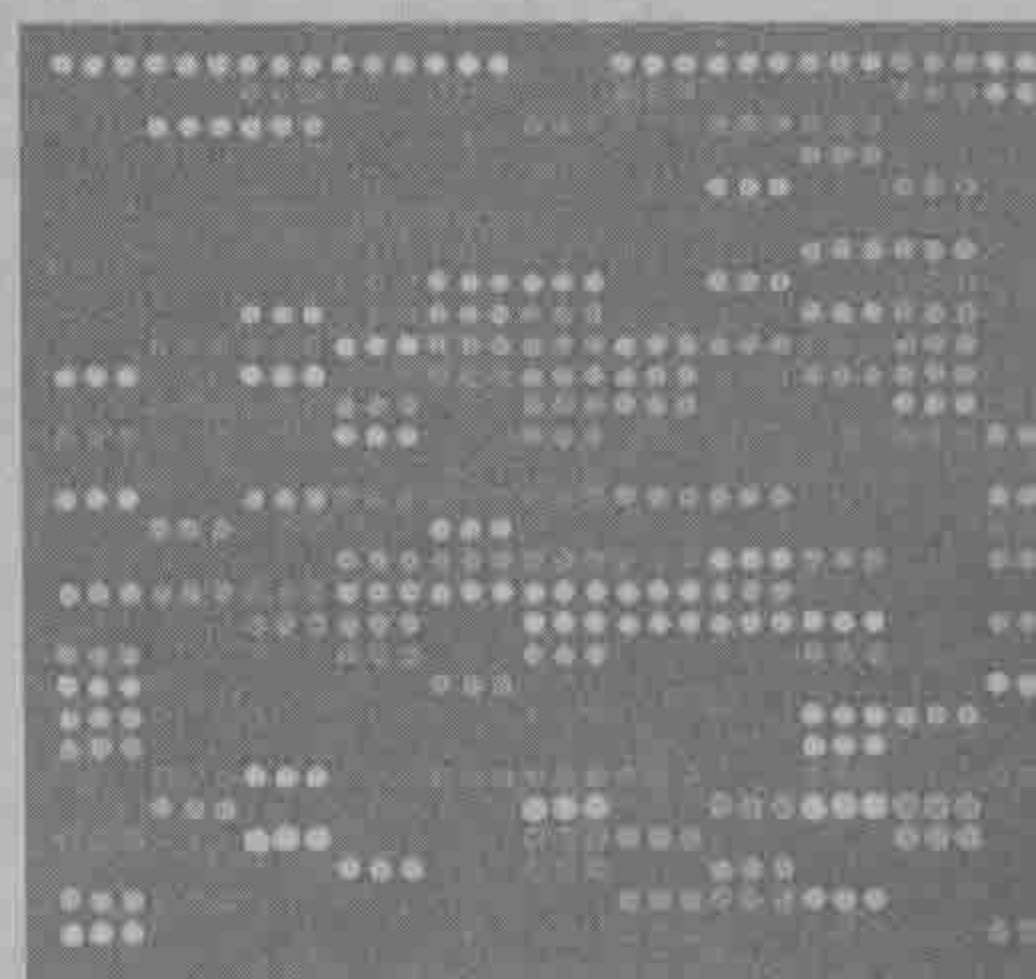


The Anti-Cancer Activity
of Flavones
and Flavonols



化学工业出版社

· 北 京 ·



黄酮和黄酮醇是广泛存在于植物性食物中的生物活性物质,其抗癌作用及抗癌机制是近年来膳食与癌症防治研究中的热点问题。本书汇集了著者多年研究成果,从不同角度揭示了黄酮和黄酮醇对人类多种癌细胞的抑制作用和分子机制。

本书适合从事植物化学研究及从事肿瘤病学研究的相关人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

黄酮及黄酮醇的抗癌作用/张强著. —北京: 化学工业出版社, 2017. 7

ISBN 978-7-122-30106-2

I. ①黄… II. ①张… III. ①黄酮-抗肿瘤作用-研究
②黄酮醇-抗肿瘤作用-研究 IV. ①O626. 31②R961

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 156157 号

责任编辑: 戴小玲 管德存

责任校对: 宋 玮

文字编辑: 何 芳

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京云浩印刷有限责任公司

710mm×1000mm 1/16 印张 9½ 字数 164 千字 2017 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究



序

食物是人类赖以生存的关键物质基础之一，它不仅影响着人类的进化与发展，也关系着机体的疾病与健康。食物如此重要，除了因为它能为机体提供代谢所需的各类营养物质外，还因为它含有一些能够调节机体功能的活性成分。植物化学物质就是植物性食物中含有的一大类典型的活性成分。植物化学物质虽然不直接参与机体的能量代谢、功能分子组装、细胞及组织构建等重要生命过程，但是它对生命过程具有精妙的调节功能，对一些疾病具有一定的治疗和保健作用。作为植物化学物质中的一类，类黄酮化合物因其在植物性食物中相对含量高、存在广泛、活性多样且显著，引起人们的高度关注。

随着社会、经济、文化、制度的发展，我们的膳食结构及方式不断地变化，与之而来人类疾病谱也发生着变化。从茹毛饮血到烟火熟食，从饿殍遍野到丰衣足食，从食不厌精到平衡饮食，每一次膳食结构的变革都会对人类的健康、疾病、寿命等产生重大影响。以我国为例，在建国前及建国后初期，经历战争、灾难、贫困的摧残，人们的健康水平和平均寿命都很低，饥饿和传染性疾病是导致人群死亡的主要原因，营养素利用能力成为当时存活的关键因素。如今，随着生活水平的提高、食物的丰沛及卫生条件的改善，良好的营养素利用能力反而带来一些新的健康问题。例如，我国营养相关性的慢性非传染性疾病（如癌症、糖尿病、痛风以及心脑血管病等）的发病率逐年增高，并已产生严重的社会影响。其中，癌症已成为导致我国城市居民死亡的首要病因。癌症的发生与蔬菜、水果等植物性食物的低比例摄入存在密切关系。因此，研究植物化学物质的抗癌作用与机制对于科学防治癌症具有重要意义。

本书的著者汇集了其对类黄酮化合物抗癌作用及机制的研究成果和学术见解，精心撰成《黄酮及黄酮醇的抗癌作用》一书。本书中的一些内容，在其他学术专著中不多见，具有新颖性。就科学性而言，本书中所列数据是通过严谨周密的实验设计、采用先进可靠的研究方法而获得的，非姑妄之言。就现实性而言，本书所探讨的膳食与癌症的关系正是当前人们关心的热点问题。相信此书的出版，能让读者对黄酮及黄酮醇的抗癌作用有更加深刻的了解，更加关注膳食结构与疾病关系的相关研究。我更希望一些科研工作者在未来能在这一领域有进一步贡献、有所建树。

东北农业大学教授、博士研究生导师

赵进旺



前言

从古至今，膳食与健康一直是人们极为关注的问题。我国现存最早的医学典籍《黄帝内经·素问》中记载：“五谷为养，五果为助，五畜为益，五菜为充，气味合而服之，以补精益气”。由此可见，中国人很早就认识到了膳食结构以及合理营养对人体健康的重要作用与意义。

时至今日，面对社会经济、文化政治以及科学技术的飞速发展，我们的饮食结构及方式也不断地变化，同时一些新的健康问题也随之出现。其中，膳食与癌症防治的关系与机制就是一个极为重要却仍在探究的问题。

黄酮和黄酮醇是广泛存在于植物性食物中的生物活性物质，其抗癌作用及抗癌机制是近年来膳食与癌症防治研究中的热点问题。本书汇集了多年来的相关研究成果，希望能为读者了解黄酮和黄酮醇化合物的结构特征、抗癌活性以及抗癌分子机制等提供一些参考和帮助。

本书共分七章：绪论、黄酮及黄酮醇对癌细胞增殖的抑制作用、黄酮及黄酮醇对癌细胞周期停滞的诱导作用、黄酮及黄酮醇对癌细胞的凋亡诱导作用、黄酮及黄酮醇对癌细胞自噬的诱导作用、黄酮及黄酮醇对癌细胞分化的诱导作用、黄酮及黄酮醇对癌细胞关键基因表达的影响。从不同的研究角度，揭示黄酮和黄酮醇对人类多种癌细胞的抑制作用和分子机制。

东北农业大学食品学院赵新淮教授为本书作序，谨此表示衷心感谢。

由于时间仓促，著者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

著者

2017年2月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概况	1
第二节 类黄酮化合物的来源及结构特征	4
第三节 类黄酮化合物的吸收和代谢	10
一、类黄酮化合物的吸收	10
二、类黄酮化合物的代谢	13
三、类黄酮化合物的癌细胞吸收和代谢	14
第四节 黄酮和黄酮醇的摄入与癌症的发生	15
第二章 黄酮及黄酮醇对癌细胞增殖的抑制作用	18
第一节 概况	18
一、基于 DNA 合成的细胞增殖检测方法	19
二、基于代谢活性的细胞增殖检测方法	21
三、基于细胞增殖标志物的检测方法	21
四、基于 ATP 浓度的细胞增殖检测方法	22
五、基于染色和计数的细胞增殖检测方法	22
第二节 黄酮及黄酮醇对癌细胞增殖的抑制作用	22
一、黄酮及黄酮醇对人食管癌细胞的增殖抑制作用	22
二、黄酮及黄酮醇对人肝癌细胞的增殖抑制作用	33

三、黄酮木犀草素对人肠癌细胞的增殖抑制作用	35
四、黄酮木犀草素对人乳腺癌细胞的增殖抑制作用	36
五、黄酮、黄酮醇及异黄酮对人前列腺癌细胞的增殖抑制作用	37
第三节 黄酮及黄酮醇抑制癌细胞增殖的机制及构效关系分析	38
第三章 黄酮及黄酮醇对癌细胞周期停滞的诱导作用	47
第一节 概况	47
第二节 黄酮及黄酮醇对癌细胞周期停滞的诱导作用	49
一、黄酮及黄酮醇对人食管癌细胞周期停滞的诱导作用	49
二、黄酮及黄酮醇对人肝癌细胞周期停滞的诱导作用	53
第三节 黄酮及黄酮醇诱导癌细胞周期停滞的机制分析	54
第四章 黄酮及黄酮醇对癌细胞的凋亡诱导作用	64
第一节 概况	64
第二节 黄酮及黄酮醇对癌细胞凋亡的诱导作用	66
一、黄酮及黄酮醇对人食管癌细胞凋亡的诱导作用	66
二、木犀草素对人肠癌细胞凋亡的诱导作用	69
三、黄酮及黄酮醇对人前列腺癌细胞凋亡的诱导作用	72
第三节 黄酮及黄酮醇诱导癌细胞凋亡的机制分析	73
一、通过调控 p53 基因诱导癌细胞凋亡	76
二、对 Bcl-2 家族成员的影响	76
三、对半胱天冬酶级联反应的影响	77
四、对其他细胞信号通路的调节	78
五、黄酮和黄酮醇诱导癌细胞凋亡的构效关系	78
第五章 黄酮及黄酮醇对癌细胞自噬的诱导作用	79
第一节 概况	79
一、细胞自噬的概念与分类	79
二、细胞自噬的过程	80
三、细胞自噬与癌症的关系	82
第二节 黄酮木犀草素对人肠癌细胞自噬的诱导作用	83
第三节 黄酮木犀草素诱导人肠癌细胞自噬的机制分析	88

第六章	黄酮及黄酮醇对癌细胞分化的诱导作用	92
第一节	概况	92
一、	癌细胞的分化特征	93
二、	癌细胞的诱导分化	95
第二节	黄酮及黄酮醇对人食管癌细胞分化的诱导作用	99
第三节	黄酮及黄酮醇诱导癌细胞分化的机制分析	105
第七章	黄酮及黄酮醇对癌细胞关键基因表达的影响	110
第一节	概况	110
第二节	黄酮及黄酮醇对癌细胞基因表达的调控作用	113
一、	黄酮及黄酮醇对人食管癌细胞基因表达谱的调控作用	113
二、	黄酮及黄酮醇对人肝癌细胞 PIG3 基因表达的调控作用	120
第三节	黄酮及黄酮醇调控癌细胞基因表达的机制分析	127
参考文献		130

第一章 绪论

第一节 概况

随着科技的进步和社会的发展，自然灾害、食物短缺以及各种传染性疾病对人类生存和健康的威胁正在逐渐被减小。与之相反，各种慢性疾病的危害却在相对增加，癌症就是其中之一。它已经成为危害人类健康的第二大疾病，全球每年癌症发病人数高达 1000 万，死亡人数超过 600 万。

从病因学上讲，个人饮食习惯对癌症的发生和发展有很大影响。据报道，近 30%~40% 的癌症可以通过科学的饮食得以预防，而各种常量营养素的合理摄入及各种微量营养素的平衡摄入是科学饮食的重要部分。针对美国的康涅狄格州、新泽西州和华盛顿州西部的人群，开展的一项有关膳食中常量营养素和微量营养素摄入与食管癌和胃癌发生关系的病例对照研究表明，膳食中的微量营养素（如 β -胡萝卜素、叶酸盐、维生素 C 和维生素 B₆）的摄入与食管癌和胃癌的发生呈显著负相关；与之相反，常量营养素胆固醇和动物蛋白的长期摄入则会增加这两种癌症的发病风险，尤其是脂肪的摄入更是明显增加了食管腺癌的发病风险。因此，动物性食物的长期摄入可能会增加食管癌和胃癌的发病风险，而植物性食物的摄入则有利于预防这两种癌症的发生（表 1-1）。但是，植物性食物中发挥癌症预防作用的主要物质并不是各种微量营养素和个别常量营养素，而是其中含有的多种非营养性的化学成分，被称为植物化学物质（phytochemicals）。合理充分地摄入植物化学物质目前被认为是科学饮食的重要构成。

表 1-1 膳食常量营养素及微量营养素的摄入与食管癌和胃癌发生的关系

项目	食管鳞癌/ 对照 ORs ^① (95% CIs ^②)	食管腺癌/ 对照 ORs(95% CIs)	胃贲门腺癌/ 对照 ORs(95% CIs)	非贲门胃癌/ 对照 ORs(95% CIs)
常量营养素				
能量	0.77(0.59~1.01)	1.12(0.91~1.38)	1.15(0.94~1.41)	1.11(0.92~1.34)
总脂肪	0.98(0.52~1.86)	2.18(1.27~3.76)	0.99(0.59~1.66)	1.08(0.67~1.74)
饱和脂肪	2.16(1.30~3.58)	2.34(1.55~3.54)	1.19(0.80~1.77)	1.51(1.04~2.19)
多不饱和脂肪	0.41(0.25~0.66)	0.86(0.59~1.24)	0.86(0.60~1.22)	0.66(0.47~0.93)
总纤维	0.24(0.14~0.38)	0.28(0.19~0.40)	0.43(0.30~0.61)	0.38(0.28~0.53)
不溶性纤维	0.24(0.15~0.38)	0.28(0.19~0.41)	0.45(0.32~0.64)	0.40(0.29~0.55)
可溶性纤维	0.27(0.16~0.43)	0.30(0.21~0.43)	0.42(0.30~0.59)	0.40(0.29~0.55)
淀粉	1.14(0.73~1.78)	1.12(0.80~1.59)	1.61(1.14~2.28)	2.07(1.51~2.83)
糖类	0.68(0.37~1.25)	0.34(0.20~0.58)	0.70(0.42~1.17)	0.64(0.40~1.01)
总蛋白	1.75(1.07~2.88)	1.49(1.02~2.18)	1.64(1.11~2.42)	1.52(1.08~2.15)
动物性蛋白	2.14(1.47~3.12)	1.79(1.33~2.41)	1.60(1.19~2.15)	1.58(1.22~2.06)
植物性蛋白	0.34(0.21~0.56)	0.39(0.27~0.58)	0.75(0.53~1.07)	0.63(0.45~0.87)
胆固醇	1.63(1.22~2.18)	1.74(1.36~2.23)	1.50(1.19~1.90)	1.68(1.35~2.09)
微量营养素				
维生素 A	0.53(0.36~0.79)	0.47(0.34~0.66)	0.45(0.32~0.63)	0.60(0.46~0.79)
β-胡萝卜素	0.43(0.29~0.63)	0.43(0.32~0.59)	0.46(0.34~0.62)	0.58(0.46~0.75)
视黄醇	1.15(0.88~1.50)	1.07(0.84~1.35)	0.99(0.77~1.28)	1.05(0.85~1.28)
维生素 D	1.00(0.74~1.36)	1.10(0.86~1.40)	1.05(0.81~1.36)	0.92(0.72~1.16)
维生素 E	0.37(0.22~0.60)	0.73(0.54~1.00)	0.75(0.55~1.02)	0.71(0.54~0.94)
维生素 B ₁	0.78(0.46~1.30)	0.73(0.50~1.07)	1.03(0.71~1.50)	1.20(0.85~1.70)
维生素 B ₂	1.26(0.84~1.89)	1.11(0.82~1.52)	1.20(0.86~1.66)	1.19(0.89~1.59)
尼克酸	0.74(0.48~1.16)	1.07(0.77~1.48)	1.12(0.82~1.54)	1.13(0.84~1.52)
叶酸盐	0.58(0.39~0.86)	0.48(0.36~0.66)	0.73(0.55~0.97)	0.67(0.51~0.88)
维生素 B ₆	0.45(0.30~0.69)	0.53(0.38~0.73)	0.65(0.47~0.88)	0.59(0.45~0.79)
维生素 B ₁₂	1.51(1.15~2.00)	1.39(1.10~1.76)	1.27(1.01~1.60)	1.38(1.13~1.68)
维生素 C	0.53(0.36~0.79)	0.45(0.33~0.61)	0.64(0.49~0.84)	0.59(0.45~0.76)

① ORs 表示修正后的优势比，修正包括性别、地域、年龄、种族、收入、教育、通常体重指数、日吸烟量、啤酒白酒饮料的年消费量以及能量摄入。

② 95% CIs 表示 95%可信区间。

植物化学物质是一大类来源于植物性食物中的非营养性的活性成分。目前已经在水果、蔬菜、谷物以及其他植物性食物中，发现并鉴定了超过 25000 种单体的植物化学物质。然而这些可能只是冰山的一角，仍有大量的植物化学物质没有被发现和鉴定，这可能是目前仍没有关于植物化学物质的官方分类报道的原因之一。植物化学物质主要分为：类胡萝卜素类、酚类、生物碱类、含氮化合物类以及有机硫化物类等（图 1-1）。图 1-2 列出了各类化合物中几种典型物质的分子结构及其主要来源食物。

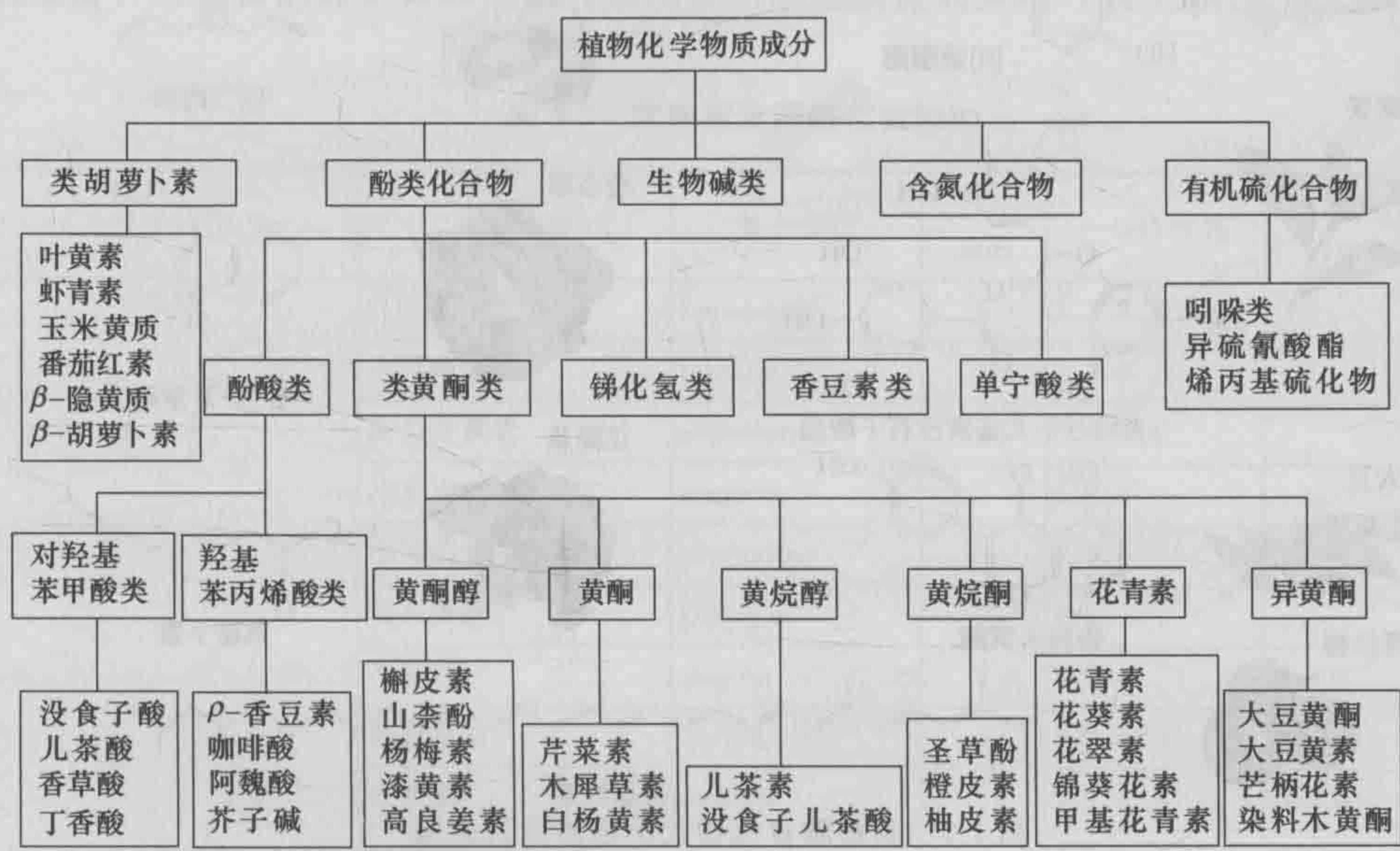


图 1-1 膳食植物化学物质的分类
类黄酮类未列出全部亚类

类黄酮化合物是植物化学物质的重要组成部分，在植物化学物质对人类癌症的预防和治疗作用中扮演着极为重要的角色。所以，类黄酮化合物抗癌活性以及抗癌分子机制的研究也是植物化学物质抗癌活性研究中的重要内容之一。不仅如此，类黄酮还是一个由数量庞大的化合物组成的超级家族，这些化合物虽结构极为相似，但各具“个性”，有的更多地体现于其化学特点，有的则更明显地表现在其生物学活性。因此，确定类黄酮化合物的化学特征对其发挥抗癌活性的影响作用，不仅可以合理地预测新发现化合物的生物活性，还可以有意识地改造或合成类黄酮化合物，使其更具生物活性，更具应用价值。

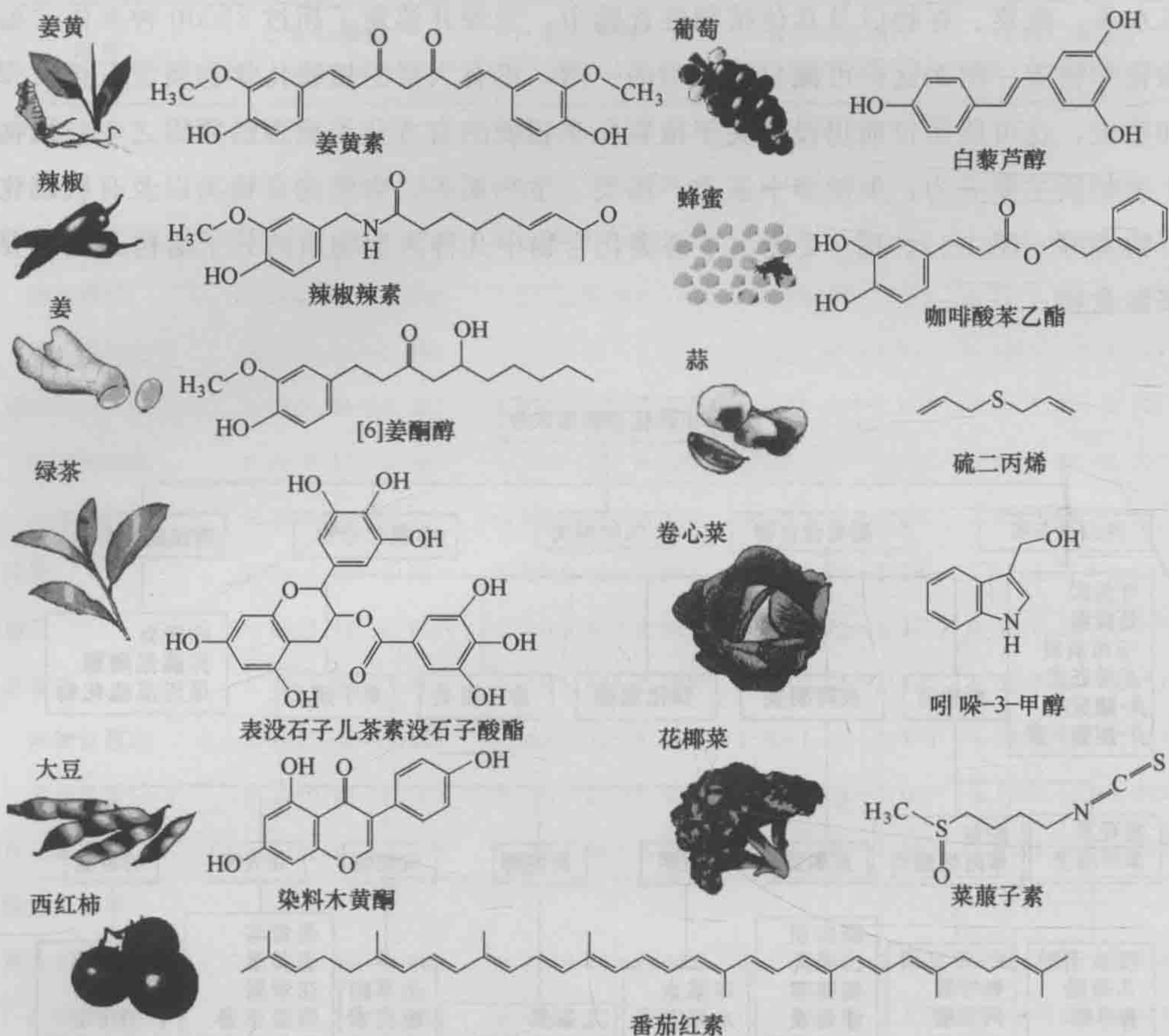


图 1-2 某些膳食植物化学物质及其来源

第二节 类黄酮化合物的来源及结构特征

从一个世纪前作为一种植物染料被发现和应用，到如今已有近万篇的研究报道 (NCBI)，类黄酮化合物对人类生活的重要性不言而喻。

类黄酮化合物在自然界已经存在了近十亿年，是所有陆生微管植物体中的次级代谢产物，具有广泛的生理、生化和生态学功能，如生长调节、光敏作用和能量转换、形态发生、呼吸控制、光合作用、抵御紫外线、花的呈色、种间交互作用以及植物防御等。

类黄酮化合物的分子结构特征是 $C_6-C_3-C_6$ 碳架。图 1-3 显示了类黄酮的一般结构特征，以及区别分子中碳原子位置的编码系统。三个酚环分别被标为 A 环、

B环以及C环（或呋喃）。目前，已经鉴定了 14 类不同化学结构的类黄酮化合物，其中研究得最为清楚的有 8 类，分别为黄酮醇类（flavonols）、黄酮类（flavones）、黄烷酮类（flavanones）、黄烷醇类（flavanols） [或儿茶素类（catechins）]、花色苷类（anthocyanins）、异黄酮类（isoflavones）、二氢黄酮醇类（dihydroflavonols）以及查耳酮类（chalcones），其中黄酮和黄酮醇是膳食中含量最高的类黄酮化合物（表 1-2 和表 1-3），而黄烷酮、黄烷醇、二氢黄酮醇以及二氢查耳酮则被认为是微量类黄酮（表 1-4）。

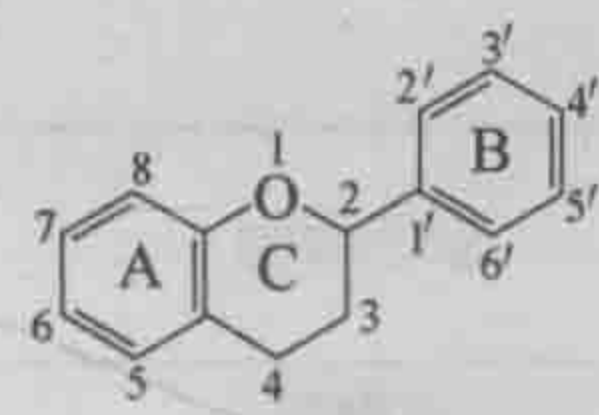
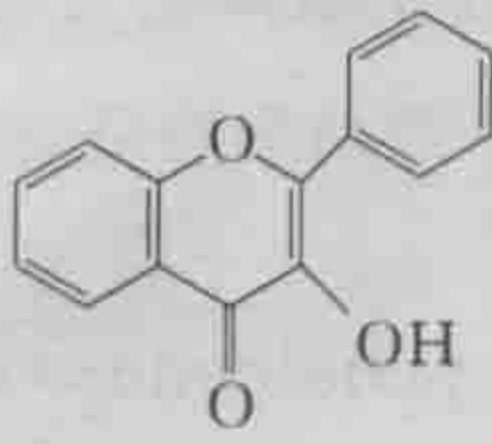


图 1-3 类黄酮化合物的一般结构特征

表 1-2 黄酮和黄酮醇化合物

分子结构	中文名称	英文名称	—OH 总数	—OH 位置	其他取代基 (位置)
黄酮	8-羟基木犀草素	hypolaetin	5	5,7,8,3',4'	
	木犀草素	luteolin	4	5,7,3',4'	
	野黄芩黄素	scutellarein	4	5,6,7,4'	
	芹菜素	apigenin	3	5,7,4'	
	水飞蓟素	silymarin	3	4,6,3'	
	黄芩黄素	baicalein	3	5,6,7	
	白杨素	chrysin	2	5,7	
	异荭草素	isoorientin	4	5,7,3',4'	Glu(6)
	荭草素	orientin	4	5,7,3',4'	Glu(8)
	牡荆素	vitexin	3	5,7,4'	Glu(8)
	胡麻黄素	pedalitin	3	5,3',4'	O-Me(7)
	洋茺萸黄素	diosmetin	3	5,7,3'	O-Me(4')
	高车前素	hispidulin	2	5,7	O-Me(4')
	蓟黄素	cirsimaritin	2	5,7	O-Me(6,7)
黄酮醇	棉花素	gossypetin	6	3,5,7,8,3',4'	
	6-羟基槲皮素	quercetagen	6	3,5,6,7,3',4'	
	杨梅素	myricetin	6	3,5,7,3',4',5'	
	桑色素	morin	5	3,5,7,2',4'	
	槲皮素	quercetin	5	3,5,7,3',4'	
	洋槐黄素	robinetin	5	3,7,3',4',5'	
	山柰酚	kaempferol	4	3,5,7,4'	
	漆树黄酮	fisetin	4	5,7,3',4'	
	高良姜素	galangin	3	3,5,7	

续表

分子结构	中文名称	英文名称	—OH 总数	—OH 位置	其他取代基 (位置)
黄酮醇 	杨梅苷	myricitrin	5	3,7,3',4',5'	O-Rh(3)
	槲皮苷	quercitrin	4	5,7,3',4'	O-Rh(3)
	芦丁	rutin	4	5,7,3',4'	O-Rh(3)
	鼠李黄素	rhamnetin	4	3,5,7,3'	O-Me(4')
	桉柳黄素	tamarixetin	3	3,5,7	O-Lig-O(4')

注：Glu—葡萄糖；Lig—木质素；Me—甲基；Rh—鼠李糖。

表 1-3 部分植物性食物中黄酮和黄酮醇的含量 (mg/kg 鲜重或 mg/mL)

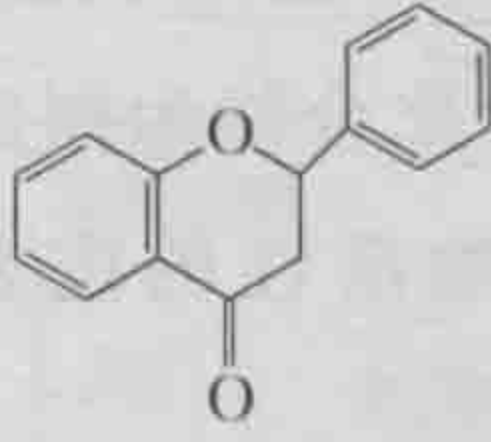
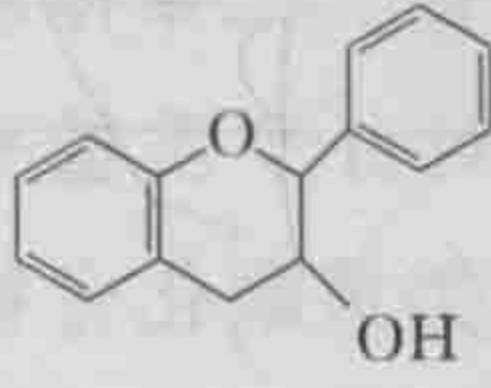
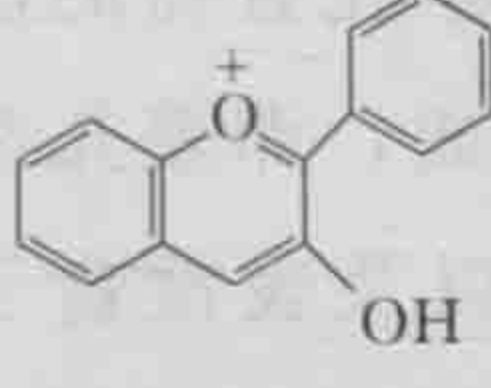
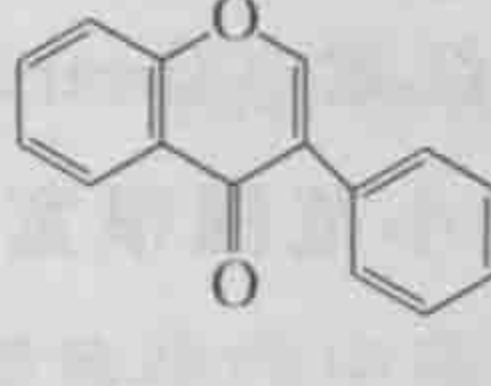
食品	槲皮素	山柰酚	杨梅黄素	木犀草素	芹菜素
绿豆	16	—	—	—	—
宽豆	20	—	26	—	—
卷心菜	30~37	60~72	—	—	—
芽甘蓝	0~6	704~709	—	—	—
洋白菜,绿	—	—	—	—	—
红	4.6	—	—	—	—
白	—	—	—	—	—
芹菜,叶	—	—	—	200	750
茎	—	—	—	5~20	16~61
番茄	2~14	—	3	—	—
樱桃番茄	63	—	—	—	—
羽衣甘蓝	110~120	211~470	—	—	—
青葱	—	30~31	—	—	—
莴苣	14~79	—	—	—	—
洋葱	340~347	—	—	—	—
菠菜	—	—	—	—	—
菊苣	<103	46	—	—	—
苹果	20~36	—	—	—	—
杏	25~26	—	—	—	—
樱桃	10~15	—	—	—	—
葡萄,黑	15~37	—	4.5	—	—
红	2~12	—	4.5	—	—

续表

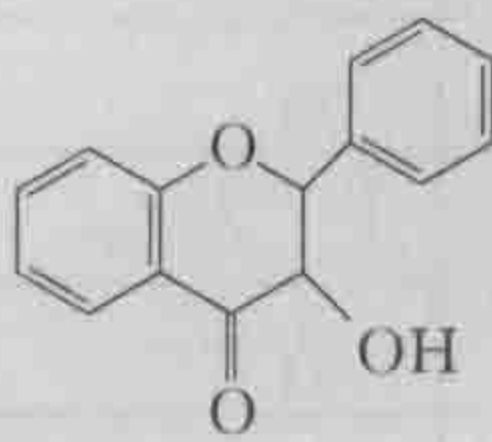
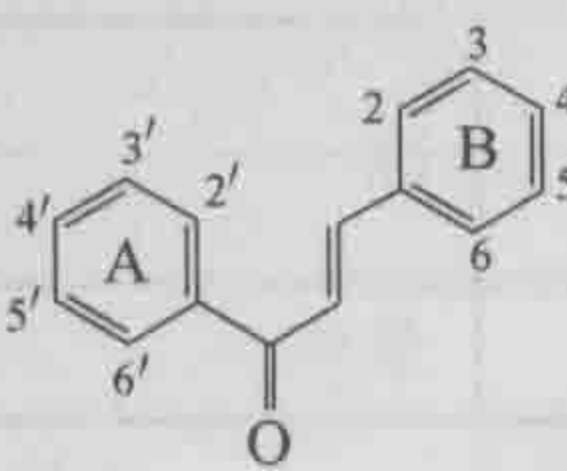
食品	槲皮素	山柰酚	杨梅黄素	木犀草素	芹菜素
葡萄干,黑	37	1	—	—	—
红	8~13	—	—	—	—
李子	9~15	—	—	—	—
草莓	6~8.6	5~12	—	—	—
梨	—	—	—	—	—
红茶	14~17	14~16	—	—	—
番茄汁	13	—	—	—	—
橙汁	5.7	—	—	—	—
葡萄汁/新鲜葡萄汁	4.4/4.9	—	6.2	—	—
红葡萄酒	8.3	—	7.9	—	—

注：糖苷水解后采用 HPLC 方法检测；“—”表示低于检测限度。

表 1-4 黄烷酮、黄烷醇、花色苷、异黄酮、二氢黄酮醇以及查耳酮化合物

分子结构	化合物	英文名称	—OH 总数	—OH 位置	其他取代基 (位置)
黄烷酮 	圣草酚	eriodictyol	4	5,7,3',4'	
	柚皮素	naringenin	3	5,7,4'	
	橙皮素	hesperetin	3	5,7,3'	O-Me(4')
	柚皮苷	naringin	2	5,7,3',4' ①	O-Rh-Glu(5)
	橙皮苷	hesperidin	2	5,3',4' ①	Rh-Glu, O-Me(7,4')
黄烷醇 	白矢车菊苷元	leucocyanidol	6	3,4,5,7,3',4'	
	(+)-儿茶素	(+)-catechin	5	3,5,7,3',4'	
	(+)-表儿茶素	(+)-epicatechin	5	3,5,7,3',4'	
花色苷 	矢车菊素	cyanidin	5	3,5,7,3',4'	
	飞燕草素	delphinidin	6	3,5,7,3',4',5'	
	矮牵牛素	petunidin	5	3,5,7,4',5'	O-Me(3')
	甲基花青素	peonidin	4	3,5,7,4'	O-Me(3')
	锦葵花素	malvidin	4	3,5,7,4'	O-Me(3',5')
异黄酮 	染料木黄酮	genistein	3	5,7,4'	
	大豆苷元	daidzein	2	7,4'	
	芒柄花素	formononetin	1	7	O-Me(4')
	黄豆黄素	glycitein	3	5,7,4'	O-Me(6)

续表

分子结构	化合物	英文名称	—OH 总数	—OH 位置	其他取代基 (位置)
	黄杉素	taxifolin	5	3,5,7,3',4'	
	佛提素	fustin	4	3,7,3',4'	
	香橙素	aromadendrin	4	3,5,7,4'	
	短叶松素	pinobanksin	3	3,5,7	
	紫柳花素	butein	4	3,4,4',6'	
	根皮素	phloretin	4	4,2',4',6'	
	根皮苷	phloridzin	3	4,2',4'	O-Glu(6)
	刺甘草查耳酮	Echinatin	2	4,4'	O-Me(2)

① 其中一个羟基被其他基团取代，Glu—葡萄糖；Rh—鼠李糖；Me—甲基。

取代基对类黄酮化合物的化学性质和生物活性有较大影响，其取代方式包括氢化、羟基化、甲基化、丙二酰化、硫化以及糖苷化等。绝大多数类黄酮化合物的天然存在形式为糖苷型，糖苷取代基包括 D-葡萄糖、L-鼠李糖、葡萄糖基鼠李糖、半乳糖、木质素以及阿拉伯糖等。膳食中最为常见的几种类黄酮糖苷化合物为槲皮苷、芦苷以及刺槐苷。它们可被肠道菌丛水解，产生具有更高生物活性的配基 (aglycone，无糖基型类黄酮)。

类黄酮化合物可以是配基或糖苷化合物 (glycoside，环上携带一个或多个糖基)，也可以是甲酯衍生物。同时，它们具有多种存在形式，包括单体、二聚体或多聚体。单体类黄酮分子的大小相差甚大。例如，黄酮化合物的相对分子质量平均约为 222，而蓝色花色苷化合物的相对分子质量可达 1759。多聚类黄酮化合物 [也称单宁 (tannin)] 可根据其相对分子质量分为两类：浓缩单宁和可水解单宁。浓缩单宁是类黄酮的聚合物，而可水解单宁含有酯化于一个碳水化合物的没食子酸，或相似的化合物。以茶单宁为例，它由四种儿茶素组分组成，即表儿茶素 (EC)、表没食子儿茶素 (EGC)、表儿茶素没食子酯 (ECG) 以及表没食子儿茶素没食子酯 (EGCG)。在绿茶当中，EGCG 是一种最主要的儿茶素化合物，约占儿茶素总量的一半以上。在红茶中，泡软茶叶的发酵过程中儿茶素类化合物会发生酶氧化反应，产生二聚体茶黄素 (theaflavin) 以及多聚体茶红素 (thearubigin)，它们赋予了红茶明亮的色泽和收敛味道。茶红素的分子大小范围很宽，少至 4 个或 5 个类黄酮单元，而大的可达 100 多个类黄酮单元。绿茶中的类黄酮