

Chemistry of Plant Fiber Resources

植物纤维资源化学

李忠正 主 编

孙润仓 金永灿 副主编

 中国轻工业出版社

植物纤维资源化学

李忠正 主 编

孙润仓 金永灿 副主编

图书在版编目(CIP)数据

植物纤维资源化学/李忠正主编. —北京:中国轻工业出版社,
2012.6

ISBN 978-7-5019-8701-6

I. ①植… II. ①李… III. ①植物纤维—纤维化学 IV. ①TQ35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 026417 号

责任编辑:林 媛 责任终审:滕炎福 封面设计:锋尚设计
版式设计:王超男 责任校对:燕 杰 责任监印:吴京一

出版发行:中国轻工业出版社(北京东长安街 6 号,邮编:100740)

印 刷:北京君升印刷有限公司

经 销:各地新华书店

版 次:2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

开 本:787×1092 1/16 印张:28

字 数:700 千字

书 号:ISBN 978-7-5019-8701-6 定价:79.00 元

邮购电话:010-65241695 传真:65128352

发行电话:010-85119835 85119793 传真:85113293

网 址:<http://www.chlip.com.cn>

Email:club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

081136K4X101ZBW

前言

植物纤维资源是人类从自然界中获取的最重要的天然生物质资源,植物纤维资源来源于树木、禾草类的秸秆、竹类、棉花、麻类等植物体,是自然界生物质的主体,是人类宝贵的可再生资源。充分有效地利用这一丰富的可再生资源是人类长期以来追求的目标。为此人们需要了解植物纤维原料宏观与微观结构,各主要化学组成的由来、它们在植物中的存在状态及其分布、它们的化学结构和物理化学特性及其应用现状和前景。

植物纤维资源化学是研究各种植物纤维原料的各主要化学成分(纤维素、半纤维素和木质素以及所含抽出物)在植物体内的生物合成、分布及其化学成分、化学结构、化学反应、物理化学性质与其应用的基础科学。植物纤维资源化学也是制浆造纸、林产化工、生物质工程等大学本科专业的重要专业基础课程。

本书在编写内容上力求尽量多地反映近些年来国内外本领域的最新研究成果和发展趋势,为从事生物质利用领域的科学技术人员和研究生以及其他相关专业科技人员的重要参考文献,以推动本学科的发展,促进植物纤维资源的综合开发与利用。本书在编写过程中受到国家重点基础研究 973 计划项目“生物质转化为高值化材料的基础科学问题”(2010CB732200)及“木质素聚集态结构活化及功能芳基材料合成”(2010CB732205)项目的关注和支持。

本书可以作为本科或研究生教材旨在使学生能系统全面的掌握植物纤维资源化学的基本知识。作为本科教材使用时,任课老师可根据不同专业的需要及教学计划课时安排情况选择适当内容讲授。

全书共分 5 章,分别由国内高等院校长期从事植物纤维资源化学教学与研究工作的知名专家、教授执笔编写。其中第一章由杨益琴副教授、许凤教授编写;第二章由金永灿教授、付时雨教授、谌凡更教授、杨益琴副教授、李忠正教授编写;第三章第一节至第四节由张俐娜院士、蔡杰教授编写,第三章第五节由杨益琴副教授编写,第四章由孙润仓教授、任俊莉副教授编写;第五章由方桂珍教授、任世学副教授编写。

全书由李忠正教授、孙润仓教授、张莉娜院士主编,李忠正通稿,最后由杨益琴老师整理。

由于作者学术水平有限,本书在内容编写和取材上有遗漏和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编著者
2011.10

目 录

绪论	1
参考文献	2
第一章 植物原料的生物结构与化学组成	3
第一节 植物的分类与生长	3
一、植物的分类	3
二、植物的生长	4
第二节 我国的植物纤维原料分类与分布	8
一、植物纤维原料的分类	8
二、植物纤维资源的分布	9
第三节 植物纤维原料的宏观结构	11
一、木材的宏观构造	11
二、非木材植物纤维原料的宏观结构	17
第四节 植物纤维原料的显微结构及细胞种类	18
一、针叶材的显微结构与细胞种类	18
二、阔叶材的显微构造与细胞种类	21
三、应力木的显微构造	26
四、禾本科植物茎秆的显微构造与细胞种类	27
第五节 植物纤维形态与纸张性能的关系	29
一、纤维长度、宽度及长宽比	30
二、纤维细胞壁腔比与纤维的柔软性	33
三、纤维的粗度	34
四、非纤维细胞含量	35
第六节 植物纤维原料的化学组成	37
一、植物纤维的化学组成	37
二、常用植物纤维原料的化学成分	40
第七节 植物纤维的超微结构	42
一、植物纤维的细胞壁构造	43
二、细胞壁的形成	49
三、化学组成在细胞壁中的分布	53
参考文献	62
第二章 木质素	65
第一节 木质素的研究史及其进展	65
一、概述	65
二、木质素的发现	65
三、木质素化学研究体系的形成	67
四、木质素研究的进步	68

五、木质素研究的难点和特点	71
六、未来的研究课题	72
第二节 木质素的生物合成过程及生物降解反应	72
一、木质素的生物合成过程	72
二、木质素生物降解	87
第三节 木质素的分离与化学结构研究	109
一、木质素的分离	109
二、木质素的化学结构	112
三、木质素-碳水化合物复合体	117
第四节 木质素的超分子结构	120
一、木质素超分子结构的研究方法	121
二、溶液中或干态木质素的超分子结构	122
三、木质素与碳水化合物复合体(LCC)的超分子结构	128
第五节 木质素的波谱性质	130
一、木质素的紫外吸收光谱	130
二、木质素的红外吸收光谱	132
三、核磁共振用于木质素分析	134
第六节 木质素的降解反应	145
一、概述	145
二、木质素的氧化降解	146
三、木质素的还原反应	154
四、木质素的酸水解	156
五、木质素的热解和热化学降解	162
第七节 木质素在蒸煮与漂白中的反应	167
一、制浆和漂白中木质素反应的一般概念	167
二、木质素在蒸煮中的反应	169
三、木质素在漂白中的反应	177
第八节 木质素的缩合与聚合反应	182
一、木质素的缩合反应	183
二、接枝共聚反应	184
三、木质素作为高分子材料的应用	190
第九节 木质素的特性与利用	198
一、木质素磺酸盐的性质与利用	198
二、碱木质素和硫酸盐木质素的性质与利用	203
参考文献	205
第三章 纤维素	214
第一节 纤维素的概况及其溶剂	214
一、纤维素概况	214
二、相对分子质量及其分布	214
三、纤维素溶剂及溶解	215
第二节 纤维素的结构及其分析方法	228
一、纤维素的聚集态结构	228

二、纤维素的分析方法	238
第三节 纤维素衍生物	257
一、纤维素醚	257
二、纤维素酯	259
第四节 纤维素材料及其应用	262
一、再生纤维素丝及纺丝工艺	262
二、纤维素共混改性材料	268
三、纤维素复合材料	269
四、纤维素衍生物材料	274
五、细菌纤维素新材料	276
第五节 纤维素的降解反应	277
一、纤维素的酸性水解	277
二、纤维素在碱性条件下的反应	280
三、纤维素的氧化和降解反应	282
四、纤维素的热解	287
五、纤维素的生物降解	295
参考文献	299
第四章 半纤维素	314
第一节 碳水化合物化学概述	314
一、碳水化合物概述	314
二、单糖、低聚糖和聚糖命名及结构	314
三、半纤维素概述	317
第二节 植物纤维中半纤维素的生物合成及命名	319
一、半纤维素的生物合成	319
二、半纤维素的命名	321
第三节 半纤维素的化学结构	322
一、半纤维素的分离、纯化及均化	322
二、半纤维素在针叶木、阔叶木、禾本科植物中的类型与化学结构	333
三、半纤维素与纤维植物细胞壁中其他组分之间的连接	338
四、半纤维素的结构鉴定方法	341
第四节 半纤维素的物理性质	357
一、半纤维素的分支度	357
二、半纤维素的溶解度	358
三、半纤维素的相对分子质量及其多分散性	359
四、半纤维素的流变特性	361
五、半纤维素的表面张力	363
第五节 半纤维素的化学性质	364
一、半纤维素的酸水解	364
二、半纤维素的碱水解	366
三、半纤维素的热裂解	367
四、半纤维素的酶解	370
五、半纤维素在化学制浆中的变化	372

第六节 半纤维素的衍生化反应	376
一、半纤维素的酯化反应	376
二、半纤维素的醚化反应	381
三、半纤维素的接枝共聚	384
四、半纤维素的氧化反应及交联反应	385
第七节 半纤维素的应用	386
一、半纤维素对纸浆和纸性的影响	386
二、半纤维素在食品工业中的应用	390
三、半纤维素在生物制药业中的应用	390
四、半纤维素在化学工业中的应用	391
参考文献	391
第五章 树木提取物	394
第一节 树木提取物的分离与研究方法	394
一、树木提取物的提取	394
二、树木提取物的分离	397
三、树木提取物的研究方法	399
第二节 树木提取物在木材中的分布与变化	400
一、提取物在木材中的分布	400
二、提取物在树木不同部位的分布与变化	401
三、提取物在木材微细结构中的分布与变化	404
四、木材中的灰分	405
第三节 萜类化合物	405
一、单萜烯($n=2$)	406
二、倍半萜烯($n=1.5$)	407
三、二萜烯($n=4$)	408
四、三萜烯($n=6$)及多萜	408
五、萜类化合物的基本性质	409
第四节 芳香族化合物	410
一、简单的酚类化合物	410
二、芪类化合物(Stilbenes)	410
三、木酚素(Lignans)	411
四、黄酮类化合物	411
五、单宁	412
六、醌类化合物	415
第五节 脂肪族化合物	418
一、脂肪、蜡及其组成的化合物	418
二、水溶性碳水化合物	418
三、含氮化合物	421
参考文献	423
附录 主要植物与我国重要木材提取物化学组成	424

绪论

自然界每年都会产生大量的生物质。生物质是指一切有生命的可生长的有机物质。从广义上讲，生物质是指由光合作用而产生的有机体，是太阳能的一种储存形式，也是自然界唯一的可再生碳源，只要有阳光人类就可获得大量宝贵的用之不竭的可再生资源。据生物学家估计，地球上每年产生的生物质量高达 1400~1800 亿 t（绝干质量）。生物质包括植物、动物和微生物 3 大类。其中植物约占生物质总量的 90% 以上，而纤维植物又是植物的主体，包括木材、农业秸秆及其他禾草类植物（竹、芦苇和其他草类纤维）等。被广泛地用于建筑、纺织、造纸、能源、化工、食品及其他许多领域。是人类赖以生存的宝贵的可再生资源。

纤维植物除了其可再生性之外，还表现为它的成分、结构的复杂性，其成分主要由纤维素、半纤维素和木质素组成，同时还含有一些提取物成分，属于天然高分子化合物，几种组分相互关联，皆存在于植物细胞组织内。但不同植物的科、属、种，甚至不同品系，不同地区之间纤维植物的组成和化学结构以及物理化学特性都有很大差别。

人类为了更好地利用植物纤维资源，使之更有效地为人类的生活和经济发展服务，我们必须了解它们在纤维植物中是怎样产生的（生物合成路线）、怎样存在的（即它们的形态和区域分布）以及它们的特性（各组分的化学结构、物理化学特性及其反应性能），以掌握应用它们的规律。

纤维素是自然界中存在的最丰富的天然有机物，每年由植物的光合作用可产生亿吨计的纤维素，是人类最宝贵的可再生资源。它不仅被广泛地应用于纺织、造纸和木材工业，而且也是化学工业的重要原材料。纤维素是由许多 β -D-葡萄糖基通过 1-4 苷键连接起来的线性高分子化合物，是构成植物纤维细胞壁的主要物质。纤维（Fiber）是形态学概念，是指细丝状物质而言，可以有植物的、动物的或矿物的纤维。植物纤维主要是由纤维素大分子构成的植物组织内细而长的纤维细胞。

半纤维素是植物细胞壁中的非纤维素碳水化合物（不包括少量淀粉类和果胶类），是由不同的单糖基（如 D-木糖、L-阿拉伯糖、D-甘露糖、D-葡萄糖、D-半乳糖、4-O-甲基-葡萄糖醛酸、D-半乳糖醛酸等）以不同连接方式构成的不同结构的聚糖，因此，半纤维素是一群聚糖的总称。不同植物纤维中所含半纤维素的种类和数量皆不相同。近年的研究表明，在植物纤维细胞壁中，半纤维素与木质素和纤维素之间有着错综复杂的密切关联。半纤维素和纤维素化学结构的差别主要表现在：单糖组成不同；分子质量低；分子链中有支链；聚糖主链可以由一种糖单元构成均一聚糖，也可以是由多种糖单元构成的非均聚糖，如葡萄糖基甘露聚糖等。

木质素是自然界中仅次于纤维素的最丰富的酚类天然高分子化合物。广泛存在于植物纤维的细胞组织中。木质素在木材中的含量根据树种不同约为 20%~40%，禾本科植物一般约为 15%~25%。木质素是一类由苯丙烷结构单元，通过醚键、酯键和碳-碳键连接的复杂的无定形高聚物。它与半纤维素一起填充在纤维细胞壁的微细纤维之间，起到加固细胞壁和保护纤维素不被外界微生物侵袭的作用，同时也存在于细胞间层，将相邻细胞黏结在一起，增加植物茎秆强度。木质素结构研究和利用的复杂性除了其化学结构随植物种类不同、立地条件不同而不同外，植物纤维中的木质素在分离过程中极易变性，并且不同的分离方法和分离条件所得木质

素的结构也不相同。这些都为木质素的研究和应用增加了许多难度。

我国植物纤维资源化学研究已有六十多年的历史，特别是 20 世纪 80 年代以后，随着我国国民经济的高速发展，对生态环境治理日益严格的需求；以及对可再生的生物质资源利用的日益关注，迫切需要更深入地研究了解植物纤维资源的基本特性和应用途径。研究工作蓬勃发展，国家在许多重大基础理论研究项目（973 项目）、863 项目、国家自然科学基金重点（重大）项目以及国家科技攻关项目等课题中给予了积极支持。近年来我国科技工作者发表了许多论文、专著和教材。武汉大学、华南理工大学、南京林业大学、北京林业大学、天津科技大学，东北林业大学，中国科学院广州化学研究所等单位的科学家在植物纤维资源化学不同领域的基础理论研究和应用研究方面做了大量工作，发表了许多论文或专利，为提高我国植物纤维资源化学的学术水平和技术开发做出了贡献。

植物纤维资源是后石油时代人类能源和化工材料生产的重要资源，对其进行化学的、生物的研究还任重道远。由于它的复杂性，人们还有许多基础问题没有认识清楚；植物纤维资源的合理利用途径也尚未全面解决。这有待于今后几代人的继续努力，为后石油时代的到来做好知识和技术准备。

参 考 文 献

- [1] 中野准三，编，李忠正，等译. 木材化学 [M]. 北京：中国林业出版社，1989.
- [2] 张瑞芹，主编. 生物质衍生的燃料和化学物质 [M]. 郑州：郑州大学出版社，2004.
- [3] 吴创之，马隆龙，主编. 生物质能现代化利用技术 [M]. 北京：化学工业出版社，2003.

第一章 植物原料的生物结构与化学组成

第一节 植物的分类与生长

一、植物的分类

植物的形态及大小各异，生长环境条件也有所不同。它们中有单细胞、多细胞的丝状体，也有具有根、茎、叶等由大量细胞组成的植物体。植物区分为低等植物和高等植物。低等植物中有藻类植物和菌类植物；高等植物中有苔藓植物、蕨类植物和种子植物。种子植物是现代地球上适应性最强、分布最广、种类最多、经济价值最高的一类植物。种子植物中有裸子植物和被子植物之分，种子没有包被的称为裸子植物，有包被的称为被子植物。被子植物是由原始的裸子植物演化而来，被子植物又进一步区分为双子叶植物和单子叶植物。原始的被子植物都是双子叶植物，它们在进化过程中，其中有一部分双子叶植物的另一片叶子皱缩退化，因而发展成为单子叶植物。按植物进化论，在种子植物中单子叶植物是进化最高级的。

目前已发现地球上生存的植物大约有 40 余万种。所谓“种”，是指具有相似的形态特征，表现有一定的生物学特性，要求一定的生存条件，能够产生遗传性相似的后代，在自然界中占有一定分布区的无数个体的总和。每一种都具有一定的本质特性并以此区别于其他种。例如毛白杨和山杨，油松和马尾松之间都是互相区别的不同的种。

根据生物进化论的观点，一切植物都起源于共同的祖先，彼此之间都有亲缘关系，并经历了从低级到高级，从简单到复杂的系统演化过程。植物分类学将那些亲缘关系相近的“种”集合为“属”，相近的“属”集合为“科”，再组成“目”“纲”“门”“界”等分类单位。因此，界、门、纲、目、科、属、种是植物的分类单位，其中界、门是大的分类单位，种是最基本的分类单位。在上述各级分类单位中，又可根据实际需要，再划分出更细的单位，如亚门、亚纲、亚科、亚属、组、变种等。

植物种的名称，各国都不相同，在一个国家里也往往由于地区不同而产生同种异名或同名异种等现象。为了研究和利用上的方便，国际上采用统一的名称，即植物的拉丁名，即植物的学名。现在采用的是 1753 年瑞典植物学家林奈（Carl Von Linne）所创立的“双名法”。“双名法”以两个词来给植物命名，第一个词是“属名”，第二个词是“种名”，一个完全的拉丁名还要在种名之后附以命名人的姓名缩写。统一规定属名第一个字母大写，例如：核桃的学名是 *Juglans regia* L.，马尾松的学名是 *Pinus massoniana* Lamb.。

植物又有木本植物和非木本植物之分。木本植物应有以下 4 点特征：①具有无限维管束；②具有多年生茎、根；③直径增粗；④年年开花，年年结实。不具备上述特征的，称为非木本植物，如竹类、禾草类等。竹类通过地下茎生笋以繁殖，至数十年后开花结实，随后全林尽死，因而又称一次性结实植物。

木本植物又有乔木和灌木之分，主干明显而高大的称为乔木；近地面处分枝而无明显主干的，称为灌木。在乔木中又有针叶树和阔叶树之分，叶片呈针形或近似针形的，称为针叶树；叶片宽的称为阔叶树。

裸子植物基本上都是木本植物，绝大多数是高大乔木，如针叶树。被子植物中的双子叶植物，有木本也有草本，有灌木也有高大的乔木，其中木本的如阔叶树，非木本的如麻类，单子叶植物基本上是非木本植物。

二、植物的生长

构成植物体的细胞，由于长期适应不同的环境条件，引起植物内部细胞功能上和形态上的分化，产生各种不同的组织。植物组织是植物长期进化的结果，植物的进化程度越高，体内细胞的分工也就越细，组织分化就越明显。

高等植物的生长是其体内细胞分裂、生长和分化的结果。所谓分化，是植物在生长发育过程中，体内各种细胞由于适应不同的生理机能，在形态结构上发生各种不同程度的变化。通过分化，使本来差别不大的幼嫩细胞演化成形态结构不同的细胞，通常将来源相同，形态结构相似而且相互联系在一起的，执行共同生理机能的细胞群称为组织。

植物组织的类型根据植物组织的生理功能的不同和形态结构的差异，区分为分生组织、薄壁组织、保护组织、机械组织、输导组织和分泌组织，后5种组织都是在器官形成时由分生组织细胞衍生发展而来，因而总称为永久组织。

(一) 植物的分生组织

分生组织，又称形成组织或生长组织。植物生长依赖于自身的分生组织，构成该组织的细胞具有分裂机能，通过有丝分裂的方式增加细胞的数目，使植物生长和发育。分生组织按来源和发展，分为原始分生组织（见图1-1）、初生分生组织和次生分生组织；按分生组织的部位区分为顶端分生组织、侧生分生组织和居间分生组织（见图1-2）。

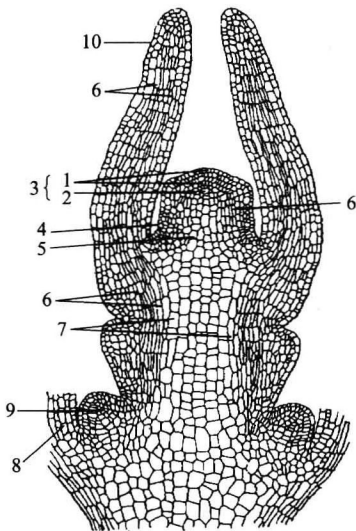


图1-1 茎尖原始分生组织

1—原套 2—原体 3—原分生组织
4—原表皮层 5—基本分生组织 6—原形成层
7—髓 8—叶基 9—腋芽原基 10—幼叶

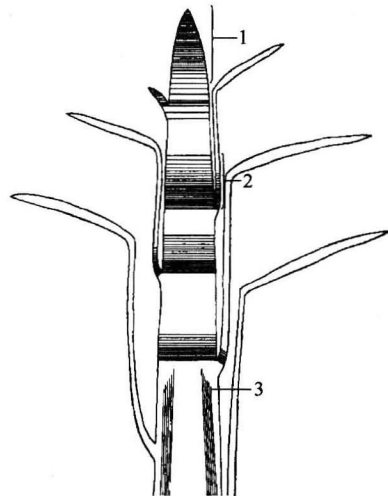


图1-2 分生组织的位置

1—顶端分生组织 2—侧生分生组织
3—居间分生组织

1. 原始分生组织

原始分生组织是由茎顶端或根尖端正中特大的原始细胞或胚性细胞衍生而来，其特点为细

胞小、壁薄、质稠、核大、没有液泡或仅具小液泡；细胞排列整齐紧密，一般无胞间隙；能较长时间保持分裂机能。温带和亚热带地区，冬季原始分生组织处于休眠状态，细胞停止分裂，但到生长季节，则恢复活动。

2. 初生分生组织

初生分生组织位于原始分生组织之后，由原始分生组织衍生的细胞组成。它的特点是一方面仍具有分裂能力，另一方面它又开始分化。可以看成是原始分生组织到成熟组织之间的过渡形式。原始分生组织和初生分生组织均位于茎和根的尖端最幼嫩部分，合称为顶端分生组织。根尖端分生组织使根轴引长；茎顶端分生组织不仅使茎轴引长，并形成新叶，产生腋芽。

3. 次生分生组织

次生分生组织是由初生分生组织产生的薄壁组织，在一定条件下恢复分裂机能转化而成。其细胞特点与初生分生组织细胞相似，具有分裂能力，但不在根、茎顶端，而位于接近顶端的侧面，因而也称为侧生分生组织。次生分生组织不是所有植物都有，仅见于裸子植物和被子植物中的双子叶植物，且只有木本植物的次生分生组织能保持多年，而使直径不断增粗。

禾本科植物的顶端具有原始分生组织和初生分生组织，在生长过程中不断分裂使茎干增高，另外有些细胞保留在节间基部，成为节间分生组织，从来源来看，这部分组织仍属于初生分生组织，从位置来说，属于节间分生组织，故称为居间分生组织。禾本科植物没有次生分生组织，所以其茎干直径不能增粗。

(二) 树木的生长

树木的生长包括高生长和粗（直径）生长，树木中木质部的绝大部分是由直径生长形成的，它是形成层原始细胞分生的结果。

1. 树木的初生构造

树木的高生长是由于树茎顶端分生组织中细胞连续分裂的结果。顶端分生组织的原始分生组织细胞全部处于分裂状态，但发展到初生分生组织后，仅部分细胞仍处于分裂状态，部分细胞已开始分化为叶原基、原表皮、原形成层和原基本组织。原表皮分化为表皮和皮层，原基本组织分化为髓和髓射线，原形成层分化成维管束。在维管束中，分生前期产生原生木质部、束中形成层和原生韧皮部，后期从束中形成层向内分生出后生木质部，向外分生出后生韧皮部。原生木质部和后生木质部合称木质部；原生韧皮部和后生韧皮部合称韧皮部；此时束中形成层分裂能力丧失。木质部、韧皮部、髓、髓射线、表皮及皮层组成的植物茎干构造称为初生构造。

图 1-3 是树木茎干横切面的初生构造图，由表皮、皮层和中柱构成。皮层分为厚角组织、薄壁组织和内皮层。中柱包括中柱鞘、维管束、髓和髓射线。

(1) 表皮 由顶端分生组织表皮原分化而成，通常为—层细胞，但也有几层的。表皮中细胞为薄壁细胞，外向壁往往加厚，角质化，形成角质层（脂肪类物质）。有些茎干表面还附有蜡被表皮毛，表皮是一层初生保护组织。

(2) 内皮层 由薄壁细胞组成。靠近表皮的薄壁组织，常转变为厚角组织。中间部分细胞较大，并且具有明显的胞间隙系统。松柏类和被子植物难以从形态上分辨出内皮层，只有当细胞中含有淀粉粒时才有这种可能。

(3) 髓 位于茎的中心，由薄壁细胞组成，通常贮藏营养物质。有些植物的髓发育成厚壁细胞（栓及栎树）及石细胞（樟树）；有些植物的髓在发育时破裂，致使节间中空（连翘树）或成薄片（枫杨树）。

(4) 中柱鞘 为中柱的最外层，由一至几层细胞组成。有些植物的中柱鞘由薄壁细胞组

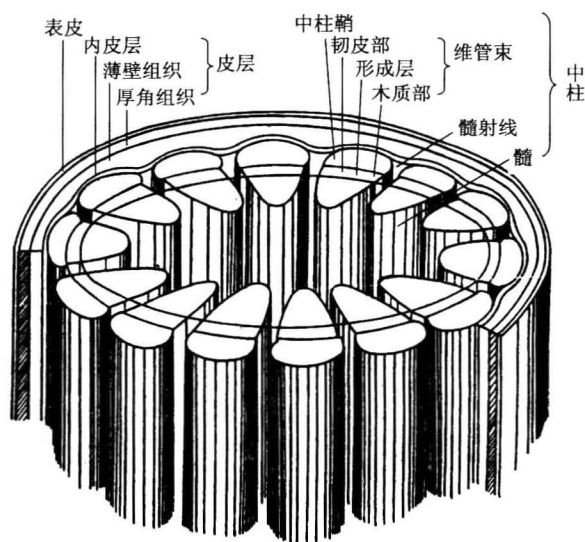


图 1-3 树木茎干横切面的初生构造

原形成层早期向外分生出来的称原生韧皮部，多为韧皮薄壁细胞；后期分生出来的称后生韧皮部，内含筛胞或筛管、伴胞、韧皮纤维和韧皮薄壁细胞。原生韧皮部与后生韧皮部合称初生韧皮部。早期向内分生出来的称原生木质部，内含轴向薄壁细胞，环纹、螺旋导管（或管胞）；后期分生出来的称后生木质部，内含导管或管胞，轴向薄壁细胞或木纤维。原生木质部和后生木质部合称初生木质部。

2. 树木的次生构造

木本植物茎干之所以多年生，年年增粗，其根本原因就在于环状形成层和木栓形成层的产生和活动，构成完整的次生构造。

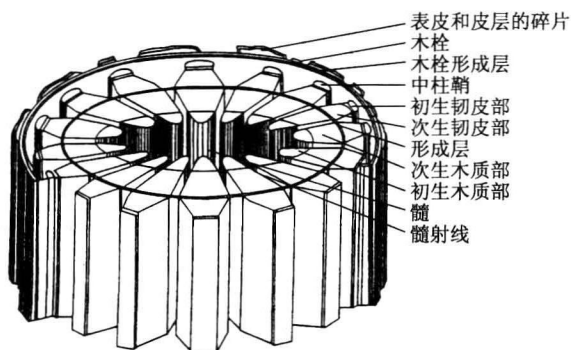


图 1-4 树木茎干横切面的次生构造

成，另一些植物除薄壁细胞外还有厚壁组织，主要是纤维，故称中柱鞘纤维。有些植物的中柱鞘纤维聚集成束，或者成连续的环。无论成束或成环都和维管束韧皮部相连，并且在在中柱鞘纤维发生初期往往有筛管掺杂其间，故与韧皮部很难分开。

(5) 髓射线 又称初生木射线。位于维管束之间的薄壁组织，在横切面上呈放射状排列，与髓、中柱鞘、皮层相连，是茎内横向运输的通道，也有贮藏作用。木本植物的髓射线可随着茎秆的增粗而增长。

(6) 维管束 由初生分生组织的侧生组织演化而来，称原形成层束，包括初生韧皮部，束中形成层和初生木质部，在茎秆中呈环状排列。

(1) 环状形成层的产生与活动 木本植物初生构造完成之后，束中失去分裂和分生能力的形成层，在一定条件下开始恢复分裂活动，束中形成层是原形成层中保留下来具有分生能力的细胞层。与此同时，靠近束中形成层的髓射线细胞也接着出现分裂能力，即由薄壁细胞转变为分生细胞，形成束间形成层。束中形成层和束间形成层连接在一起形成环状形成层（见图 1-4），此时形成层向内分裂生成的木质部，称为次生木质部；向外分裂生成的韧皮部，称为次生韧皮部。在分裂过程中

除髓射线继续伸展外，木质部和韧皮部又产生新的射线，这些射线称为木射线。包括表皮，皮层和周皮在内，此构造称为茎干的次生构造。

环状形成层由两种形状的细胞组成（见图 1-5），一种是纺锤形原始细胞（a）、（b）其长轴顺树高方向，两端尖削，呈纺锤形，长比宽大许多倍，中部多呈棱形，末端呈楔形。另一种是射

线原始细胞 (c) 形状小、聚集成射线状, 略呈长方形, 为木质部中横向细胞的来源, 分裂产生射线。纺锤形原始细胞为木质部中轴向排列细胞的来源, 分裂产生管胞、导管分子、筛管分子等轴向细胞。纺锤形原始细胞的排列有两种方式, 如图 1-6 所示。一种是层状的, 为叠生成层, 从径切面观察, 细胞排列整齐; 另一种是非层状的, 为非叠生成层, 细胞之间呈交叉排列, 两端不在同一水平上。从系统发育而言, 非叠生成层是比较原始的, 因此它多出现在裸子植物和较原始被子植物之中。无论是纺锤形原始细胞, 还是射线原始细胞, 弦切面宽度均大于径切面。一般来说, 形成层向内分裂形成木质部细胞的分裂次数, 要比向韧皮部方向多 7~10 倍左右, 故木质部比韧皮部的增长快得多, 因此随着形成层细胞的不断分裂, 次生木质部占了茎的大部分体积, 导致树干增粗, 并将次生韧皮部推向茎的周边, 导致表皮或周皮的破裂。

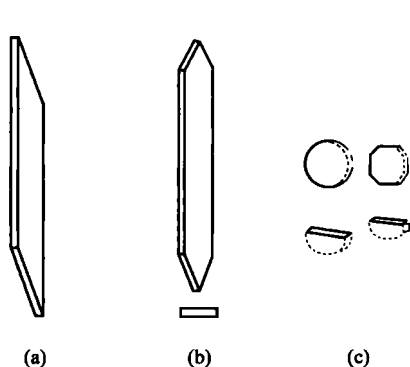


图 1-5 形成层原始细胞的形状

(a) 单斜面纺锤形 (b) 双斜面纺锤形 (c) 射线原始细胞

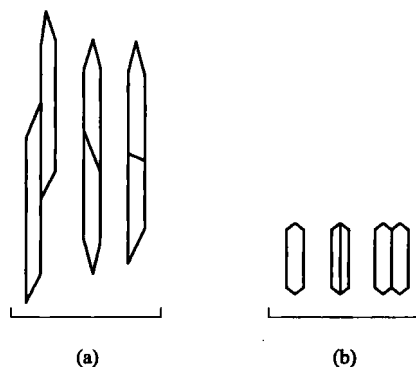


图 1-6 纺锤形原始细胞的排列方式

(a) 非叠生 (b) 叠生

形成层的活动受温度及日照的影响, 例如在春夏季日照较长, 温度渐高的情况下, 形成层细胞分裂的数目增加, 分化的导管比较大; 秋季日照较短, 温度渐低, 形成层的分裂减慢, 形成的导管管腔较小。一般在温带地区, 冬季形成层细胞则进入休眠期, 停止分裂活动。

(2) 树皮的形成与脱落 树木茎干由于连续增粗, 不具有分裂能力的表皮组织势必受到破坏, 此时, 紧靠表皮层的薄壁细胞恢复分生能力 (如杨属、栗属、榆属); 也有从皮层深处的细胞或直接从表皮产生具有分裂能力的细胞, 产生木栓形成层 (如夹竹桃属、柳属、苹果属)。

木栓形成层进行平周分裂, 出现外有木栓细胞, 内有栓内层的周皮, 而取代表皮成为粗生长后的次生保护组织 (见图 1-7)。木栓形成层的分裂有限, 因而周皮的保护作用也是有限的。木栓形成层一般生存几个月就死亡, 皮层深处的薄壁组织又产生新的木栓形成层。木栓层和表皮一样, 是一种结构紧密的组织, 由数层木栓细胞组成, 不易透水透气, 因此加强了对植物体内部组织的保护作用。当树木继续增粗时, 由于木栓层细胞的胞壁栓化, 木栓层外部的组织被新形成的木栓层所隔断, 而得不到水分、养分而死亡。这些死亡的组织, 包括其外部的多次周皮在内, 称为树皮。

随着树木的生长, 原有的周皮会逐渐破裂而失去保护作用, 此时, 在原来周皮之内, 可以同样的方式再形成新的周皮, 并将原来的周皮推向外方。由于新的木栓形成层每次都从更深处, 直到韧皮部的细胞产生, 因此树皮所包含的组织越来越多, 越来越厚。如果木栓形成层是条状分布, 所形成的树皮则呈鳞片状开裂; 如果呈完整的一圈, 则树皮呈筒状开裂。随着茎干的增粗, 外层树皮则逐渐脱落。

在习惯上, 将木质部以外的部分统称为树皮, 这是因为树皮与韧皮部相连, 常易于在形成层处剥离, 实际上树皮包括两个部分: 一部分是最新形成的木栓形成层之外的真正的树皮, 另

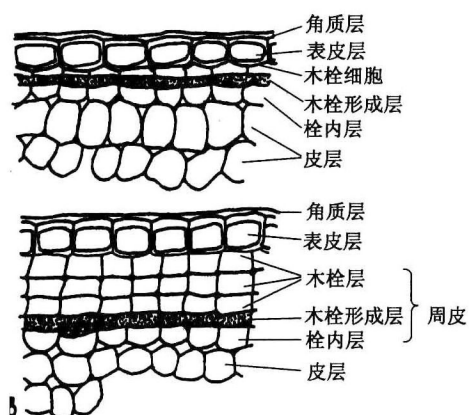


图 1-7 木本植物周皮横切面

一部分则是整个韧皮部。

(三) 禾本科植物的生长

禾本科植物的茎一般包括主茎(干)和各级分枝两部分。不同植物,其茎的形态特征不同。禾本科植物茎有明显的节和节间,节部略膨大,多数植物茎节间中空,如竹子、小麦、芦苇、稻草等。少数植物的茎为实心,如棉花、甘蔗、高粱、玉米等。

1. 初生增粗生长

与树木不同,禾本科植物的维管束没有束中形成层,不能进行次生增粗生长。但是玉米、甘蔗等的茎,实际上比具有次生生长的棉花、花生等的茎还粗壮,其原因是在玉米、甘蔗等茎尖的正中纵切面上,可以看到在叶原基的下面有许多由顶端分生组织衍生而来的扁平状的初生分生组织细胞,它们

规律地排列为垂周行列,这些细胞称为初生增粗分生组织。它们快速进行平周分裂,衍生出大量薄壁组织细胞(其中穿插着原形成层),形成粗壮的芽尖,随着细胞的分裂和增大,形成粗壮的茎。

2. 居间生长

禾本科植物茎的每个节间基部,都保持幼嫩的生长环,即居间分生组织,它们的细胞进行分裂、生长和分化,使每个节间伸长,称为居间生长。拔节是居间生长的表现,抽穗是几个节间同时进行居间生长的结果。居间生长对植株倒伏后的复原起着重要作用。在节间基部的居间分生组织分布区内,不同侧面生长不平衡,而引起向上弯曲生长,使植株部分地恢复直立。

维管束为外韧有限维管束、散生分布,没有皮层和中柱的界限。茎横切面上,可分为表皮、机械组织、基本组织和维管束 4 种组织系统。具体说明见禾本科植物茎秆的解剖结构。

第二节 我国的植物纤维原料分类与分布

我国幅员辽阔,地形和气象因子差异很大,植物资源丰富、种类繁多。目前地球上的植物有 40 多万种,木本植物约 2 万余种,我国有 7500 多种。其中裸子植物是林业生产的主要用材林,在人类的经济生活中占有重要的地位。制浆造纸所用的植物原料都是纤维含量较高的、已成熟的植物茎秆、韧皮或叶片,所以可用作造纸的植物纤维原料,主要是裸子植物和被子植物。

一、植物纤维原料的分类

目前国内用于造纸的植物纤维原料大致有以下类别和品种。

(一) 木材纤维原料

1. 针叶材

主要有云杉、冷杉、铁杉、红松、落叶松、马尾松、云南松、思茅松、湿地松、火炬松、樟子松、柳杉、中国杉和水杉等。

2. 阔叶材

主要有杨木、桉木、桦木、榉木、相思木、鹅掌楸、榆木等。

(二) 非木材纤维原料

(1) 禾本科植物 竹子、芦苇、荻、稻草、麦草、蔗渣、玉米秆、高粱秆、芒秆、棉秆等。

(2) 韧皮纤维 大麻、亚麻、苧麻、红麻、黄麻、桑皮、构皮、檀皮、棉秆皮等。

(3) 叶纤维 龙须草、剑麻等。

(4) 籽毛纤维 棉花、棉短绒、破布等。

我国森林覆盖率较低，并承担保护人类生态环境的功能，可采伐森林资源有限，且森林资源分布不均衡。目前我国森林资源主要分布在东北、西南和东南等省份。造纸工业的木材原料主要依靠人工速生林木。大力发展造纸用速生丰产林基地建设，实施林浆纸一体化，逐步增加木材原料造纸的比重，是我国造纸原料发展的基本政策。

我国是农业大国，农业禾草类资源丰富，有很大的潜力，合理利用禾草类原料制浆造纸是我国造纸原料政策的重要组成部分，对我国造纸工业的发展具有重要的战略意义。

二、植物纤维资源的分布

(一) 我国的森林资源

我国是个少林国家，据第七次全国森林资源清查（2009年发布），森林面积为1.95亿 hm^2 ，其中竹林面积220万 hm^2 ；用材林面积占35.3%，保护林占45.81%。森林覆盖率20.36%，活立木蓄积量149.13亿 m^3 ，其中人工林保存面积6168.84万 hm^2 ，林木蓄积量19.61亿 m^3 ，人工林面积居世界首位。林木蓄积年净生长量5.72亿 m^3 ，年采伐消耗量3.79亿 m^3 ，林木蓄积生长量大于消耗量。天然林采伐量下降，人工林采伐量占全国森林采伐量的39.44%。2008年木材产量大幅增加，2009年木材产量正常回落，达到7068.29万 m^3 ，比2008年减少12.83%。竹材产量为13.56亿根（约2.71万t）。2009年全国木材产品消耗总量为42189.48万 m^3 ，比2008年增长13.58%。其中：工业与建筑用材消耗量为32516.47万 m^3 ，纸浆及纸类折合木材1570.06万 m^3 。

我国森林覆盖率只有全球平均水平的2/3，为世界第139位。人均森林面积0.145 hm^2 ，不足世界人均占有量的1/4；人均森林蓄积10.151 m^3 ，只有世界人均的1/7。森林资源在地理上的分布极不均衡，78.4%的森林蓄积量集中在黑龙江、长江和珠江3大流域；森林面积约有50%分布在东北和西南；森林覆盖率则以南方林区为最大。现在主要由东北、内蒙古林区，东南低山丘陵林区，西南高山林区，西北高山林区和热带林区等5大林区组成。全国森林分布如图1-8所示。各林区林地及资源情况见表1-1。

表 1-1 中国森林资源分布情况

林区	森林覆盖率 /%	森林面积 /万 hm^2	森林蓄积量 /亿 m^3
东北、内蒙古	67.10	3590	32.13
东南低山丘陵	51.97	5781	25.65
西南高山	23.00	4348	50.90
西北高山	39.14	509	5.31
热带	44.57	1180	8.63

注：资料来源于全国第九次森林资源调查。