



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

细胞生物学

沈振国 崔德才 主编

中 国 农 业 出 版 社

面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

细胞生物学

沈振国 崔德才 主编

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

细胞生物学 / 沈振国, 崔德才主编. — 北京: 中国农业出版社, 2003.8

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-109-08393-4

I. 细 ... II. ①沈 ... ②崔 ... III. 细胞生物学 - 高等学校 - 教材 IV. Q2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 072147 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100026)

出版人: 傅玉祥

责任编辑 李国忠

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月北京第 1 次印刷

开本: 850mm×1168mm 1/16 印张: 26.75

字数: 657 千字

定价: 37.30 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

主 编 沈振国（南京农业大学）

崔德才（山东农业大学）

副 主 编 严云勤（东北农业大学）

陆 巍（南京农业大学）

编写人员（按姓氏笔画排序）

王幼群（中国农业大学）

朱延姝（沈阳农业大学）

阮 颖（湖南农业大学）

严云勤（东北农业大学）

杜晓东（湛江海洋大学）

沈振国（南京农业大学）

张训蒲（华中农业大学）

张美萍（吉林农业大学）

陆 巍（南京农业大学）

於丙军（南京农业大学）

崔德才（山东农业大学）

梁建生（扬州大学）

前 言

现代生物技术是当今科技领域中最令人瞩目的高新技术之一，它被广泛用于农业、化工、环保、信息、医药等领域，为解决食物短缺、能源匮乏、环境污染和疾病防治等一系列问题带来了新的希望。生物技术产业化对各国综合国力的竞争正在产生深刻的影响，也将是我国赶超世界发达国家生产力水平，实现后发优势和可持续发展最有前途和最有希望的领域之一。为了提高我国生物技术产业，特别是农业生物技术产业的竞争力，我国的农业高等院校也相继设立了生物科学、生物技术等专业，以加快培养具有生物技术理论知识和技能的人才。

细胞生物学是生命科学的重要基础学科，在现代生命科学的各分支学科中，处处体现着有关细胞的知识及相关研究内容。细胞生物学已被许多高等院校列为生物科学与技术等相关专业的必修课。为了适应我国高等教育发展和教学改革的需要，根据细胞生物学的发展极为迅速，内容又十分广博复杂的特点，在中国农业出版社的主持下，我们组织具有丰富教学、科研经验的教授、博士、中青年骨干教师编写了本教材。参加本书编写的单位和作者是：南京农业大学沈振国（第一章和第四章），山东农业大学崔德才（第二章和第九章），中国农业大学王幼群（第三章），南京农业大学於丙军（第五章），湛江海洋大学杜晓东（第六章），南京农业大学陆巍（第七章和第八章），吉林农业大学张美萍（第十章），扬州大学梁建生（第十一章），东北农业大学严云勤（第十二章和第十三章），华中农业大学张训蒲和沈阳农业大学朱延姝（第十四章），湖南农业大学阮颖（第十五章）。南京农业大学的蒋明义和许晓明与江西农业大学的彭小松参加了部分章节的审定工作。全稿由主编和副主编定稿。

本书编写过程中，始终得到了编写者所在单位和领导的大力支持，在此表示衷心感谢。

由于编者的水平所限，加上时间仓促，书中必有错误和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2003年6月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 细胞生物学的对象和内容	1
一、细胞生物学的对象和内容	1
二、细胞生物学在生命科学中的地位和与其他学科的关系	1
第二节 细胞学与细胞生物学发展简史	2
一、细胞的发现	2
二、细胞学说的创立和细胞学的形成	3
三、细胞学的发展和细胞生物学的兴起	4
四、分子细胞生物学的出现和发展	6
本章小结	9
思考题	10
主要参考文献	10
第二章 细胞基本知识概要	11
第一节 细胞的基本概念	11
一、细胞是生命的基本单位	11
二、细胞的基本共性	12
三、非细胞形态的生命体	13
第二节 原核细胞	17
一、最小、最简单的细胞	18
二、原核细胞的两个代表	18
三、原核细胞与真核细胞的比较	21
第三节 真核细胞	23
一、真核细胞的基本结构体系	23
二、真核细胞的大小及其分析	24
三、真核细胞形态结构与功能的关系	25
四、植物细胞与动物细胞的比较	25
本章小结	27
思考题	28
主要参考文献	28
第三章 细胞生物学研究方法	29

第一节 细胞形态结构的观察方法	29
一、光学显微镜技术	29
二、电子显微镜技术	34
三、扫描隧道显微镜	40
第二节 细胞组分的分析方法	40
一、细胞的分离与纯化	40
二、细胞器与生物大分子的分离	41
三、细胞内核酸、蛋白质、酶、糖与脂等的显示方法	43
四、特异蛋白抗原的定位与定性	44
五、细胞内特异核酸的定位与定性	47
六、利用同位素技术研究生物大分子在细胞内的合成动态	48
七、定量细胞化学分析技术	49
第三节 组织与细胞培养及快速繁殖技术	51
一、组织和细胞培养技术	51
二、快速繁殖技术	54
本章小结	56
思考题	56
主要参考文献	56
第四章 质膜和细胞表面	58
第一节 质膜的性质、化学组成和主要功能	59
一、质膜的性质	59
二、质膜的化学组成	59
三、质膜的主要功能	65
第二节 质膜的分子结构	65
一、膜分子结构的模型	65
二、膜的流动性	68
第三节 细胞外被和质膜的特化结构	70
一、细胞外被	70
二、质膜的特化结构	73
第四节 跨膜运输	74
一、被动运输	74
二、主动运输	78
三、膜泡运输	82
本章小结	87
思考题	88
主要参考文献	88
第五章 细胞连接和细胞外基质	90

第一节 细胞连接	90
一、封闭连接	91
二、锚定连接	92
三、通讯连接	93
第二节 细胞外基质	96
一、糖胺聚糖和蛋白聚糖	96
二、胶原	99
三、层粘连蛋白和纤粘连蛋白	101
四、弹性蛋白	104
五、细胞的粘连分子	105
第三节 植物细胞壁	105
一、植物细胞壁的结构和组成	106
二、细胞壁在细胞生命活动中的作用	110
本章小结	111
思考题	112
主要参考文献	112
第六章 细胞质基质与细胞内膜系统	113
第一节 细胞质基质	113
一、细胞质基质的组成	113
二、细胞质基质的功能	114
第二节 核糖体	115
一、核糖体的基本类型与成分	115
二、核糖体的结构	116
三、核糖体蛋白质与 rRNA 的催化蛋白质合成功能	117
四、多聚核糖体及蛋白质的合成	117
第三节 内质网	118
一、内质网的形态与结构	119
二、内质网的功能	120
第四节 高尔基体	121
一、高尔基体的形态结构	122
二、高尔基体的功能	123
第五节 溶酶体与过氧化物酶体	124
一、溶酶体的结构类型	124
二、溶酶体的功能	125
三、溶酶体的发生	126
四、溶酶体与过氧化物酶体	127
本章小结	129

思考题	129
主要参考文献	130
第七章 线粒体	131
第一节 线粒体的形态、结构与分布	131
一、线粒体的形态	131
二、线粒体的结构	131
三、线粒体的分布	133
第二节 线粒体的化学组成与酶的定位	134
一、线粒体的化学组成	134
二、线粒体中酶的定位	135
第三节 线粒体的功能	135
一、生物氧化的分区和定位	136
二、电子传递	137
三、氧化磷酸化	140
第四节 线粒体的半自主性	141
一、线粒体的 DNA	141
二、线粒体的蛋白质合成	142
三、线粒体蛋白质的运送与组装	142
第五节 线粒体的增殖与起源	145
一、线粒体的增殖	145
二、线粒体的起源	145
本章小结	146
思考题	146
主要参考文献	146
第八章 叶绿体	148
第一节 叶绿体的形态和结构	148
一、叶绿体的形态	148
二、叶绿体的结构	148
第二节 叶绿体的化学组成	153
一、被膜	153
二、类囊体	153
三、基质	154
四、电子载体在类囊体中的分布	154
第三节 光合作用	155
一、光合作用的基本过程	155
二、光反应	155
三、暗反应	159

第四节 叶绿体的半自主性	162
一、叶绿体的 DNA	162
二、叶绿体的蛋白质合成	162
三、叶绿体蛋白质的运送与组装	163
第五节 叶绿体的增殖与起源	164
一、叶绿体的增殖	164
二、叶绿体的起源	165
本章小结	165
思考题	166
主要参考文献	166
第九章 细胞骨架	167
第一节 细胞质骨架	167
一、微丝	168
二、微管	180
三、中间纤维	189
第二节 细胞核骨架	194
一、核基质	194
二、染色体支架	197
三、核纤层	198
本章小结	200
思考题	201
主要参考文献	201
第十章 细胞核与染色体	202
第一节 核被膜与核孔复合体	203
一、核被膜	203
二、核孔复合体	204
三、核纤层	206
四、核被膜及核孔复合体的功能	207
第二节 染色质	210
一、染色质的概念及种类	210
二、染色质的化学组成	211
三、染色质的基本结构单位	217
第三节 染色体	221
一、染色体包装的结构模型	221
二、中期染色体的形态结构	224
三、染色体 DNA 的关键序列	226
四、核型与染色体显带	228

五、巨大染色体	230
第四节 核仁	235
一、核仁的超微结构	235
二、核仁的功能	236
三、核仁周期	239
第五节 基因表达与调控	239
一、细胞中的遗传物质及其复制	240
二、转录和 RNA 前体的加工	244
三、翻译与蛋白质合成	249
四、基因表达的调控	256
本章小结	263
思考题	264
主要参考文献	264
第十一章 细胞的信号转导与信号传递系统	265
第一节 细胞信号转导途径的功能与结构	265
一、信号细胞与信号分子	265
二、细胞信号的种类	266
三、信号传递途径的结构和特性	266
第二节 受体与跨膜信号的转换	269
一、受体的基本概念和特征	269
二、细胞表面受体的种类及结构和功能	270
第三节 核受体参与的信号转导	271
一、与核受体特异性结合的配体	272
二、核受体介导的信号传递途径	272
三、核受体的结构	273
第四节 G 蛋白偶合的信号转导途径	273
一、G 蛋白	274
二、G 蛋白偶合受体	275
第五节 胞内信使物质与信号转导	278
一、胞内信使物质的功能	278
二、环腺苷酸	278
三、环鸟苷酸	279
四、肌醇磷脂的代谢和肌醇磷脂第二信使系统	279
五、磷酸肌醇和磷酸肌醇激酶	282
六、钙离子与胞内信号转导	282
第六节 蛋白质激酶与蛋白质磷酸酯酶参与的胞内信号转导	286
一、蛋白质激酶	286

二、蛋白质磷酸酯酶	290
第七节 细胞信号转导途径的专一性和交互作用	291
一、细胞信号转导的专一性	291
二、信号转导途径的交互作用和信号转导的网络结构	294
本章小结	295
思考题	296
主要参考文献	296
第十二章 细胞增殖及其调控	297
第一节 细胞周期	297
一、细胞周期概述	297
二、细胞周期时间的测定	298
三、细胞同步化	299
四、细胞周期时相及其主要事件	300
第二节 有丝分裂及其调控	303
一、有丝分裂的过程	303
二、有丝分裂的调控	310
第三节 减数分裂	315
一、减数分裂前间期	315
二、减数分裂 I	316
三、减数分裂 II	319
四、减数分裂和有丝分裂的主要差异	320
第四节 癌细胞	321
一、癌症的特征	321
二、癌细胞的主要特性	321
三、癌基因和抑癌基因	324
四、癌的发生机制及影响因素	329
本章小结	331
思考题	333
主要参考文献	333
第十三章 细胞分化	334
第一节 细胞分化的特征	334
一、形态结构、生理生化和功能的分化	334
二、组织特异性基因在时间和空间上的循序差异表达	334
三、细胞决定与细胞分化方向的确定	336
四、去分化与再生	337
第二节 细胞发育的潜能	338
第三节 卵细胞质成分分布不均一性对细胞分化的影响	340

一、体细胞决定子	341
二、生殖细胞决定子	342
三、细胞质定域的本质	343
四、镶嵌型发育和调整型发育	344
第四节 细胞间相互作用对细胞分化的影响	345
一、胚胎诱导	345
二、激素对细胞分化的调节	351
三、细胞外基质在细胞分化中的作用	351
第五节 位置信息和环境因素对细胞分化的影响	353
一、位置信息对细胞分化的影响	353
二、环境因素对细胞分化的影响	353
第六节 胚胎发育过程中模式形成及基因表达和调控	353
一、果蝇胚胎发育及体节分化	353
二、母体效应基因与胚胎体轴形成	355
三、合子基因在体节分化中的表达及调控	356
四、脊椎动物发育模式的调控	360
五、胚胎发育事件在时间上的调控	362
本章小结	362
思考题	363
主要参考文献	364
第十四章 细胞的衰老与死亡	365
第一节 体外培养细胞的衰老与 Hayflick 界限	365
第二节 细胞在体内条件下的衰老	366
第三节 衰老细胞结构的特征	368
一、衰老过程中细胞膜体系的变化	369
二、衰老过程中细胞骨架体系的变化	369
三、衰老过程中线粒体的变化	370
四、衰老过程中细胞核的变化	371
五、衰老过程中蛋白质合成的变化	372
六、脂褐素的生成	372
第四节 细胞衰老的原因与假说	373
一、自由基与衰老	373
二、端粒与衰老	375
第五节 细胞凋亡	376
一、细胞凋亡的概念及其生物学意义	376
二、细胞凋亡的形态学和生物化学特征	378
三、诱导细胞凋亡的因子	380

四、细胞凋亡的分子调控机制	380
五、细胞凋亡途径	388
六、细胞凋亡与肿瘤	390
七、植物细胞凋亡	390
本章小结	391
思考题	392
主要参考文献	392
第十五章 细胞的起源与进化	394
第一节 细胞的起源	394
一、化学进化和生命起源	394
二、生物大分子可能的进化途径	397
三、分子构成的形态实体	400
第二节 原核细胞和真核细胞的进化关系	402
一、真核细胞起源于原核细胞的证据	402
二、真核细胞的祖先可能是古细菌的论述	403
第三节 重要细胞器的起源	405
一、线粒体和叶绿体的起源	405
二、细胞核的起源	409
三、其他细胞器或结构的起源	409
第四节 病毒与细胞在起源核进化中的关系	411
本章小结	412
思考题	412
主要参考文献	413

第一章 绪 论

第一节 细胞生物学的研究对象和内容

一、细胞生物学的研究对象和内容

细胞是所有生物体最基本的结构和功能单位,是由膜围成的能独立进行生长繁殖的原生质团。细胞生物学是研究细胞的结构、功能和生命活动基本规律的科学。也就是说,细胞生物学的研究对象是细胞,是从细胞显微、亚显微和分子结构层次以及细胞间的相互关系上来研究细胞的结构与功能,细胞的增殖、分化、衰老与凋亡,细胞的信号传递,细胞的基因表达与调控,细胞的起源与进化等方面。

细胞作为整体,其生命活动的结构基础是细胞内高度有序且为动态的结构体系。这一体系可以归纳为遗传信息结构体系、膜结构体系和细胞骨架结构体系,每一个体系都是由生物大分子组成的,分子是细胞的物质基础。只有从分子水平上对细胞进行研究,才能进一步揭示细胞生命活动的本质。此外,一些细胞的生命活动就是生物大分子所具有的属性,如 DNA 的复制、微管和核糖体的自我装配等,在体外适当条件下,亦可重演它们在体内的组装过程。然而,细胞作为一个整体而存在,分子对细胞来说总归是从属关系。细胞为各种分子参加生命活动提供特定的微环境。各种分子在细胞内组配成一定的时空关系,相互协调配合,才能表现出有生命意义的活动变化。细胞在其代谢活动中,大多是以蛋白质的复合物作为结构基础和功能单位。例如,在遗传信息结构体系中,DNA 和组蛋白组装成的核小体是染色质结构的基本单位,DNA 的复制与转录是在染色质水平上进行的。核糖体 RNA(rRNA)与蛋白质(r 蛋白)组装成的核糖体(ribosome)是蛋白质合成的场所,在进行蛋白质合成时,还与由 DNA 转录出的 RNA 组成多聚核糖体(polyribosome 或 polysome),进一步又与膜系统(如内质网、高尔基体)或骨架系统相结合行使其功能活动。只有这样合成的蛋白质才能正确折叠、组装、运输,并受控于整个细胞代谢活动,参与细胞的生命活动。细胞外的大分子变化,再复杂也只能是生物化学反应,还称不上是生命活动。脱离了细胞的整体和亚细胞结构,仅从分子水平上来研究,就往往无法解释复杂的生命现象。

随着对细胞研究的深入,细胞生物学根据研究对象的不同,已发展出膜生物学(membrane biology)、溶酶体生物学(biology of the lysosome)、染色体生物学(chromosome biology)、基因生物学(molecular biology of the gene)、癌细胞生物学(cell biology of cancer)、神经细胞生物学(nerve cell biology)、植物分子细胞生物学(plant molecular and cell biology)等。

二、细胞生物学在生命科学中的地位和与其他学科的关系

细胞生物学是现代生物学的基础学科。生命是细胞的最基本特性,细胞作为展示生命的一个

能独立生存和自我调节的基本结构单位,在同外界进行物质、能量、信息交换和自身代谢的基础上进行生长、发育和繁殖过程。所谓生命,实质上就是细胞属性的综合体现,生物体的一切生命活动,如代谢、生长、发育、繁殖、遗传、进化、运动、衰老和死亡等过程也是细胞活动的体现。因此,生物学中的许多分支学科,如植物学、动物学、微生物学、生理学、遗传学、发育生物学、胚胎学、免疫学、分子生物学等,都要求从细胞中寻找阐明各自研究领域中生命现象的机制。例如,要阐明植物和动物对营养元素的吸收机理,就要在细胞水平上探讨营养元素的跨膜运输途径;要阐明植物光合作用的机理,就必须对叶绿体这一细胞器的内部结构进行翔实研究。甚至在生态学、环境科学和毒理学的研究领域中,也引入细胞生物学的研究思想和方法,以便从细胞中寻找生物进化、变异、死亡及相互作用的原因和机制。脱离了细胞,现代生物学的所有分支学科及其相关学科都将失去基础。

细胞生物学的蓬勃发展,有力地推动了其他学科的发展。但细胞生物学的进一步发展又必须以一些现代科学的分支学科作为基础,其他学科所取得的进展同样极大地推动了细胞生物学的发展。从细胞生物学的发展史来看,细胞生物学每一次大的突破都是以重大的科学技术进步为前提的。例如,显微镜的发明和使用导致了细胞的发现,为细胞学的产生和发展开辟了道路。电子显微镜和其他新技术的发明应用又使科学家们能够探索细胞器的超微结构和分子结构,促成了细胞生物学的诞生。分子生物学的许多重大成就,如 DNA 双螺旋结构模型的提出、基因核苷酸序列分析、DNA 重组技术、酶分子活性基团的定位等,促使科学家们从分子水平上揭示生命活动现象的本质,促进了分子细胞生物学的兴起。化学、物理和数学等基础学科对细胞生物学也有着深刻影响。只有在物理和化学规律研究清楚以后,才有可能系统地阐明与生命特性有关的现象和规律。细胞生物学家们应该应用其他学科的方法、技术和思想,在各个水平上探讨生命现象的本质。多学科的交叉渗透汇合将是 21 世纪科学发展的趋势。

第二节 细胞学与细胞生物学发展简史

细胞学与细胞生物学的发展历史大致可以划分为细胞的发现、细胞学说的创立和细胞学的形成、细胞学的发展和细胞生物学的兴起、分子细胞生物学的出现和发展几个阶段。

一、细胞的发现

细胞的发现与显微镜的发明直接有关。细胞一般很小,直径大约在 $5\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 之间,不能为肉眼观察到,需要特定的仪器设备才能观察到。在 13 世纪,欧洲人首先制造出了眼镜。到 16 世纪末,荷兰人 H. Janssen 和 Z. Janssen 研制出了世界上第一架复式显微镜(由两个双凸透镜组成)。在 17 世纪中期,许多科学家利用手工制造的显微镜来探索肉眼看不到的未知世界。世界上第一个发现细胞的一般认为是英国的科学家 Robert Hooke (1635—1703)。他在用自制的显微镜观察软木(栎树皮)组织以了解软木适宜做瓶塞的原因时,发现软木由许多小室组成,形似蜂窝。他把这些小室称之为细胞(cell)。Hooke 把观察到的现象写成《显微图谱》(Micrographia)一书,在 1665 年出版。实际上,Hooke 观察到的仅是植物死细胞的细胞壁。与此同时,荷兰科

学家 Antonie van Leeuwenhoek (1632—1723) 用显微镜观察池塘水时首先发现了原生动物。Leeuwenhoek 在生物学的发展上有着杰出的贡献, 他观察了多种动植物的活细胞, 并对一些细胞的大小进行了测量, 描述了细菌不同的形态, 观察到了人和哺乳动物的精子、红细胞的核。Leeuwenhoek 制作的标本在 1981 年重新被发现, 在这些标本中仍可以观察到藻类及其他细胞。他的研究成果被英国皇家学会汇编成论文集《哲学会报 (1673—1724)》(Philosophical Transaction (1673—1724))。

在 Hooke 提出 cell 一词以后的 100 多年中, 由于显微镜制作技术的限制, 科学家们一直把注意力集中在细胞壁的观察上, 而对完整细胞内部的研究没有什么大的进展。到 18 世纪末 19 世纪初, 科学家们注意到了植物组织小室中的内部结构。C. B. Mirbel (1809) 指出“植物是由有膜的细胞性组织所组成”, 并认为植物各种组织中的细胞具有独立性。1831 年 R. Brown 在兰科植物叶表皮细胞中发现有一小球形结构, 称之为细胞核, 并强调了它的重要性。E. Dujardin (1835) 在低等动物根足虫和多孔虫细胞内发现内含物, 称之为肉样质 (sarcode)。至此, 人们才认识到, 细胞并不像 Hooke 所观察的是小孔或小室, 而是一个有内含物的结构。

二、细胞学说的创立和细胞学的形成

19 世纪初, 细胞在动植物中的重要性已被广泛认识。动物和植物细胞在形态上有很大差异, 植物细胞表面是一层细胞壁, 而动物细胞没有细胞壁且细胞的边界不明显, 表面上看两者没有相同之处。在 1824 年, 法国科学家 H. Dutrochet 明确地主张“一切组织、一切动植物器官, 实际上都是由形态不同的细胞所组成”。德国植物学家 M. J. Schleiden (1838) 得出结论, 尽管植物不同组织的结构千差万别, 但植物都是由细胞组成的, 植物胚由单个细胞发育而成。其后, 德国动物学家 T. Schwann (1839) 出版了有关动物组织的报告, 指出动物与植物的细胞具有相同的结构, 并正式提出细胞学说 (cell theory): 所有生物体均由一个或多个细胞组成, 细胞是生命的结构单位。细胞学说的创立明确了动植物有机界的统一性。但 Schleiden 和 Schwann 对细胞的起源解释不清。直到 1855 年, 德国病理学家 R. Virchow 明确指出“细胞来自细胞”, 主张细胞只能通过一个已经存在的细胞分裂而来, 细胞分裂是生物繁殖的普遍现象。于是, 细胞学说包含了以下主要内容: ①细胞是所有生物的结构和生命活动的单位; ②生物的特性取决于细胞的特性, 多细胞生物的每一个细胞即是一个活动单位, 执行特定的功能; ③细胞只能通过细胞分裂而来, 通过遗传物质维持细胞的连续性。

Schleiden 和 Schwann 创立细胞学说以后, 引起了人们对多种细胞进行观察研究的兴趣, 并把大家的注意力重新吸引到了细胞的内部结构方面。J. E. Purkinje (1840) 在动物细胞和 H. von Mohl (1846) 在植物细胞中也发现肉样质的东西, 并被 Purkinje 首先命名为原生质 (protoplasm)。M. Schultze (1861) 认为, 动植物细胞中肉样质与原生质实际上是同一种物质, 并提出有机体的组织单位是一小团原生质, 这种物质在一般的有机体中是相似的。J. von Hanstein (1880) 提出“原生质体” (protoplast) 的概念。至此, 细胞的含义已与最初发现时不同了, 细胞的概念初步形成: “细胞是有膜包围的原生质团”。围绕在核周围的原生质称为细胞质 (cytoplasm), 核内的物质称为核质 (karyoplasm)。