

生物医学光子学

SHENGWUYIXUEGUANGZIXUE

◆ 罗荣辉 主编
郭茂田



吉林大学出版社
JILIN UNIVERSITY PRESS

生物医学光子学

罗荣辉 郭茂田 著

吉林大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

生物医学光子学/罗荣辉,郭茂田主编.—长春:吉林大学出版社,
2008.8

ISBN 978-7-5601-3922-7

I. 生… II. ①罗…②郭… III. 生物医学工程-生物光学 IV. R318.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 132058 号

书 名:生物医学光子学

作 者:罗荣辉,郭茂田 著

责任编辑、责任校对:刘子贵

吉林大学出版社出版、发行

开本:787×1092 毫米 1/16

印张:30.375 字数:700 千字

ISBN 978-7-5601-3922-7

版权所有 翻印必究

社址:长春市明德路 421 号 邮编:130021

发行部电话:0431-88499826

网址:<http://www.jlup.com.cn>

E-mail:jlup@mail.jlu.edu.cn

封面设计:孙 群

吉林科华印刷厂 印刷

2008 年 8 月 第 1 版

2008 年 8 月 第 1 次印刷

定价:72.00 元

前 言

生物医学光子学 (Biomedical Photonics) 亦称生物医学光学, 主要研究光子作为信息的载体和能量的载体, 在生物学和医学中的应用。它是一门用光子来研究生命的科学, 是光子学和生命科学相互交叉、互相渗透而产生的边缘学科。

本书是作者在多年教学与科研的实践基础上, 吸收了国内外最新的科研成果编写而成。全书系统地阐述了生物医学光子学的基本概念、基本原理及在相关领域的应用。在结构上分四个部分, 主要包括: 生命科学和光子学基础知识; 生物医学光子学基本理论; 光子技术在生物医学中的应用及目前主要研究方向简介等。本书紧随当今生物医学光子学的发展方向, 归纳总结了近年来国内外的研究情况, 介绍了该领域关注的热点问题, 如太赫兹技术在生物医学领域中的应用等, 具有较强的系统性、理论性和新颖性。

本书各章内容的安排既注重知识之间的有机联系, 又考虑各自的独立性, 并配有思考题和练习题, 可作为医学院校和理工院校高年级本科生、研究生教材, 学生可根据专业实际情况选择相应内容进行学习; 同时, 也属生物医学光子学研究领域的专著, 可供物理、光电子技术和生物医学等相关学科的学者、技术人员学习参考。

本书绪论、第 1 章、第 4 章、第 8 章、第 10 章由罗荣辉编写, 第 2 章、第 3 章、第 11 章由郭茂田编写, 第 5 章、第 6 章由杜艳丽编写, 第 7 章由程东明编写, 第 9 章、第 15 章由马凤英编写, 第 12 章由杨静编写, 第 13 章、第 14 章由赵传奇编写, 第 16 章、第 17 章、第 18 章由弓巧侠编写, 罗荣辉、郭茂田老师负责全书的统稿审定工作。

在编写过程中, 本书参阅了大量国内外文献, 引用了部分插图, 在此向这些文献的作者和出版者表示衷心感谢。路刚及其他研究生为本书的制图、校对做了大量的工作, 付出了辛勤的劳动, 在此一并致谢。

由于编者水平和时间所限, 书中难免会有疏漏和错误之处, 希望广大读者批评指正。

编 者
2008 年 6 月

目 录

绪 论	1
第一篇 生命科学概论	5
第1章 生命世界	6
1.1 生命的本质和基本特征	6
1.2 生物的分类	8
1.3 生物与环境	12
第2章 生命的物质基础	20
2.1 组成原生质的主要无机物	20
2.2 组成原生质的主要有机物	22
第3章 生命的基本单位——细胞	30
3.1 细胞的结构与功能	30
3.2 细胞的分裂	40
3.3 细胞的分化、衰老与死亡	45
第4章 高等动物体的结构与功能	56
4.1 消化系统、呼吸系统与排泄系统	56
4.2 循环系统与内分泌系统	69
4.3 感受器官和神经系统	81
4.4 运动系统与生殖系统	96
第二篇 光子学基础	104
第5章 光辐射	105
5.1 原子发光机理与光谱	105
5.2 辐射的基本概念	111
第6章 激光原理及技术	119
6.1 激光基本原理	119
6.2 激光基本特性	127
6.3 激光技术	137
第7章 医用激光器	154
7.1 固体激光器	154
7.2 半导体激光器	169
7.3 二氧化碳激光器	173
7.4 氦氛激光器	177
7.5 染料激光器	183
7.6 氩离子激光器	190
7.7 准分子激光器	193
7.8 医用激光器的导光系统	198
第三篇 生物医学光子学基本理论	202
第8章 生物组织的光学及热学特性	203

8.1	皮肤的光学特性	203
8.2	眼球的光学特性	210
8.3	生物组织的热学特性	214
8.4	生物组织光学特性测量	217
第9章 生物组织的发光机制		221
9.1	生物组织的发光类型	221
9.2	生物组织的超弱发光	224
第10章 弱激光生物作用机理		229
10.1	光致发光作用机理	229
10.2	光致低热作用机理	230
10.3	光致生物刺激作用机理	233
第11章 强激光生物作用机理		239
11.1	光致化学作用机理	239
11.2	光致高热作用机理	242
11.3	光蚀除作用机理	246
11.4	等离子体诱导蚀除作用机理	255
11.5	光致破裂作用机理	265
第四篇 光子技术在生物医学领域的应用		281
第12章 医学光子治疗技术		282
12.1	概述	282
12.2	激光在眼科中的应用	288
12.3	激光手术	301
12.4	内镜激光手术	316
12.5	弱激光治疗术	328
第13章 医学光子诊断技术		335
13.1	概述	335
13.2	激光荧光光谱法	336
13.3	激光拉曼光谱法	340
13.4	激光全息术	345
13.5	激光散斑技术	351
13.6	激光多普勒技术	354
13.7	其他激光检测与诊断技术	359
第14章 光动力学疗法		363
14.1	光动力学作用原理	363
14.2	光动力学治疗方法	366
14.3	光动力学疗法临床应用	373
第15章 生物医学光学技术及仪器		383
15.1	激光扫描共焦显微术	383

15.2	多光子荧光成像技术	390
15.3	激光光捕捉与微束技术	394
15.4	激光流式细胞仪技术	403
15.5	荧光漂白恢复技术	416
15.6	激光细胞融合技术	418
第16章	其它研究应用领域	426
16.1	组织光学研究	426
16.2	激光在农业和生物工程技术中的应用	433
第17章	太赫兹技术在生物医学中的应用	441
17.1	太赫兹技术简介	441
17.2	太赫兹技术在生物医学领域的应用	444
第18章	激光安全防护	450
18.1	激光的主要危害	450
18.2	激光的安全标准	458
18.3	激光防护措施	467
	参考文献	477

绪 论

光子学是一门研究作为信息和能量载体的光子行为及其应用的科学，其触角几乎遍及一切技术领域，并因此产生了丰富多彩的光子应用技术。早在光子学产生初期，充满活力的生命科学就和光子学相互交叉渗透，目前，生命科学已成为光子学的一个重要应用领域，光子学及其技术广泛应用到生物科学和医学的诸多方面，由此形成了生物医学光子学这一新兴学科，并被科学界所广泛认同和重视。

一 生物医学光子学的概念

21 世纪，所有的科学技术都是围绕人与人类的发展问题，寻找各自的存在意义与发展面。自然界最奇特而变化多端的生命现象从起源、演化乃至今天人类有行为能力与潜质，都与光这个神秘的物质息息相关、密不可分。光与生命早已结下不解之缘。近年来，生物医学与光子学的交叉研究骤然兴起，令人瞩目，并派生出一门新兴的学科——生物医学光子学（Biomedical Photonics）。生物医学光子学亦称生物医学光学（Biomedical Optics），该学科主要讨论光子作为信息的载体和能量的载体，被生物体系或其某些组成部分吸收后引起的一系列的分子事件，涉及到光和生命系统的关系，光和生物体的相互作用，光对生物系统结构和形态的影响；涉及到生物（包括人体组织）以光子形式释放的能量与来自生物系统的光子探测过程，以及这些光子所携带的有关生物系统的结构与功能信息，还包括利用光子的特性对生物系统进行的加工与改造等一系列问题。简言之，生物医学光子学就是用光子来研究生命的科学，它是一门光子学和生命科学相互交叉、互相渗透而产生的边缘学科，生物学研究与医学基础研究、临床诊断和治疗涉及到的光学及相关的应用技术，其中包括最基础性的光物理问题，均是生物医学光子学的研究对象。

目前，生物医学光子学处于发展的初级阶段，但前景广阔，势头迅猛。一般认为，生物医学光子学可分为医学光子学和生物光子学两个相对独立的部分。二者的区别主要在于光子学及其技术的具体应用对象不同。医学光子学的研究目标为人体及其器官和组织，医学光子学基础和技术包括光在生物组织中的传输规律与生物组织光学模型、医学光谱技术、生物组织光学成像术等光诊断和光治疗技术及其作用机理的研究。医学光子学的发展动力主要来源于医学的迫切需要。许多面向临床光治疗以及光诊断的具体应用，如激光医学中的光计量学、光学成像诊断学、肿瘤诊断与治疗等所提出来的各种问题，亟待医学光子学给出满意的回答，由此极大地促进了医学光子学的迅猛发展。医学光子学研究的直接对象是生物组织，特别是活体的生物组织，它的研究成果将直接服务于人类医学，并有可能创造出新的高科技产业；而生物光子学主要研究生物系统中产生的光子及其所反映的生命过程，以及这种光子在生物学研究、农业、环境、甚至食品品质检查方面的应用，另外，利用光子及技术对生物系统进行的检测、治疗、加工和改造等也是其一项重要的任务。由于应用对象的特殊性导致光子学及其技术在生物系统和医学领域的应用各有其特点，但医学光子学和生物光子学也会相互

交叉。

二 生物医学光子学的主要内容

运用光子学原理和技术，为医学、生物学和生物技术领域中的问题提供解决方案或理论依据即构成生物医学光子学的研究内容，主要包括：

1. 生物医学光子学基础研究

(1) 光在生物组织中的传输理论；(2) 光传输的计算机模拟；(3) 低强度激光辐照的生物医学效应；(4) 组织光学参数的测量方法和技术；(5) 生物组织红外与远红外光谱；(6) 生物组织的光热响应；(7) 生物组织的超微弱发光及生物体系中的非线性光学效应和量子光学效应等。

2. 医学光子治疗技术

(1) 光动力疗法；(2) 激光在眼科中的应用；(3) 激光手术；(4) 激光内窥镜手术；(5) 弱激光治疗术；(6) 新型激光器械、光学传感器与新技术在各临床学科的应用。

3. 医学光子诊断技术

(1) 激光荧光光谱法；(2) 激光拉曼光谱法；(3) 激光全息术；(4) 激光散斑技术；(5) 激光多普勒技术；(6) 其他光检测诊断与成像技术。

4. 生物医学光子学技术及仪器

(1) 激光扫描共焦显微术；(2) 多光子荧光成像技术；(3) 激光光捕捉与微束技术；(4) 激光流式细胞仪技术；(5) 激光荧光漂白恢复技术；(6) 激光细胞融合技术。

5. 生物医学光子学其它研究应用领域

(1) 激光在农业和生物工程技术中的应用；(2) 太赫兹技术在生物医学领域的应用等。

生物医学光子学融合了光子学、电子学、计算机科学、生命科学、数学、物理等诸多学科，其研究内容范围相当广泛。

三 生物医学光子学发展现状及展望

光子技术在生命科学中的应用，在经历了较缓慢的生长阶段后，由于激光及最新光学技术的介入，开创了一个迅速发展的新局面。

近年来，生物医学光子学已成为国际生物医学界和光子学界共同关注的一个新热点。美国光学年会的论文中许多内容与生命科学有关，国际上也出现了专门的研究机构与杂志，如日本已成立了一个生物医学光子学研究中心，美国几个大学也建立了几个研究小组。Laurin 出版公司发行出版了《Bio-Photonics》新杂志。多年来，SPIE（国际光学工程学会）于每年年初召开一次规模十分庞大的生物医学光学国际性学术会议，出版了新的期刊《Journal of Biomedical Optics》，美国光学学会重要的会刊之一《Applied Optics》也将其“Optical Technology”栏目更名为《Optical Technology and Biomedical Optics》。目前该领域国际前沿关注的重点方向有：分子成像技术、OCT 成像技术、二次谐波成像技术、诊断光谱学、光子迁移技术、共聚焦多光子显微成像、新型光学仪

器在生物医学中的应用、光动力治疗中新一代光敏剂的研制、激光治疗和微创激光手术、荧光关联谱、光镊与光阱应用等，这些课题国外不少机构都在不遗余力进行研究。

国内的一些大学、科研院所和医疗单位纷纷成立了生物医学光子学相关研究机构，投入了大量的人力和物力开展了基础和应用研究，取得一系列成果。2004年11月，国家自然科学基金优先资助领域战略研究报告《生物医学光子学与光子技术》发表，该报告介绍了生物医学光子学及其技术的内涵、发展和意义，给出了生物医学光子学的主要内容，并根据我国在该领域研究情况的实际，提出了战略发展目标和措施，选定了若干近期优先研究领域，包括生物光子学、医学光子学基础研究、医学临床的光学诊断和治疗中有特色、有创新的重要研究课题。

1. 生物光子学与分子光子学研究领域

- ★生物代谢发光及其在功能检测中的应用研究；
- ★人体经络的光学表征及其调控功能的探索；
- ★活体生物组织显微光学测量术。

2. 医学光子学基础研究领域

- ★生物组织中光的传输理论和数值模拟方法；
- ★活体组织光学参数的测量方法与技术；
- ★反射光谱学的理论与技术；
- ★生物组织的光热响应。

3. 医学临床（前）诊断与其它技术研究领域

- ★生物组织超声调制的光成像方法与技术；
- ★无创伤的血糖测量术；
- ★新颖的光子技术、器件和仪器开发。

4. 激光医学研究领域

- ★光动力疗法的新理论及其验证；
- ★激光治疗中的量效与机制；
- ★激光外科中的低强度激光效应。

我国各项研究基金在这些领域也投入了很多资金，可以预期，未来的生物医学光子学是一个大有可为的科研领域。

目前，太赫兹技术在生物医学中的应用研究悄然崛起，开拓了生物医学光子学的一个新领域，成为国际前沿关注的热点之一。太赫兹（THz, Terahertz）辐射是指频率在 0.1~10THz 之间的电磁波，由于太赫兹的产生和检测比较困难，人们对该波段电磁辐射性质的了解非常有限。太赫兹技术之所以引起人们广泛的关注，首先是由于该波段物质的太赫兹光谱（包括发射、反射和透射）包含有丰富的物理和化学信息，研究材料在这一波段的光谱对于物质结构的探索有着重要的意义；其次太赫兹光子的能量只有毫电子伏特，与 X 射线相比，不会因为光致电离而破坏被检测的物质，从而可以安全地进行生物医学方面的检测和诊断，因此太赫兹技术在生物成像、医疗诊断等方面（如皮肤癌、烧伤诊断）具有重大的科学价值和广阔的应用前景。

生物医学光子学研究的活跃、繁荣景象并不完全出于学术本身的缘由，而是说明

人们对采用生物医学光子学技术解决长期困扰人类健康的顽疾如心血管疾病和癌症所起的作用寄予很大希望，预期其中的重大突破将会起到类似 X 射线和 CT 技术在人类文明进步史上的重要推动作用，在知识经济崛起的时代还可能产生和带动一批高新技术产业。随着研究的不断深入，生物医学光子学必将对生命科学发展产生重大影响，为人类文明和社会进步做出应有的贡献。

第一篇

生命科学概论

第 1 章 生命世界

地球上已知的生物种类估计有 200 万~450 万种，已经灭绝的种类更多，估计至少也有 1500 万种。这些生物分布广泛，从北极到南极，从高山到大海，从白雪覆盖的冰原到大海数千米深的大洋洋脊的极端高温高压环境及地表下数千米的地层深处，几乎在地球表层的任何地方都有生命的存在。事实上，哪里有液态水、有机物和能源，哪里就有生命。它们具有多种多样的形态结构，生活方式也变化多端，构成了丰富多彩的生命世界。

1.1 生命的本质和基本特征

生命是生物体所显现的种种现象的总的抽象概念，从古至今随着人们对这些现象的逐渐认识，人们对生命概念的理解也在不断地改变。

1.1.1 生命的本质

哲学家难以回答“人是什么？”美学家难以回答“美是什么？”生物学家也难以回答“生命是什么？”。生命(life)是什么？或者说生命与非生命的本质区别是什么？这是生命科学最基本的问题，但至今尚未有一个普遍接受的定义。

在古代，自然哲学家就已经十分关心生命本质的问题，但是，生命作为一个一般科学概念提出来却是在 19 世纪初，与生物学作为一个学科出现差不多同步。那时人们已经认识到动物与植物具有某些共同的基本性质，它们都是生物，它们都有生命。人们想用生命概念把生物与非生物区别开来，想用生物学代表一个与原有的动物学和植物学不同的、以研究生命的共同特征、生物共同的发展规律为目标的新的研究领域。

19 世纪的著名生物学家多是从活力论(vitalism)观点认识生命的。比夏(Bichat, 1771—1802)把生命定义为“抵抗死亡的机能的总和”；居维叶(Cuvier, 1769—1832)、李比希(Liebig, 1803—1873)等人把生命理解为同物理和化学力的对抗，物理和化学力作用的结果是破坏性的，而生命的作用在于形成和维护有机体的结构与功能；巴斯德根据其发酵作用的研究结果，坚持把发酵归之于微生物的生命活动。19 世纪中叶也有人尝试依据生命的特征来描述生命，例如贝尔纳(Bernard, 1813—1878)在他的《论动植物共有的生命现象》中论述了生命的 5 种特征：组织、繁殖、营养、生长以及对疾病和死亡的敏感性。

机械论观点(mechanistic view)则认为可以用物理和化学定律解释生命现象，生命问题说到底还是物理和化学问题。在 19 世纪中有路德维希(Ludwig, 1816—1895)、赫姆霍兹(Heimholtz, 1821—1894)等人阐述这种观点，这种观点对现代分子生物学家影响更大。

至于生命本质的问题，最近一些有影响观点与其说是来自生物学家，不如说是

来自物理学家。玻尔(Bohr, 1885—1962)1932年在“光和生命”(Light and Life)的演说中指出,想借对原子的认识透彻了解生命现象是绝对不可能的,生命也许有某些特征尚未为人们掌握。薛定谔(Schrödinger, 1887—1961)1945年在题为《什么是生命》(What is life)的小册子中说:“目前的物理和化学虽然还缺乏说明(在生物体中发生的各种事件)的能力,然而丝毫没有理由怀疑它们是不可能用物理学和化学去说明的”。薛定谔还认为,通过生物学研究有可能发现“新的物理学定律”。受薛定谔这一极富诱惑力的预言的驱动,不少物理学家离开了他们本来的研究领域,转而致力于研究生命科学问题。尽管这种研究至今未能发现“新的物理学定律”,但却促进了生物学向分子水平的发展,也进一步增强了还原论的观点。

对生命本质的认识虽然还在不断发展,至今仍然没有一个大家普遍接受的定义,还需要人们进行不断的努力。孜孜不倦地探讨,努力去寻找问题的答案,这就是科学研究的态度。

1.1.2 生命的基本特征

虽然我们难以给生命下确切定义,但可以讨论生命的基本特征,认识生命与非生命物质的根本区别。

1. 生长

一棵幼苗可以长成一棵大树,一头小象可以长成一头大象。当我们看到一种东西在不断长大时,一般我们会说它是“活”的,是有生命的。生长(growth)是生物普遍拥有的一种特征。

食盐晶体、冬天的冰柱、岩洞中垂下的石笋等无生命物体也会长大,但它们的长大是在表面附加同类物质,而生物体是由内部长大,其“材料”也不是环境供给的现成物质,而是经生物自身吸收改造后形成的物质。

2. 繁殖

生命靠繁殖(reproduction)得以延续,或通过生殖细胞,或通过其身体的一个部分。虽然并非每个生物体都会留下后代,但是每个生物体都是其亲本生命的延续。一个小虫、一棵小草、人体的每个细胞,其生命都可以上溯至远古时代最原始的生命。生命个体不断死亡,但生命永存。从这个意义上说,生命比任何非生命物体都要耐久。海可枯、石可烂,生命一直在延续着。有人把生命理解为同疾病和死亡的对抗,理解为同物理、化学等非生命力的对抗,这是依据之一。

3. 原生质

生物体都是由原生质(protoplasm)构成。“原生质”一词的本意是生命的原始物质和首要物质,后来泛指生物细胞的全部的生命物质,包括细胞膜、细胞质和细胞核等部分,其主要化学成分是核酸和蛋白质。研究原生质就是研究生命。

4. 细胞

细胞(cell)是生物体的基本结构单位,生物体通过细胞的活动进行各种生命功能。生物的生长发育,实际上就是细胞生长分裂与分化的过程。生物的病变,实际上就是它的细胞机能失常。

5. 新陈代谢

新陈代谢(metabolism)是生命的基本特征之一，是维持生物体生长、繁殖、运动等生命活动过程的化学变化的总称，简称“代谢”。生物体是一个开放的系统，同周围环境不断地在进行着物质和能量的转换。它把吸收的养分转化成自身的组成部分并储存能量，这是同化过程；同时生物体也在不断地将自身的组成物质分解以获取能量，并向环境散发能量，这是异化过程。新陈代谢失调会引发疾病，新陈代谢停止则意味着生命终止，生物体将会解体。

6. 调节

新陈代谢是在高度自动、非常精细的调节(regulation)下进行的，这也是生命的一个基本特征。其产物的种类和数量，都是通过反馈调节机制精密控制。现在最高级的人造自动控制装置，其控制能量释放与物质合成的精度也比不上生物调控系统，若一个人的体温升高了1℃，或者血液的成分有些许变化，那就意味着生病了。

7. 应激性

生命的另一重要特征是应激性(irritability)，也就是能对由环境变化引起的刺激做出相应反应。一定的温度能使鸡蛋变成小鸡，而不能使石头变成小鸡，这是鸡蛋中的受精卵对温度变化的刺激做出了反应，而石头不能。绿色植物枝叶向着阳光生长，人手碰到烫的东西马上缩回来，诸如此类的现象都是生物应激性的表现。一旦应激性完全丧失，生命活动也就终止了。

1.2 生物分类与物种

1.2.1 生物分类的依据

1. 林奈和双名法

地球上已有科学记载的生物约 200 万种，这个数目还只是现存生物中的一小部分。因为其中有 50 万种是产自热带的，2 / 3 以上已记录的生物产自温带，而我们所知道的热带生物的种类远远超过温带，所以按最保守估计，地球上现有的生物物种大约在 500 万种以上。

生物系统分类学公认的奠基人是瑞典植物学家林奈(Karl vonLinne, 1707—1778)。林奈于 1735 年出版《自然系统》，这本书到 1768 年共出了 12 版，是生物系统分类领域的经典著作。林奈的突出贡献是提出了一个科学的生物命名法——双名法(binomial nomenclature)。按照双名法，每个物种的科学名称(即学名)由两部分组成，第一部分是属名，属名是名词性质，且第一个字母大写；第二部分是种名，种名是形容词，带有修饰限定属名的意思，毋需大写；种名后面还应有定名者的姓名，有时定名者姓名可以省略。双名法的生物学名均应为拉丁文，因为拉丁文是当时流行的书面文字，变化少，又比英文、法文等正在流行的口语文字更易于为各国科学家接受。在书面格式上，生物物种的学名都应用斜体字，表明是拉丁文，不能用斜体字的情况下，则在学名下

面划一道线，以示区别。

以下是生物物种学名的举例：

大肠杆菌	<i>Escherichia coli</i>
酿酒酵母	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
秀丽隐杆线虫	<i>Caenorhabditis elegans</i>
果蝇	<i>Drosophila melanogaster</i>
拟南芥菜	<i>Arabidopsis thaliana</i>
爪蟾	<i>Xenopus laevis</i>
人	<i>Homo sapiens</i>

林奈提出的双名法一直沿用至今。

2. 生物系统分类的依据

按照进化上的亲缘关系来进行分类，通常称为自然分类，这个原则已为大家所接受。但是，在实际操作中，区分亲缘关系远近的依据是什么呢？

起初，人们只能依据每个物种生物体的外部形态结构，而外部形态往往变化很大，难以捉摸。植物分类中，着重于依据变化较小的生殖器官——花和种子的特征；在动物分类中，通常结合内部构造和生理功能，确定可能的演化关系。

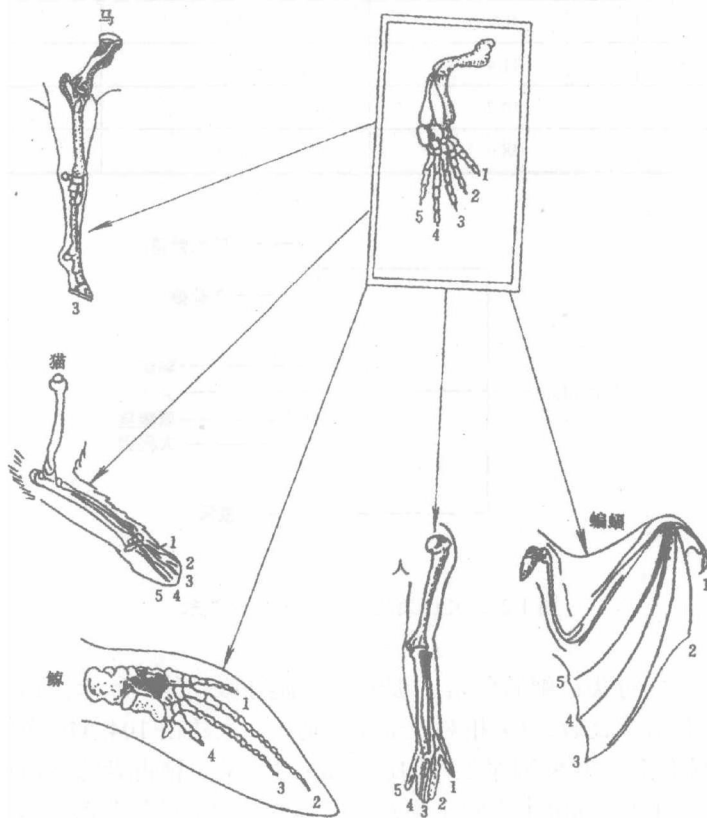


图 1.2-1 哺乳动物前肢的演化

例如，马、猫、鲸、蝙蝠和人的前肢(图 1.2-1)，虽然演化成了不同形式的蹄、爪、鳍、翅和手，但是从骨骼构造仍能追溯它们的同源性(homologus)。这是把这些外形各不相同的物种都放在哺乳动物中的证据之一。

后来，遗传学、免疫学、生物化学和分子生物学的研究成果，逐渐被引入分类学中，从而有了更多的系统分类依据：依据抗原抗体反应，依据蛋白质分子的氨基酸序列，依据分子中核苷酸的序列等等，这些分类法统称为生化分类。

免疫反应用于分类：将灵长类几个物种的血清分别注射到家兔体内，使家兔产生相应的抗体，然后取出含不同抗体的家兔抗血清，再用于测试几个灵长类物种的血清，从抗原抗体反应的强弱(表 1.2-1)，可判断出它们之间亲缘上的近疏(图 1.2-2)。

表 1.2-1 灵长类几个物种的血清反应

受试动物(血清)	抗血清		
	人	黑猩猩	长臂猿
人	0	3.7	11.1
黑猩猩	5.7	0	14.6
大猩猩	3.7	6.8	11.7
猩猩	8.6	9.3	11.7
合趾猿	11.4	9.7	2.9
长臂猿	10.7	9.7	0
猕猴	38.6	34.6	36.0

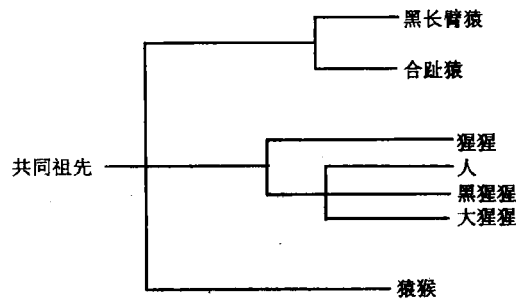


图 1.2-2 灵长类几种物种的亲缘关系

蛋白质序列用于分类：细胞色素 c 是执行细胞呼吸功能的一个蛋白质，它具有的几个特点很利于作分类比较：1) 相对分子质量适中，大约由 104~112 个氨基酸残基组成；2) 分离、纯化和氨基酸测序工作均已完成；3) 是一种古老的蛋白质，在许多物种中都能找到。表 1.2-2 列出了不同生物及人的细胞色素 c 的氨基酸成分上的比较。可以看到黑猩猩与人没有差别，说明两个物种之间的亲缘关系很近；酵母菌与人之间差 45 个氨基酸，可见两个物种之间十分疏远。