



进化生物学

Evolutionary Biology

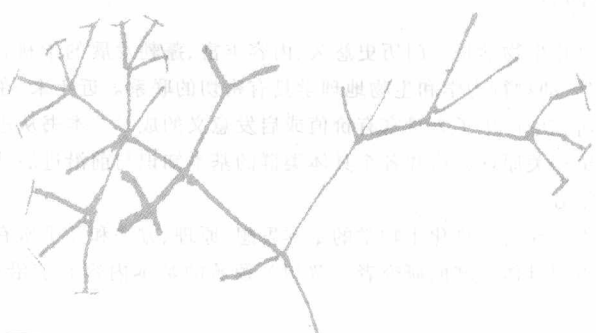
谢强 卜文俊 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书是普通高等院校生物专业及相关专业的一门重要课程。本书在编写过程中，力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校生物专业及相关专业教材，也可供从事生物工作的科技人员参考。



进化生物学

Jinhua Shengwuxue

谢强 卜文俊 编著

本书主要介绍生物进化的基本理论、方法和应用。全书共分10章，包括：绪论、物种形成、物种灭绝、物种多样性、生物地理学、分子进化、系统发育学、趋同进化、趋异进化、物种形成与物种灭绝。本书可作为高等院校生物专业及相关专业教材，也可供从事生物工作的科技人员参考。

本书在编写过程中，力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校生物专业及相关专业教材，也可供从事生物工作的科技人员参考。



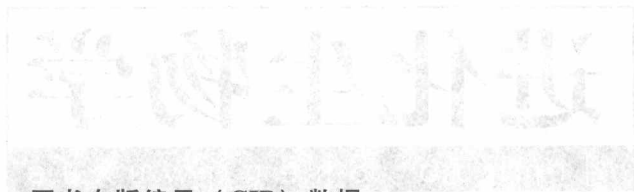
高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

ISBN 7-04-01881-2

内容简介

进化生物学是一门历史悠久、内容丰富、蓬勃发展的学科,与古生物学、进化发育生物学、种群遗传学、生物系统学、动物行为学和生物地理学具有密切的联系。近年来,在众多的化石研究、分子发育生物学研究和分子系统学研究中产生了大量富有价值或启发意义的成果。本书从进化生物学发展历史上代表性学者的思想开始,陆续引出相关原理方法和各个具体类群的基本知识与前沿进展,同时注重辨析易混淆概念和引入国际上通行的某些介绍方式。

本书涵盖了进化生物学的基本思想、原理、方法和几乎所有生物有机体大类的自然历史概况,适用于进化生物学不同具体领域的研究者了解相关领域的基本内容和前沿进展,也适合研究生和本科生作为教材或参考书使用。



图书在版编目 (CIP) 数据

进化生物学/谢强, 卜文俊编著. —北京: 高等教育出版社, 2010. 8

ISBN 978 - 7 - 04 - 028550 - 5

I. ①进… II. ①谢… ②卜… III. ①生物 - 进化学说 - 高等学校 - 教材 IV. ①Q111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 126566 号

策划编辑 李光跃 责任编辑 王超然 封面设计 张楠 责任印制 尤静

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 益利印刷有限公司

开本 787 × 1092 1/16
印张 29.5
字数 720 000

购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2010 年 8 月第 1 版
印次 2010 年 8 月第 1 次印刷
定价 37.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 28550 - 00

谨以本书向进化生物学的先驱们致敬

谨以本书献给有兴趣了解进化生物学的读者朋友

道不远人，人之为道而远人，不可以为道。

——孔子

中国科学院植物研究所图书馆藏

本书的出版得到以下项目资助

国家自然科学基金委员会昆虫分类学特殊学科点项目(No. J0630963)

国家自然科学基金委员会杰出青年科学基金项目(No. 30725005)

国家自然科学基金委员会面上项目(No. 30970350)

南开大学教材资助立项项目

序

进化生物学是一门历史悠久的学科,以达尔文《物种起源》的出版作为诞生标志。随后,包括华莱士、魏格纳、弗里奇、洛伦茨、廷伯根、杜布赞斯基、迈尔、亨尼希、木村资生等伟大先驱在内的一批批学者,不断将进化生物学引向更深层次的统一与更大范围内的综合。今年恰逢达尔文诞辰 200 周年和《物种起源》出版 150 周年,值此之际出版一本对于研究者、入门者、爱好者都具有可读性的《进化生物学》,对于中文读者更具系统性地了解进化生物学学科进步的历程和现当代进化生物学的进展现状,具有十分积极的作用。

进化生物学是一门内容丰富的学科,对于促进生命科学各分支学科间的综合具有关键作用,对于促进自然科学不同分支学科间的综合亦具有重要作用。了解进化生物学的相关内容,对于帮助人们从多角度认识生命现象具有不可替代的作用。目前,除了生物化学进化阶段、古生物学、自然选择、生活史与遗传系统、种群遗传学、生物系统学、生物地理学、脊椎动物进化、人类进化等比较经典的组成部分外,细胞进化、进化发育生物学、分子进化等内容也越来越多地成为国际上进化生物学书籍的组成部分。

本书创造性地使用了分为思想理论和自然历史两大部分的内容框架,前一部分从回顾代表性学者的思想开始,依次介绍了地球历史早期的生命进化、生物系统学、经典进化论、种群遗传、进化发育生物学、分子系统学,然后以物种问题和显生宙进化格局为承上启下的部分,在后一部分中概要性地介绍了植物、真菌、无脊椎动物、鱼类、两栖类、爬行类和鸟类、哺乳类、人类进化的内容。使得本书成为一本既有“骨骼”、又有“血肉”地介绍进化生物学的图书,这在国际上的同类图书中还不多见,不失为一种有益的尝试。进化生物学是一门快速进展的学科,今天的进化生物学正在随着生命科学整体迈入基因组乃至后基因组时代,新的实验技术与分析方法的发展不断解放着学科发展的束缚,当对模式生物的分子生理研究达到一定深度后,对其他生物有机体的相关研究,使得分子生理研究中的多结构层次视角的优势和生物系统学与生态学研究中的生物多样性的优势可以越来越很好地结合起来,而这种结合在与生命现象随时间改变的规律的研究,即进化生物学研究,进一步结合后,则为科学领域拓展出新的疆界。希望本书的出版能够不断引发人们对于进化生物学的兴趣,提高了解进化生物学相关内容的热情,促进其他领域的研究者将进化生物学的思想与方法引入各自研究的探索。

中国科学院院士
张亚平
2009 年于云南昆明

序 二

《物种起源》在 1859 年 11 月 24 日的出版,标志着达尔文进化论和进化生物学学科的正式诞生。150 年过去了,对于物种问题的认识仍然充满着诸多争论,而对于某些物种进行深入研究的成果也不断带给人们惊喜。在今天,物种问题仍然是进化生物学乃至生命科学的核心问题。分子生物学家以若干模式物种作为研究材料进行不同结构与功能层次的研究,生态学家研究不同物种在生态系统中的相互关系、相对重要性以及各物种内部的组织结构,生物系统学家研究物种多样性的现状、历史以及物种在高级阶元上的组织关系。物种是生理、生态和进化 3 个方面研究的结合点。

谢强和卜文俊博士编著的《进化生物学》抓住了物种这个核心问题,这在进化生物学思想、生物系统学的原理与方法、经典进化论、种群遗传动态、物种问题和显生宙的进化格局等几个部分都有所体现。而本书的自然历史部分,则更是将读者从可能略显抽象的进化理论带入真实的生物有机体世界,使得理性认识可以得到感性认识的帮助。书中指出,由于典型的物种形成是时间上的漫长过程,因而在几亿年以来任何一个时间断面进行观测,都可以发现处于不同演化状态的物种,这是难以对物种进行单一定义的根本原因之一,生动地说明了物种这个客观现象中既间断又连续的复杂性。

这本书的另一个特色是对概念的严格界定。概念是进行科学讨论的语言单元与基石,是科学理论的基础。对于概念的严格界定与区分,将帮助初学者与爱好者更顺利地、无歧义地了解进化生物学的相关知识,避免在学习之初就产生或接受对进化生物学或广泛或相对有限的误读。希望本书的出版能够有效地服务于进化生物学教学与研究。

郑乐怡 教授
2009 年于南开园

前 言

自然科学大背景中的进化生物学

生命科学是自然科学的一部分,进化生物学是生命科学的一部分。然而,客观世界并不因人们对于学科的划分而被分割开来。虽然不同的学科领域的研究对象有所侧重,但是科学发展的现状越来越显示出学科领域的划分更多地是视角不同,而并非研究对象完全不同。本书力求将人们对生物有机体进化改变的认识放到生命科学乃至自然科学的大背景中,从不同角度、生物有机体的不同结构水平去呈现生物进化中的规律。

科学是什么?要回答这个问题,或许需要借助于对“自然界”和“真理”的认识。如果“真理”可以被表达为自然界全部规律的集合,那么“科学”或许可以被表达为人类已认知的自然界规律的集合。科学可以穷尽真理么?德国著名数学家希尔伯特猜想可以通过已知公理及定理构建的体系去判断其余所有新命题的真伪,这一猜想最终被歌德尔定理推翻。这一段历史或许暗示了真理的无限性,说明了通过有限的已知去推理真理中的未知部分的局限性。那么追求无法被穷尽的真理有意义么,会不会是徒劳?恰恰相反,对于完美、绝对存在、真理的追求,意义深远。人类认识自然界的历史至少说明了,通过科学实验、数学和逻辑,科学这个真理空间中的阿米巴变形虫的疆域可以不断得以扩展。没有人能够否认,科学已经有了长足进步并且还在不断完善。

人们对于客观世界的认知已经发生了革命性的变化。在牛顿力学时代,人类眼中的世界是看得见摸得着的“真实”世界;后来,人们认识到力线与场、波粒二象性、物质-能量守恒、狭义相对论等;今天,对于“弦”的讨论越来越热烈,人们看待客观世界的基本构件的视角似乎越发地倾向于能量的而非物质的。《Science》2003年评出的10大科学突破之首是关于暗能量与暗物质存在证据的发现——在宇宙的组成中,暗能量(dark energy,一种反重力)占73%,暗物质(dark matter, exotic matter or dark mass,属性未知且目前无法检测)占23%,人类所能观察到的“实在的”宇宙物质(ordinary matter)只占4%。此外,数学以其强大的描述世界的能力给人留下深刻印象,给科学发展带来深刻变革,正在发挥着越来越重要的作用,牛津大学的彭罗斯(Roger Penrose)教授指出,现实的空间为非欧几何空间,相对论是在此基础之上讨论问题的,而量子力学尚停留在仅仅是大多数情况下接近现实空间的欧式几何空间中进行探索,因而当两者互相融合时,量子力学需要进步到非欧几何空间。

“生物学”一词是19世纪的产物,之前只有医学、博物学和植物学及其间某种程度的混合。在19世纪,生理学在物理学发展的带动下繁荣,进化生物学也随着达尔文进化论的出现而发展,比较解剖学和比较胚胎学在两者间起着桥梁的作用;此外,随着显微技术的进一步提高,在细胞生物学的研究中已经有学者认为遗传物质位于细胞核中;海克尔1866年提出学科名词的“生态学”,也因捕食、竞争和能量流动等方面的研究而诞生并发展。在20世纪,洛伦茨(Konrad Lorenz)、廷伯根(Nikolaas Tinbergen)和弗里奇(Karl von Frisch)大大推动了动物行为学研究;当然,最为耀眼的要数生物化学与分子生物学和遗传学的发展;此外就是进化生物学中不断的理论综合。在20世纪,几乎所有生命科学以外的学科与生命科学都形成了交叉领域。美国古生物学

家辛普森(George Gaylord Simpson)(1964)认为,生物学是居于全部科学的中心的科学,只有在生物学这里——在全部科学的全部原则都能体现出来的领域,科学才真正能够成为统一的。因此,生物学还可以被合理地视为其他自然科学与社会人文科学之间的桥梁。事实上,生物学有一种令人敬畏的责任,是承担着人类价值观念的,对于人类信仰与价值体系的破旧立新存在现实的巨大影响,是一种没有神启的宗教。

对于生命科学的学科领域划分,可以有不同的方式,例如动物学、植物学、真菌学是根据所研究的生物有机体类群进行划分,生物化学与分子生物学、组织学、形态学是以生物有机体不同的结构层次进行划分,遗传学、发育生物学、行为学、生态学是以生物有机体的不同的现象进行划分。德裔美国进化生物学家、哈佛大学教授迈尔(Ernst Mayr)认为,生命科学大体分为两个部分,一部分是进化生物学,回答为什么的问题;另一部分是研究生理的、机能的生物学,回答怎么样的问题。或许我们可以换一个思路,在空间角度、对于生命本身而言,只有生理的(内在的)和生态的(外在的)问题,对于进化生物学我们感兴趣的是生理与生态之间的互动是如何随时间发展的。本书中将采取这样的划分方式,即生命科学可以大体分为进化的(历史的)、生态的(外在的)和生理的(内在的),进化-生态作为一个大领域直接面对自然界,生理的部分目前主要以少数物种的标准化样本作为模型和研究对象。

作为一个既古老、又前沿的学科领域,进化生物学有若干鲜明的特色。之所以说古老,是因为其最初与分类学、古生物学相伴而生的早期历史,即使以达尔文的著作《物种起源》的出版为标志,学科的历史至今也已超过150年。之所以说前沿,是因为进化生物学的内容已经远远不是达尔文主义或者说达尔文的经典进化论所能概括,而是与遗传学、发育生物学、分子生物学、行为学、生态学等诸多学科领域存在交叉;并且,甚至于“物种”的概念至今依然众说纷纭,缺少一致意见,但同时相关的精彩研究却不断涌现。

当然,有些学科特色至今依然保留。例如,不能将证否或者说可证伪性作为评判进化生物学是否属于科学的理由。应该承认,曾经在很长一段时间内,进化生物学的研究的确带有较重的人为因素,几乎完全无法通过实验证伪,可重复性、可评价性都比较差。如果以分支分析方法的建立和行为学研究的逐步成熟为结束标志,这段时间大约有一个世纪。然而,即使在今天,我们拥有了分子进化的数学模型,有了生态学、行为学研究的数学模型,有了分子发育生物学实验,要想在实验室中完全重现进化历史依然是不可能的,发生生物进化的时间和空间尺度决定了这一点。这个时候或许可以联想一下天文学这个有着类似特点的学科,如果天文学不会因为无法在实验室中重现宇宙演化历史而被科学拒之门外,那么进化生物学就不该被拒之门外。正如系统发育系统学的创始人亨尼希(Willi Hennig)所说,所有科学都是在不断接近真理。当然,这种对于进化生物学的偏见在今天或许也已成为历史。证伪不再被认为是接受科学的唯一尺度,观察-比较方法和“假设* -演绎”方法(hypothetico-deductive method)也是可行的科学范式。迈尔(1990)认为,科学用问题、怀疑、好奇心和解释问题的努力来面对世界的秘密,这种要理解自然现象原因的努力就是科学的开端,科学思想的正确性由其解释功效(有时还有预测功效)来判断。

进化生物学的另一个特色就是经常需要面对宗教和上帝。或许应该说,虽然没有一个人能够证明上帝不存在,目前也看不到这种证明能够成功的可能性,但是对于人类已知的一切自然现象与实验室观察,均无法在逻辑上推导得出上帝存在的必然性,而这必然性的缺失恰恰是由于他的

* 合格的科学假设需要满足3个条件:不自相矛盾,不与已知事实相矛盾,未被描述为已知事实。

“万能”属性。不过一个有趣的事实是,近现代科学恰恰诞生在宗教势力一度占绝对统治地位的欧洲。这其中的原因之一或许在于,宗教教义同时也为近现代自然科学的早期发展提供了反面答案清单,最黑暗的地方恰恰成为了光明的诞生地。除此之外或许还存在其他重要原因,那就是科学家对于真理的情结带有很强的信仰性,仿佛信徒将上帝视为至高无上与无处不在的绝对存在。虽然真理与上帝无关甚至相斥,科学与宗教信仰也有本质区别(图1),但是科学家与信徒追求各自心目中某种绝对存在的情结却无二致,欧洲文化中或许存在这种情结的土壤。绝对零度、熵增、超导、基本粒子、单磁极等,太多带有简约美的科学理念都诞生和发展在西方,这或许并非偶然。

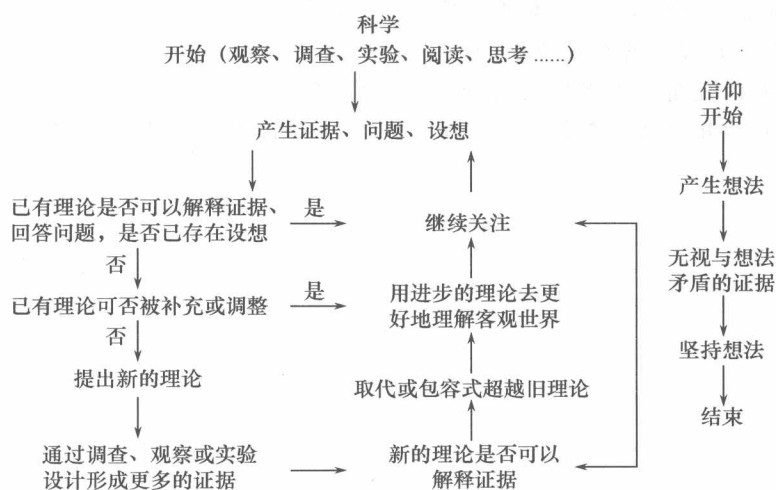


图1 科学与宗教信仰的区别

对于进化生物学的学习而言,还有一个特色,就是在学习过程中需要摹想能力,或者说设想能力,把抽象知识在头脑中具象化的能力。例如,什么是4维时空?让我们先来设想沿圆周运动的1个点,其运动方向只有2个相反方向、其自身视角中的世界是1维的,而跳出该视角则其处于2维圆周中。与之类似地,沿球形表面运动的1个点,其运动方向可以是四面八方的、其自身视角中的世界是2维的,而跳出该视角则其处于3维球面中;爱因斯坦曾以此为类比请人们理解3维空间与4维时空之间的关系。对于进化生物学而言,时间无疑是一个重要概念,因为对进化历史的推断,实际上是根据现在的时间断面上的生命状态去重建生命演化在历史上的状态连续过程。所谓的个体死亡、物种绝灭,其实是在某一个时间点、时间段之后,生物有机体的存在方式改变了,而在那之前的存在历史并未消失,也就是说还活在历史中;在消亡之后,有的留下了化石、有的没有,而那些经历了时间跨度而在形态上改变不大的生命形态则为活化石。

生命现象的起源与进化改变,在最小的时间尺度上是“世代”,在最大的尺度上是大约40亿年;在最小的结构水平是分子,在最大的空间组织层次是生物圈。迈尔说“进化生物学是生命科学中的最高统一理论”,俄裔美国遗传学家杜布赞斯基说“缺少了进化的光辉,生物学中的一切都没有意义”,中国古生物学家、北京大学教授张昉说“缺少进化生物学的生物学学习是只见树木、不见森林的”。对进化生物学的了解能够使不同领域的研究者更好地从历史的、整体的角度看待各个生物有机体类群中不同结构层次上的生命现象,将在生命科学各分支学科中的认识与

发现在进化的视角上融汇,对所处专业领域的知识因多侧面、多角度的看待而得到深化理解并使之更具系统性。

本书力求注重广泛的多学科思想与内容综合,注重思想、理论、方法与具体类群进化历史之间的连接,注重生物系统学在进化生物学中的核心作用,注重推断进化历史过程中不同来源信息之间的整合,注重知识的更新。值得提及的是,在博物学的各个领域(进化生物学、生物地理学、生态学、行为学等),所有伟大的先驱都是业余爱好者——博物学是生物学中最后一个变成专业化的分支。这一方面可能由于进化生物学是一个极为庞杂的学科,其进步有赖于其他学科的先进行进;另一方面可能由于进化-生态这个大领域直接面向人类肉眼尺度的自然界,具有天然的吸引力。由此,虽然众口难调,但是本书仍然一方面力求成为初学者在形成进化生物学知识(概念、技术、思想)框架过程中的有效助力,另一方面也期待为相关领域的专业人士或多或少地提供有价值的信息和新的视角。作者感谢南开大学生命科学学院杜荣骞教授阅读初稿并作有益讨论。鉴于进化生物学知识的庞杂和作者能力的局限,欢迎读者指出错误,交流争议观点。

谢 强 卜文俊
2009 年于南开园

目 录

第一部分 进化生物学理论

第 1 章 进化生物学思想	(3)
1.1 亚里士多德——博物学的萌芽	(4)
1.2 林奈——分类学	(5)
1.3 布丰——博物学、动物地理学	(6)
1.4 拉马克——进化论	(7)
1.5 居维叶——古生物学	(8)
1.6 冯贝尔与海克尔——发育生物学	(9)
1.7 达尔文——进化论	(10)
1.8 华莱士与魏格纳——生物地理学	(13)
1.9 杜布赞斯基——种群遗传学	(15)
1.10 洛伦茨、廷伯根与弗里奇——动物行为学	(16)
1.11 迈尔——系统学、进化生物学	(16)
1.12 亨尼希——系统发育系统学、分支分析学	(17)
1.13 木村资生——中性论与分子进化	(18)
1.14 21 世纪进化生物学的若干发展方向	(18)
要点与问题	(19)
进一步阅读的建议	(20)
参考文献	(20)
第 2 章 不同视角中的生命与生命的细胞前阶段	(21)
2.1 物理学视角中的生命	(22)
2.2 天文学视角中的进化	(25)
2.3 化学视角中的生命	(26)
2.3.1 水	(26)
2.3.2 碳与有机化合物	(27)
2.3.3 磷与 ATP	(28)
2.3.4 金属元素	(28)
2.4 热力学视角中的进化	(28)
2.5 地球生命起源中的生物化学阶段	(30)
2.6 密码子起源	(32)
2.6.1 二联体模型	(32)

2.6.2	与核酶复制协同进化的模型	(34)
2.7	代谢起源	(34)
2.7.1	光合作用	(34)
2.7.2	无氧代谢	(34)
2.7.3	有氧代谢	(35)
2.8	研究早期进化的模拟实验	(35)
	要点与问题	(36)
	进一步阅读的建议	(36)
	参考文献	(36)
第3章	单细胞、病毒与隐生宙生态	(38)
3.1	原核生命:从单界到两界	(38)
3.2	真核细胞内共生起源	(41)
3.3	病毒系统	(42)
3.3.1	病毒分类与系统学	(42)
3.3.2	亚病毒因子	(42)
3.3.3	DNA 病毒、RNA 病毒、逆转录病毒	(43)
3.4	病毒与转座	(44)
3.5	多细胞化	(47)
3.6	隐生阶段生态系统的演化	(47)
	要点与问题	(49)
	进一步阅读的建议	(49)
	参考文献	(49)
第4章	生物系统学的原理与方法	(52)
4.1	分类学与分类	(52)
4.2	系统发育学派(或称分支分类学派)、进化分类学派与数值分类学派	(54)
4.3	分支分析简介	(55)
4.3.1	分支分析的一般过程	(55)
4.3.2	类群的相关基本概念	(56)
4.3.3	性状	(56)
4.3.4	分支树	(57)
4.4	主干种	(61)
4.5	超级树——树的叠加	(63)
4.6	根据系统发育关系建立自然分类的方法	(65)
4.6.1	Wiley 等(1991)提出的3个规则	(65)
4.6.2	Hennig 的同等级别法	(65)
4.6.3	9个约定	(65)
4.7	谱系命名规则	(66)

4.8 生命树(完全树)	(68)
4.9 基于形态信息与基于分子信息的分支分析研究	(69)
要点与问题	(71)
进一步阅读的建议	(72)
参考文献	(72)
第5章 性状、选择与适应	(77)
5.1 性状及其同源	(77)
5.2 自然选择学说	(78)
5.2.1 逻辑结构	(78)
5.2.2 对达尔文进化论的一些误解	(79)
5.3 选择的类型	(80)
5.4 多基因性状	(82)
5.5 适应	(83)
5.6 形态、功能与适应	(85)
5.6.1 温度与湿度的影响	(85)
5.6.2 体型构造的意义	(86)
5.6.3 无用器官在进化上的弱化、消失	(86)
5.6.4 耐受性的进化	(86)
5.7 生态学关系与进化	(87)
5.7.1 捕食-被捕食关系与适应	(87)
5.7.2 寄生(取食)与共生、寄生(取食)与协同进化	(88)
5.8 平行与趋同	(90)
5.9 性选择	(91)
5.10 表观遗传	(92)
要点与问题	(93)
进一步阅读的建议	(93)
参考文献	(93)
第6章 生活史、行为与遗传系统	(96)
6.1 生活史进化	(96)
6.1.1 生活史现象	(96)
6.1.2 生活史中的特点与适合度	(97)
6.1.3 生活史进化中的约束因素	(97)
6.1.4 生活史进化理论	(97)
6.1.5 性选择与雄性生活史	(98)
6.1.6 扩散与进化	(98)
6.2 行为进化	(99)
6.2.1 行为可以被看作一种表型	(99)

6.2.2	行为的适合度	(99)
6.2.3	最适取食理论	(100)
6.2.4	进化稳定策略	(100)
6.2.5	性选择中的行为	(101)
6.2.6	协作与社会性的进化	(102)
6.2.7	行为在进化中的作用	(103)
6.3	遗传系统进化	(104)
6.3.1	突变类型	(104)
6.3.2	有性生殖与重组	(105)
6.3.3	核型	(105)
6.3.4	性别进化	(106)
6.3.5	性比、性分配与性别决定	(107)
6.3.6	同系生殖与远系生殖	(109)
	要点与问题	(110)
	进一步阅读的建议	(110)
	参考文献	(110)
第7章	种群遗传动态	(115)
7.1	种群结构与动态	(115)
7.1.1	种群的大小与年龄结构	(115)
7.1.2	种群中个体的存活率与生命表	(116)
7.1.3	种群增长与种群密度	(117)
7.1.4	种群间的个体迁移	(117)
7.2	种群遗传的基本模型	(118)
7.2.1	哈迪-温伯格平衡	(118)
7.2.2	自然选择	(119)
7.2.3	随机遗传漂变	(120)
7.3	有效种群大小	(122)
7.4	等位基因替换概率、时间、速率	(122)
7.5	遗传多态性	(123)
7.6	种群间的地理变异	(124)
7.7	种群生物学中的分子系统学方法	(125)
7.7.1	取样概述	(125)
7.7.2	随机扩增多态 DNA	(125)
7.7.3	限制性酶切片段长度多态性	(126)
7.7.4	扩增片段长度多态性	(128)
7.7.5	卫星标记	(129)
7.7.6	微阵列	(130)
	要点与问题	(130)

进一步阅读的建议	(131)
参考文献	(131)
第 8 章 进化发育生物学	(134)
8.1 简单的和复杂的多细胞化模式	(135)
8.2 发育模式、 <i>Hox</i> 基因族与复杂器官进化的不可逆定律	(137)
8.2.1 体腔	(137)
8.2.2 体轴与体节	(137)
8.2.3 <i>Hox</i> 基因族、体节特异性表达与身体模式建成	(138)
8.2.4 图式建成中的机制	(140)
8.2.5 复杂器官进化的不可逆定律	(140)
8.2.6 结构演化与新功能	(141)
8.3 变态发育	(142)
8.3.1 杂交起源观点	(142)
8.3.2 有希望的思路	(143)
8.3.3 龄期与龄期依赖性进化	(143)
8.4 免疫系统进化与发育	(144)
8.5 冯贝尔法则	(144)
8.6 个体发育与分支分析	(145)
8.7 个体发育信息在系统发育推断中的应用	(146)
8.8 <i>Hox</i> 基因簇与系统发育研究	(148)
8.9 系统发育对个体发育研究的意义	(151)
要点与问题	(153)
进一步阅读的建议	(153)
参考文献	(153)
第 9 章 分子系统发育	(158)
9.1 基因组进化	(159)
9.1.1 基因组	(159)
9.1.2 亚基因组	(162)
9.1.3 基因组比对	(165)
9.1.4 线粒体基因组	(165)
9.1.5 简评基因组信息在系统发育研究中的应用	(166)
9.2 分子进化研究的理论基础	(167)
9.3 序列选取中的关键问题	(169)
9.4 序列格式及其转换	(170)
9.5 序列比对与校正	(170)
9.5.1 比对在推断分子系统发育过程中的地位	(171)
9.5.2 序列比对的方法及软件	(171)