

Foundations in
Evolutionary
Biology

进化生物学
基础

第4版

李 难 主 编
王正寰 副主编



高等教育出版社

进化生物学基础 (第4版)

主 编 李 难

副主编 王正寰

编 委 (以姓氏笔画为序)

王正寰 李 难 李建粤

洪如林 秦德安

内容简介

本书提供生物进化的基础知识和主流思想, 阐述地球上生命有机界因时而变的原因和机制, 以及介绍若干研究生物进化的科学家传略。全书分 6 部分, 共 19 章。第一部分为引论, 主要介绍学习进化生物学的目的和方法; 第二部分为进化的“舞台”和化石证据, 主要介绍生物的进化和地球环境, 以及化石和地质年代; 第三部分是进化的历程, 主要讲述了地球上生命和细胞的起源、多细胞生物的进化、人类和现代人的起源及其进化, 以及性的起源和性行为进化; 第四部分为分子进化, 主要阐述生物大分子的进化、分子钟、分子树和分子进化工程等; 第五部分讲的是进化的机制和规律, 如遗传变异和自然选择, 随机过程和适应, 隔离、物种形成、大进化和物种灭绝; 第六部分主要介绍研究进化的学说。每一部分都设有“导读”, 向读者说明需要关注的内容。每章后的“专题”, 介绍一些青年学生感兴趣的学说、观点、研究成果以及探索性问题等。本书特设与正文配套的“数字课程”, 其中有丰富的拓展资源, 可供读者自学。

本书繁简得当、条理清楚, 注重进化原理的应用和对现实环境中进化问题的论述, 可作为高等师范院校、综合性大学、农林和医学院校生物专业和非生物专业教学用书, 也可供有关科学工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

进化生物学基础 / 李难主编. — 4 版. — 北京: 高等教育出版社, 2018.4
ISBN 978-7-04-047868-6
I. ①进… II. ①李… III. ①进化论-高等学校-教材 IV. ①Q111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 301868 号

JINHUA SHENGWUXUE JICHU

策划编辑 王莉 高新景
版式设计 锋尚设计

责任编辑 靳然
责任印制 赵义民

封面设计 赵阳

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
印刷 中国农业出版社印刷厂
开本 787mm×960mm 1/16
印张 23
字数 420 千字
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.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 1982 年 9 月第 1 版
2018 年 4 月第 4 版
印 次 2018 年 4 月第 1 次印刷
定 价 42.80 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 47868-00

审图号 GS (2017) 2804 号

数字课程（基础版）

进化生物学 基础

（第4版）

主 编 李 难

副主编 王正寰

登录方法：

1. 电脑访问<http://abook.hep.com.cn/47868>，或手机扫描下方二维码、下载并安装Abook应用。
2. 注册并登录，进入“我的课程”。
3. 输入封底数字课程账号（20位密码，刮开涂层可见），或通过Abook应用扫描封底数字课程账号二维码，完成课程绑定。
4. 点击“进入学习”，开始本数字课程的学习。

课程绑定后一年为数字课程使用有效期。如有使用问题，请发邮件至：

lifescience@pub.hep.cn



重要通知



进化生物学基础（第4版）

围绕《进化生物学基础（第4版）》纸质教材知识体系，立足呈现更多扩展学习资源，反映学科快速发展的趋势和成果，本书配套数字资源涵盖了拓展阅读、参考文献、名词索引等资源。建议教师根据教学需求遴选数字资源用于教学，学生可利用这些资源开拓视野，提升学习效果。

用户名： 密码： 验证码： 9385 忘记密码?

<http://abook.hep.com.cn/47868>

扫描二维码，下载Abook应用



■ 数字课程拓展知识目录

- ① 达尔文关于物种进化思想的由来 / 005
- ② 塞伦盖蒂草原和大型食草动物的协同进化 / 018
- ③ 探索 DNA 结构之谜 / 057
- ④ 生命地外起源之谜 / 068
- ⑤ 海底热液口生态系统 / 070
- ⑥ 前寒武纪的生命形成 / 094
- ⑦ 恐龙进化为鸟类的关键证据 / 106
- ⑧ 走出非洲 / 144
- ⑨ 现代人的适应性进化 / 146
- ⑩ 繁殖的进化稳定策略 / 152
- ⑪ 鸟类进化分类学研究现状概要 / 195
- ⑫ 加拉帕戈斯群岛达尔文地雀的性状替换现象 / 222
- ⑬ 全球气候变暖对北极熊的影响以及相关生态后果 / 242
- ⑭ 鲸类水环境重适应现象的思考 / 272
- ⑮ 中国淡水豚之困 / 283
- ⑯ 米丘林学说及其他 / 292
- ⑰ 达尔文学说和拉马克学说的比较 / 300

■ 序 言 生物进化中光彩夺目的亮点

迈尔说过：“进化是生物学中最重要的概念”“进化论是生物学中最大的统一理论。”进化生物学涵盖了生物学的一切领域，其范围涉及古今中外、天南海北，无所不包。这是一门有一定难度但又极为有趣的学科。为此笔者选择了进化学科中的若干亮点并稍作诠释呈献给读者，以达到由点到面、由局部到整体的观感。但愿对同学们探索进化的秘密有所启发。那么，我们就从“生命”谈起。

生命 生命的重要性可谓尽人皆知。达尔文早在1859年给胡克的信中就谈到了生命的进化问题。地球上生命起源是天体演化的一个阶段，大约38亿年前地球环境就已经变得适合生物存在了。化石证据表明，生命的历史起始于35亿年前。先是化学进化，后是生物学进化。当自然选择驱动的生物学进化开始时，生命之树才不断成长、壮大。地球上的生命是单一起源的，所有生物的遗传密码都一样。生命起源研究有多种成果，如“RNA世界”论的提出，1977年深海海底热液口附近发现的大量生物可能是原始生命的孑遗，这是探索生命起源的一大突破。对此本书将作详细介绍。人类对生命的认知早期是宏观的，现在早已进入到微观层次，然而超微观层面（包括电子、量子）与生命的关系我们还知之甚少。多年来有关地球生命来自地外的猜测时有报道，即便如此，外星球生命起源也还是个谜团，也许是永远无法解开的谜团。

性 从原始藻类中两个同形配子在水中的偶然相遇，到人类男女之间真挚相爱都是对性的描述。关于性的起源早在6亿年前晚元古代的地层中就有化石记录。有性生殖引发了遗传的多样性，提升了进化速率。大多数真核生物都进行有性生殖，早期营有性生殖的是埃迪卡拉动物群中的索虫。当性别第一次出现时，在同群体中产生的是无性生殖与有性生殖的更迭。世代交替在现代的一些原生动物和植物中都普遍存在。性选择或称保证成功繁殖的选择，是自然选择的特殊形式。至于它在多大程度上适合于我们人类，正如科因风趣地说“跟许多动物一样，男性大多更随意，

而女性则更挑剔”，当然这也涉及社会的因素。此外，在漫长的进化岁月中，人类，也只有人类才具备了男女随时都“动情”的性活动能力。关于性起源的机制，很可能与真核细胞的内共生学说相似。

脑 脑无疑是生物进化中最伟大的创造。当然，也有些动物，如海绵，原先有类脑的神经结构，也许因为不需要“用脑”，它们的“脑”随后便消失了。寒武纪晚期的脊椎动物甲胄鱼类与圆口类有共同的祖先。圆口类的脑很小，鱼、两栖动物的脑稍大些。从最初的两栖类进化到人，脑的相对大小增加了100倍，当然脑也不是越大越好。剖析脊椎动物大脑皮质可发现3种皮质都分别对应于不同进化等级的动物，新皮质显然对应哺乳类的脑。从猿脑到人脑的重要区别是人脑具有更高的认知能力。这种认知能力在500万~800万年前即黑猩猩与人类分道扬镳后不久便产生了。迈尔认为，人脑的出现与两项改变至关重要：一是人科动物不再生活在树上，二是作为人类交流基础的系统语言的出现。人脑与猿脑在结构上的差异是什么？人脑的独特性似乎体现在它有更多的神经元（约50种类型），但是我们通过五官收集到的信息集中输入脑后，脑又是怎样工作的我们并不完全了解。有学者认为，脑褶皱对人类的智能以及预防、诊断、治疗神经和心理疾病具有重大意义。

心脏 如果大脑是“司令部”，心脏可比喻为“发动机”，它是循环系统中血液在血管中流动的动力源泉。环节动物没有真正的心脏，它的“心脏”就是膨大的血管。作为脊索动物的文昌鱼有一段能强有力搏动的大动脉，驱使血液循环。这段动脉是心脏的雏形，可称为“广义的心脏”。我国出土的5.3亿年前的化石华夏鳗与现代文昌鱼十分相像。脊椎动物的循环系统分为心脏和血管两大部分，形成一个相对封闭的管道系统。血液在其中按一定方向循环流动。脊椎动物心脏进化也是生物演化中器官专业化、完善化的一个实例。如：鱼类有二室心脏，两栖类、爬行类的心脏逐渐按复杂程度提升，直至鸟类与哺乳类，已出现四室心脏，心房和心室都被完全的隔膜分为左右两半。对此，书中有附图说明。

眼 眼是视觉器官。灵长类动物约80%的信息来自视觉。古地球上早期的有眼动物叫作莱德利基三叶虫，该虫的面线上有一双眼，它的化石多见于我国云南等地早寒武世的地层中。眼的结构十分精致，“智能设计”者们往往拿它来说事。其实，眼在动物区系中至少经历过40次独立进化，调节动物眼发育的基因（*pax-6*）也早已被发现。眼的进化过程为感光点周围色素的沉积，色素的加厚致使晶状体、动眼肌及其他一些附属结构产生，最重要的是类似视网膜的感光神经组织的发育。在一些现生动物中，仍可找到从感光点到头足动物、昆虫和脊椎动物的眼的进化阶段。动物进化出适合其生存环境的各种眼，用于发现猎物或躲避威胁，如野兔、猢狲、跳蛛、变色龙和海雕，等等。人的视觉更具特色，有时一个眼神往往饱含深情，反映出某种心理状态，尤其与语言相结合更显生动、多彩。在日光移动中，眼白也是一大亮点，女性的眼白相对于男性要大，这可能与人类远祖两性间劳动分工和生活情趣有关。

恒温机制 恒温和变温都是动物对外界环境的一种适应。在上升进化的阶梯上，居于高位的显然是以多数鸟类和哺乳类为代表的恒温动物，它们不到动物总数的1%。早期哺乳动物的祖先二齿兽和尖齿兽可能是在距今2亿年的三叠纪进化为恒温动物的。一些恒温动物在一天中要吃掉比同等大小变温动物（如爬行类）多得多（可能是其一个月的食量）的食物。比较合理的解释是：就如保持温暖要不间断地使用炉灶一样，必须要有足够的营养补给才能达到“收支平衡”。化石显示，鸟类的祖先进化为恒温动物大约在1.4亿年前的白垩纪，那时含氮量高的被子植物开始占主导地位，因为被子植物有发达的根系，能更多更快地从土壤中吸取含氮化合物。而氮是组成生物体的基本元素。与此同时，大气中的二氧化碳的水平下降。保持体温的必要条件还涉及线粒体和磷元素在体内的平衡等诸多问题，需要在进化中同时解决。有人认为，恒温动物是由食草动物演化来的，这一论断尚待证实。

意识 机体在适应性活动中，由发达的中枢神经系统产生了主观性，也就是自我意识。形成中的人如何随着生存的需要而打造概念方式的自我意识，这是困扰我们的一大难题。“意识”不

全是生物学用语，有学者认为，借助于量子力学也许更有助于我们了解意识。对于非人动物，我们无法用语言与它们交流来了解其是否具有意识，我们只能通过它们的行为作出判断。1岁左右的婴儿就能认出镜子中的自己，尼安德特人已有埋葬死者的习俗（也许这是最早的宗教迹象），但这类行为在非人动物中基本不存在。动物只有感应意识，或对个别实际效益及其条件的意识。如它们会结伴过群居生活，能感受到同伴、主人的某些处境（如象、犬）。1976年中国唐山大地震，多次出现家犬凭借这种感应意识救出自家主人的报道。有学者认为，有些高等动物（如黑猩猩、某种疣猴）也有原始性的自我意识。

光合作用 原始的蓝细菌（含叶绿素a）只具有光系统Ⅰ，它不能分解水分子、释放氧气。大约在前寒武纪，当蓝细菌增添了光系统Ⅱ时，便能进行释氧的光合作用。有专家称，蓝细菌的两套光系统是在叶绿素的基因增加1倍时才形成的。在阳光下，两套光系统同时发挥作用，于是水发生光解释放O₂，而在暗处光合作用无法进行。早期地球上自由氧极少。当大气中自由氧的含量大体上达到一定规模时，大量生物才可能产生出来，这被视为是寒武纪大爆发形成的原因之一。此外，大气中随着氧浓度的不断积累，在志留纪中晚期到泥盆纪的早期形成高空臭氧层，阻止了太阳光中的紫外线对地球的强烈辐射，我们的星球从此生机勃勃、万象更新。

基因密码 基因密码以核苷酸三联体的形式存在于DNA分子中。1953年，DNA双螺旋结构模型的确立开创了分子生物学、基因密码研究的新局面。2000年人类基因组草图的提前完成是继双螺旋结构模型发现后的又一个重大突破。现今已进入到后基因组时代。目前研究认为地球上最早的遗传物质应当是RNA，之后通过逆转录才产生DNA。RNA既有遗传功能又有酶的催化作用，成功地解决了早期科学史上关于“鸡生蛋，还是蛋生鸡”的悖论。但是，最初的RNA从何而来？1977年深海海底热液口的重要发现表明，那里具备最初核苷酸形成的必需条件，而核苷酸又是构成RNA的结构元件。基因突变是推动生物进化的关键因素，但对生物体本身，在多数情况下可能是有害的。例如，由于一个低密度

脂蛋白基因缺少了外显子5，便会造成高胆固醇，其缺失是由于两个基因拷贝之间出现不等交换所致。在自然选择的过程中，塑造了大量最佳状态的基因，但随着世代环境变迁等因素，生物的需求也随之更新，而基因的变革又相对保守，原先稳定的基因可能反倒带来新的麻烦。例如，早期人类狩猎时代保留下来的促进多食肉类的基因，有可能诱发现代人体的超重和肥胖，进而增加了2型糖尿病、高血压等疾病的发病风险，这可能是诸多慢性疾病产生的根源。

死亡 人们面对死亡，难免心生恐惧，但无论是个体还是物种，从进化的意义上理解，正常死亡都是一种保护性的结局。试想如果只有出生没有死亡，势必会天下大乱。当然，从每个人的自身考量，最好健康地活到人类个体的极限寿命，约120岁。这个数字是依据多种因素推测出来的，还在不断调整。美国古生物学家辛普森（1952）曾推测，一个物种从起源到灭绝平均经历约275万年，人类物种极限寿命的陨灭离现在还很遥远。生物致死的根源不会消失，与之对抗的基因也相应存在。尽管医学在不断进步，但至今还难以回答许多致死的原因，包括毒素、污染、压力等，绝大多数疾病依然无法根治。历史上曾出现5次生物大灭绝，其中最严重的一次（二叠纪末期）估计毁灭了地球上96%的物种。如今，由于人为破坏、气候异常等原因，物种灭绝的速度是人类出现前的1 000倍，有专家分析，这次事件的危害程度不亚于地球历史上最严重的一次，第六次物种大灭绝正在向我们逼近或已经开始，这不得不引起人类的高度关注，我们应采取各种措施，竭力减缓灭绝速度。当然，从长远来看，离别地球、进军太空也不失为一种明智的选择。有关灭绝问题详见本书论述。所谓“灵魂不死”的信条，尽管有助于缓解人们对死亡的焦虑，但终究不是科学。

纵贯上述这些亮点，不难发现进化的思想和进化的事实始终挺然屹立。在进化观念日益深入人心的大背景下，罗马教廷（约翰·保罗二世，1992）居然也犹如为哥白尼的支持者伽利略彻底平反那样不得不改变对达尔文主义的否定态度（舒德干，2006）。即便如此，我们也不能不看到“任何有关进化生物学的书籍都必

然是协作的产物，涉及各个领域，例如，古生物学、分子生物学、种群生物学，以及生物地理学等，没有一个人可以掌握所有这些知识”（科因，2009）。学海无涯，扣人心弦。我们应以此为契机去学习进化生物学这门课程，这必将对科学素养的提升以及科学思想的锻炼大有裨益。

李 难

2017年7月

■ 前 言 (第4版)

编者曾在高等教育出版社先后出版过《生物进化论》(1982年)、《进化论教程》(1990年)、《进化生物学基础》(2005年)3种教材,这类教材在定位、编写宗旨、编写风格,编者团队以及出版单位等方面基本一致。为理顺本书的历史,使本书得以更好地传承下去,出版社与作者团队经过协商,一致同意将本版定为“第4版”,特此说明。

本次修订沿承了教材一贯的写作风格,秉承简明、系统和可读性强等特色,从课程教学和学生认知角度出发,确定教材内容的深度和广度。本书持续优化教材体系和内容,适当引入学科进展,开卷不是推出冗长的历史和多种学派,而是以事实为例逐步上升到规律,再作理性分析,然后再介绍多个主要学派及有关学者,从而体现从实践到认识、从具体到抽象、由表及里、由近及远的编写原则。

本次修订的另一项重要工作是编写与纸质教材配套的“数字课程”(http://abook.hep.com.cn/47868),其内容涵盖生命起源、进化思想与理论、进化研究方法及与现实结合的进化生物学研究案例等拓展阅读材料,进一步增强教材的知识容量,提升教材的教学适用性,提高学生学习兴趣,鼓励学生自主学习。关于正文中“导读”“专题”等内容的侧重点和相互关系详见第3版前言。此外“分子进化”被提升为一个独立的“部分”,内容上也作了适当扩充。

本书由李难教授主编;王正寰博士为副主编,负责编写数字课程;秦德安教授编写第四部分“分子进化”;洪如林教授编写“多细胞植物的进化”一节;李建粤教授编写“遗传密码的起源与进化”一节。

本书编写期间,承蒙以下同仁的帮助和指教。他们是翁恩琪教授,黄祥辉教授、潘华勤博士(美国)、崔极谦老师,以及高等教育出版社朱秀丽编审、王莉副编审和高新景、靳然等编辑,尤其是王莉副编审在百忙中为初稿提出了宝贵的意见和建议,在此一并特表谢忱。

由于编者水平和能力有限,本书难免有不当或错漏之处,敬请广大师生、同行和读者批评、指正。

编 者

2017年9月于上海

■ 前 言 (第3版)

本书是在编者编著的《进化论教程》多年教学实践基础上完成的。编写中吸收首都师范大学、上海师范大学、华东师范大学等院校的教学经验和建议,收集国内外最新研究成果,并尽力从科学性、先进性、系统性和可读性方面努力,在表述上也力争深入浅出、通俗易懂。

1. 在内容选择上,按删繁就简、吐故纳新的原则,删改了一些冗长、陈旧、过时、似是而非的内容。在参考国外同类新版教材的同时,充分考虑我国高等学校教学的实际情况和青年学生的认知特点。

2. 书中适当增加了进化原理的应用和对现实环境中进化问题的论述,有利于提高学生的责任感和增强本学科的活力。

3. 每部分前的“导读”向读者说明需要关注的事例,如要点、重点、难点及前后部分的联系。每章后的“专题”着重介绍生物进化研究中的新学说、理念、方法、研究成果以及某些探索性或热点问题,以利开阔学生视野、激发学习热情。

4. 选修本课程的学生学科知识面较广,如社会科学和哲学类的同学也有兴趣。为此,建议非生物类的学生选读时,可从实际出发,免去有关章节。

本书部分章节特邀下列人员撰写:华东师范大学秦德安教授编写“分子进化”一章,洪如林教授编写“植物进化”一节;上海师范大学李建粤副教授编写“遗传密码的起源与进化”一节;华东师范大学朱红英副研究员负责收集有关资料。编写期间承蒙中科院张弥曼院士、北京师范大学彭奕欣教授、首都师范大学张飞雄教授、华东师范大学翁恩琪教授的支持和指教,谨此致谢。

编 者

2004年8月于上海

■ 目 录

第一部分





引论

导 读	002
1 如何学习进化生物学	003
1.1 生物进化与进化生物学	003
1.1.1 生物进化	003
1.1.2 进化生物学	004
1.2 进化学科的历史进程	005
1.3 学习进化生物学的目的和方法	006
1.3.1 学习目的	006
1.3.2 学习方法	008
专题1 ▷ 生物进化离我们并不遥远	008
🧠 思考题	010

第二部分

进化的“舞台”与化石证据



导 读	012
2 生物进化与地球环境	013
2.1 生态位与食物链	013
2.1.1 生态位	013
2.1.2 食物链	014
2.2 生态系统的进化	015
2.2.1 生态系统的概念	015
2.2.2 生态系统进化的基础：生态演替	017
2.2.3 生态系统进化的过程	018


2.2.4	生物圈	018
2.2.5	盖娅假说	020
2.2.6	智能圈	020
2.3	海陆变动与生物地理区系分布	021
2.3.1	大陆漂移说与板块构造理论	021
2.3.2	生物地理区系分布	022
2.3.3	区系动物类群发生中心	029
	专题2 地球可供人类消费的底线与环境伦理观	031
	思考题	033
3	化石与地质年代	034
3.1	化石	034
3.1.1	化石的概念	034
3.1.2	化石的形成	034
3.1.3	化石的分类与假化石	036
3.2	地质年代	039
3.2.1	地质年代的概念	039
3.2.2	地质年代的测定	039
3.3	古生物学与生物进化	040
3.3.1	地质年代中生物的系统进化	041
3.3.2	种系进化实例：马和单弓类	043
	专题3 化石识别生物进化应遵循的原则	047
	思考题	048

第三部分

进化的历程

导 读	050	
4	地球上生命的起源	051
4.1	生命起源与宇宙演化	051
4.2	生命起源的若干条件	052
4.2.1	原始大气	052

4.2.2	能源	052
4.2.3	原始海洋	053
4.3	生命起源的早期探索	054
4.3.1	米勒-尤里的模拟实验	054
4.3.2	奥巴林-霍尔丹假说	055
4.3.3	福克斯的类蛋白微球体学说	056
4.4	现代生命起源研究	056
4.4.1	“RNA 世界”论	056
4.4.2	磷酸化氨基酸起源说	058
4.5	遗传密码的起源与进化	060
4.5.1	遗传密码起源的假说	060
4.5.2	遗传密码起源的阶段	061
4.5.3	遗传密码进化的方向	063
4.5.4	遗传密码数量演变的过程	064
4.6	生命起源研究中的其他问题	067
4.6.1	生命起源的地点	067
4.6.2	地球外是否存在生命	067
	专题 4 ◊ 深海海底“黑烟囱”与生命起源	068
	 思考题	070
5	细胞的起源	071
5.1	原核细胞与真核细胞	071
5.2	原始细胞膜结构模型	072
5.3	细胞起源与演化过程	073
5.3.1	从原始细胞到原核细胞	073
5.3.2	从原核细胞到真核细胞	073
5.3.3	生物界最基本的三大类群	074
5.4	真核细胞起源的内共生学说	076
5.5	细胞核起源的研究途径	078
5.6	真核细胞起源的生物学意义	079
	专题 5 ◊ 病毒起源的主要学说及其与人类进化的关系	080
	 思考题	082

6 多细胞生物的进化	083
6.1 生命之树与生物分界	083
6.1.1 生命之树	083
6.1.2 生物分界的学说	084
6.2 多细胞植物的进化	085
6.2.1 藻类植物	085
6.2.2 蕨类植物	087
6.2.3 裸子植物	089
6.2.4 被子植物	092
6.3 无脊椎动物的进化	093
6.3.1 无壳无脊椎动物	093
6.3.2 有壳无脊椎动物	094
6.4 脊椎动物的进化	096
6.4.1 早期的脊索动物	096
6.4.2 鱼类	098
6.4.3 两栖类	100
6.4.4 爬行类	101
6.4.5 鸟类	104
6.4.6 哺乳类	107
专题6 澄江动物群向世界展示了什么 ——兼谈寒武纪大爆发的成因问题	110
 思考题	112
7 人类的起源与进化	113
7.1 人类起源研究的历史回顾	113
7.2 人类在自然界中的位置	113
7.3 人类起源过程中新旧特征的更替	115
7.3.1 直立行走与前肢的解放	115
7.3.2 工具的制造与火的使用	116
7.3.3 脑的发达与幼态持续原理	116
7.3.4 食性与繁殖的进步	117
7.3.5 体毛的退化	118
7.3.6 群体关系的改善	119