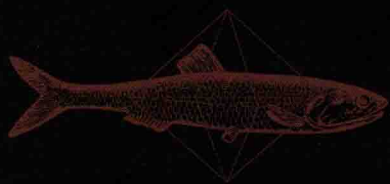


THE RISE OF FISHES: 500 MILLION YEARS OF EVOLUTION



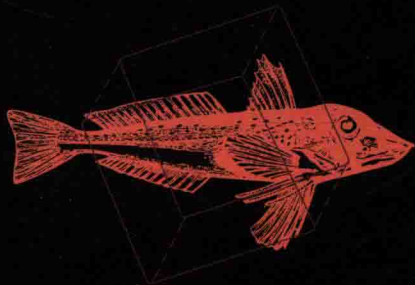
鱼类的崛起

5亿年的进化

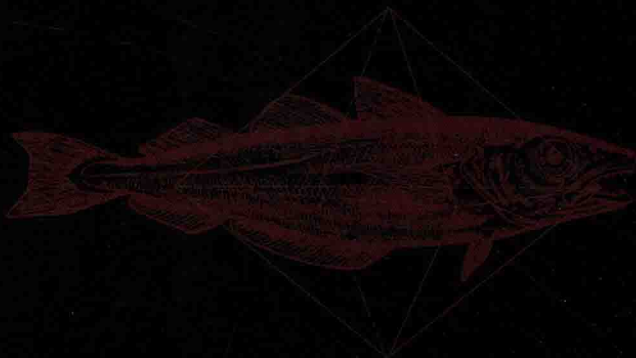
[澳] 约翰·A.朗 (John A. Long) 著

吴奕俊 郭恩华 译

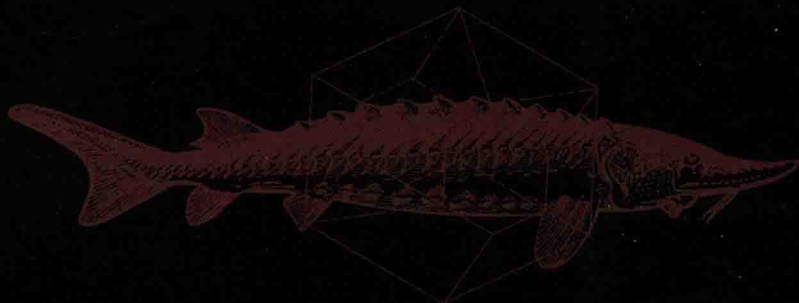
THE



RISE



了解鱼类的历史，也就是了解人类自身的起源
与科学家一起，在化石中探寻远古的岁月、进化的痕迹以及生命的传奇



OF FISHES

 中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



鱼类的崛起

5 亿年的进化

The Rise of Fishes: 500 Million Years of Evolution

[澳] 约翰·A·朗 (John A. Long) 著

吴奕俊 郭恩华 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

THE RISE of FISHES: 500 MILLION YEARS of EVOLUTION, SECOND EDITION by JOHN A. LONG

Original English language edition Copyright © 2011 Johns Hopkins University Press

All rights reserved. Published by arrangement with Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland

Simplified Chinese edition Copyright © 2018 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

本书中文简体字版授予电子工业出版社独家出版发行。未经书面许可，不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何内容。

版权贸易合同登记号 图字：01-2018-2400

图书在版编目(CIP)数据

鱼类的崛起：5亿年的进化/（澳）约翰·A.朗（John A. Long）著；吴奕俊，郭恩华译。—北京：电子工业出版社，2019.1

书名原文：The Rise of Fishes: 500 Million Years of Evolution

ISBN 978-7-121-35170-9

I. ①鱼… II. ①约… ②吴… ③郭… III. ①鱼类—进化—普及读物

IV. ①Q959.4-49

中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第227781号

书 名：鱼类的崛起：5亿年的进化

作 者：[澳]约翰·A.朗（John A. Long）

策划编辑：龙凤鸣

责任编辑：郑志宁 特约编辑：兰 茵

印 刷：湖北画中画印刷有限公司

装 订：湖北画中画印刷有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱

开 本：787×1092 1/16 印张：18.75

版 次：2019年1月第1版

印 次：2019年1月第1次印刷

定 价：98.00元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888, 88258888。

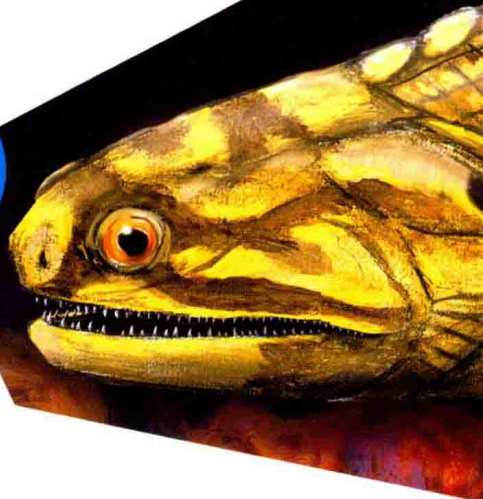
质量投诉请发邮件至zlbs@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：(010) 88254210, influence@phei.com.cn, 微信号：yingxianglibook。

鱼类的崛起







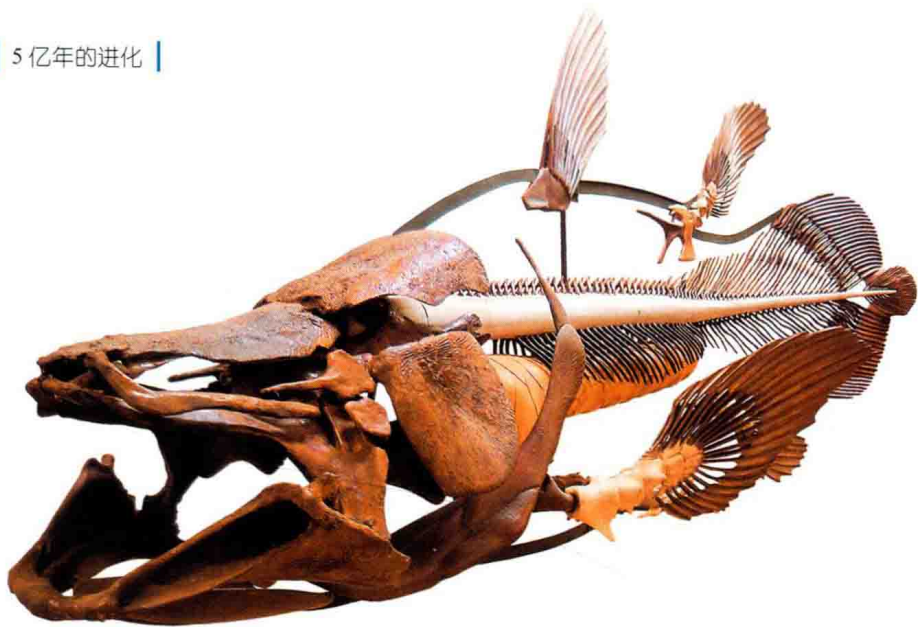
脊椎动物的进化树十分零散。人们从19世纪开始拼凑这棵大树，他们首先理清了现存物种的进化关系，后来则往这棵树中塞进了越来越多已经灭绝、形成了化石的物种。与软体动物或其他无脊椎动物相比，脊椎动物的化石相对较少，但是它们的骨骼较为复杂，人们很容易就能拿它们与活体动物相比较，因此便能解释清化石和现存动物在解剖关系、进化转变或适应环境方面的关系。另外，随着时间的推移，大多数脊椎动物间的进化关系会与它们的化石记录十分契合，颌类脊椎动物尤其如此。

约翰·朗（John Long）的新版《鱼类的崛起》（*The Rise of Fishes*）一书向我们展示了丰富的信息和令人赞叹的插图。此书介绍了脊椎动物的一部分系统发生^①，人们曾对其一无所知。他所介绍的这段系统发生始于脊索动物门下脊椎动物的出现，终于四足脊椎动物或四足动物的兴起。在20世纪期间，在解释早期脊椎动物的结构和关系时，人们获得的最新进展不仅来自对全球各地化石遗址的勘探，也来自新的化石制备技术和观察技术。瑞典古生物学家埃里克·斯滕舍（Erik Stensiö）是公认的现代化鱼类化石研究法之父。在他看来，不应再把鱼类化石看作供收藏用的美丽标本，而是该对它们

进行制备，将它们“解剖”，甚至像生物学家处理现存生物标本那样将它们切片。他因为使用了这种破坏性技术而遭到谴责，但这些技术提供了首个比较框架，我们现有的早期鱼类解剖知识就是以这个框架为基础的。幸运的地方在于，约翰·朗使用到了新型的计算机断层扫描技术。该技术现在能让人观察形成于数百万年前的这类化石上最轻微的解剖特征，而又不会破坏它们；有时还能发现形成化石时严重矿化的软组织的存在证据，这十分宝贵。

在20世纪50年代，德国昆虫学家威利·亨尼希（Willi Hennig）以客观而可靠的方式创造出了阐明物种间关系的新概念和新方法。他的这一观点受到了美国和英国鱼类专家加雷思·纳尔逊（Gareth Nelson）和科林·帕特森（Colin Patterson）的影响，现在被称为“分支系统学”，并被比较生物学家广泛使用，在20世纪60年代被迅速应用于活体和化石鱼类的系统学领域。《鱼类的崛起》一书遵循这个概念框架铺开。在过去的50年里，这个概念框架帮助塑造了脊椎动物树的结构，并且让我们很容易凸显出因数据缺失或自相矛盾而尚未弄清的物种关系，在此书中则会凸显颌类脊椎动物的关系。许多鱼类专家对分类时遵守的分支系统学原则并不熟悉，这种

① 在地球历史发展过程中生物种系的发生和发展。——译者注



分类原则强调给嵌套的单源及未排序群体赋予独特的名称，约翰·朗准确地提出了对活体和化石鱼类的简化分类，与人们广泛使用的乔·纳尔逊《世界鱼类》（*Fishes of the World*）一书中的分类一致。

《鱼类的崛起》与早期脊椎动物在时间和空间上，以及在不断变化的地理环境中的演变完美地融合到了一起。毫无疑问，此书能激发学生们的学习脊椎动物历史的热情，而这段历史仍然深邃难懂，有待人们进一步探寻。

菲利普·让维耶（Philippe Janvier）
法国国家自然历史博物馆，巴黎



第二版
前言
Foreword



大约在30年前，我还是一个年轻的新入门研究生，正尝试撰写一篇关于泥盆纪条鳍鱼的论文。此时我有幸遇到了三位研究化石鱼类、德高望重的专家：布莱恩·加迪纳（Brian Gardiner），彼得·弗雷（Peter Forey）和科林·帕特森。我们在克兰伯里阿姆斯酒店喝了些淡啤酒，进行了热烈的讨论。这座酒店离自然历史博物馆不远，那里是著名的古生物知识殿堂。我总是会回想起布莱恩告诉我的那些不朽话语，他说的是为什么动物学的学生都应该花些时间来研究化石鱼类。我不记得确切的话，但他的建议差不多是这样的：“一旦你了解了鱼类骨骼的复杂性，并且了解到了鱼类进化方式的话，那学起其他脊椎动物的解剖结构时，就十分轻松了！”从那时起我一直认为，自鱼类离开水面，变身为早期四足动物，入侵了陆地的那一瞬间起，其他脊椎动物的进化就只是在对现有的一套身体结构进行微调罢了，从两栖动物一直到哺乳动物，莫不遵守这一规律。

今天，我的很多同事可能会不同意这个观点，或者认为这个观点过于简单，但脊椎动物进化史上的大部分重要环节也的确发生在鱼类身上。鱼类在大约5亿年前出现，当时它们还是“声名显赫的游泳蠕虫”。此后，鱼类成了骨骼的起源，发育出了颌骨和牙齿，拥有复杂的骨骼结构，用它来保护大脑，并且还长出了强而有力的肌肉，能让鱼在水中稳定姿态，更好地游动。鱼类进化

出了世上第一种强健的四肢、先进的感官系统、内耳骨骼，甚至进化出了交配繁殖的方法。鱼类也是这个世界上首批拥有多室心脏、复杂的大脑、肺部以及呼吸空气能力的动物。在它们的进化过程中，有许多这样的重要阶段，这些阶段都在1995年出版的本书第一版中得到了展现。而到了今天，这些进化情景中的大多数仍然成立。

然而，《鱼类的崛起》第一版距今已有15年。在这15年期间，人们撰写了许多关于化石鱼类早期进化和分化情况的宝贵著作，而且在硬骨鱼（teleosteans）这一最成功鱼类的系统分类学和进化生物学方面也取得了重大进展。这些新发现中最重要的成果如下：在中国发现的首批鱼类的化石，这些化石鱼类历史最为悠久[海口鱼（*Haikouichthys*），丰娇昆明鱼（*Myllokungmingia*）]。通过对骨甲鱼（osteostracan）、盔甲鱼（galeaspids）、花鳞鱼（thelodonts）和缺甲鱼（anaspids）所进行的最新研究，及对许多早期无颌鱼所产生的更深入了解，人们第一次发现了生活于早期泥盆纪，接近完整的原始鲨鱼化石，它与其他原始的颌鱼之间形成了衔接，这些鱼类包括棘鱼（acanthodians）和盾皮鱼（*Podmacanthus*, *Doliodus*）。人们发现了早期鲨鱼（*Pucapumpella* 鲨）的完整头盖骨，同时对许多新发现的早期鲨鱼（*Akmonistion*, *Thrinacoides*）进行了极佳的描绘，如对

许多新奇的早期鲨鱼 (*Akmonistion*, *Thrinacoides*) 的精彩描述, 盾皮鱼的胚胎和母体喂食结构如艾登堡鱼母 (*Materpiscis*), 以及对一些节甲鱼雌雄二形特征的探明, 如槽甲鱼 (*Incisoscutum*)。在中国发现了志留系 [鬼鱼 (*Guiyu*), 斑鳞鱼 (*Psarolepis*)] 时期近乎完整的早期骨鱼 (*osteichthyans*) 化石; 拥有完整大脑, 十分美丽的硬骨鱼 (*Ligulalepis*) 三维骨骼化石; 新鳍鱼类 (*neopterygians*) 的早期起源 (*Discoserra*); 为肉鳍鱼 [*Psarolepis*, *Achoania*, 蝶柱鱼 (*Styloichthys*)] 和四足状鱼类 [肯氏鱼 (*Kenichthys*), *Goolongia*] 早期放射状分布中的关键阶段提供数据的化石, 以及为鱼类无缝过渡到早期四足动物 [潘氏鱼 (*Panderichthys*), 提塔利克鱼 (*Tiktaalik*), *Ventastega*] 的阶段提供证据的新关键发现。还有人们在波兰发现的四足动物陆上行走轨迹, 它们形成于泥盆纪中期, 改变了我们对鱼类和两栖动物之间进化分裂的看法。此外, 我们还发现了有关世界上最成功鱼类 (硬骨鱼) 起源方面的新资料, 甚至还发现了一些关键的联系, 显示出了比目鱼 (*flatfishes*) 在进化过程中的中间阶段。这个问题曾让达尔文感到困惑, 但现在, 来自原始比目鱼 (*Heteronectes*) 的新的化石证据已经解决了这个问题。

这些只不过是人们在过去15年中发现的许多优秀化石鱼类中的一小部分。这些化石让进化生物学变得充满活力。更重要的是, 这些发现使得研究它们的科学家能够制定更紧密的系统发生框架, 并且能作出假设, 认为现在的生物间关系是稳健的, 经受住了时间的考验, 当他们再把什么新发现嵌入到这些关系中时, 也只需要进行一下微调。这也向各位提示着一点: 我们在更重要的生物分类方面也取得了进展, 并且也能将生物地理模式放到过去, 接受地球上曾经发生的地质事件的考验, 如大规模灭绝事件, 主要板块的构造运动和全球气候变化, 这些地质事件影响到了地球上的生命。

我们在过去10年中获得的, 与鱼类早期进化有关的知识, 已经引起了更多科学界人士的兴趣。声名显赫的

《自然》 (*Nature*) 杂志上刊登了大量早期鱼类方面的论文, 这正好证明了这一点。在这份杂志中, 有很多论文对新发现的志留系和泥盆纪鱼类给进化假说造成的影响进行了分析。这些论文几乎与关于恐龙或哺乳动物的新论文数量一样多。许多新的化石发现, 也使我们能够更精确地调整主要进化事件的分子钟分化时间^①。其他一些研究则说明, 在现存鱼类中观察到的同源基因表达, 可能是主要进化事件的驱动因素。虽然在过去15年左右人们对鱼类过渡到四足动物的进程给予了很大的关注, 但目前脊椎动物史上最大的未解之谜, 则似乎是颌骨的起源。我们手上没有多少显示无颌鱼类和第一种有颌鱼类之间任何中间阶段的标本, 所以, 我们会热切期盼着在未来获得任何发现, 让我们更好地了解这一伟大的进化步骤。

考虑到这一点, 我试图彻底修订本书, 把这些新的发现加入进来, 并且把这些新发现中最重要的图片囊括进来。我打算让本书跟上一版差不多通俗易懂, 不会去进行过于详细的科学讨论, 免得让人困惑不解。这本书对鱼类的起源和早期演变提供了一种相对简单的科学概述, 但读者如果想全面地了解某些发现及其影响的话, 可以进一步阅读本书列举的详细参考书目。本书的进化分支图代表了目前主要鱼类群体的关系, 但读者必须谨慎看待这些分支图, 因为新的发现可能会改变某些物种的位置。

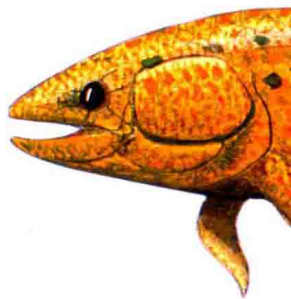
本书通过阐明脊椎动物史上最重要的一些环节, 来赞颂科学发现之乐、进化的复杂和美丽之处, 以及古代鱼类对世界之重大贡献。有些人喜欢收集化石鱼类, 将这些非凡的化石当作具有内在美的事物, 惊叹它们的美; 而其他许多人则会研究化石鱼, 以解开它们的以及我们的进化奥秘。不管你会怎样对待鱼类化石, 我仍希望本书的这一新版本, 能继续激发人们对早期脊椎动物进化性质的好奇和赞叹, 并且鼓励新一代古生物学家, 让他们的眼界不仅限于自己专门研究的陆生脊椎动物上。

约翰·A·朗 (John A. Long)

^① 指的是利用分子数据来确定物种分化时间的方法。——译者注

致谢

Glossary



这本书得益于我许多同事多年来提供的，与本书材料相关的重要对话和讨论；也得益于他们对各章节草稿的检查，以及为本书提供的图片和艺术作品。我衷心感谢以下朋友：堪培拉澳大利亚国立大学的加文·杨（Gavin Young），肯·坎贝尔（Ken Campbell），理查·巴维克（Richard Barwick），亚历克斯·里奇（Alex Ritchie），卡罗莱·伯罗（Carole Burrow）（布里斯班，昆士兰博物馆），苏珊·特纳（Susan Turner）（布里斯班），菲利普·让维耶和丹尼尔·古杰（Daniel Goujet）（法国国家自然历史博物馆），朱敏和张弥漫（中国科学院古脊椎动物与古人类研究所，北京），约翰·梅西（John Maisey）（美国自然历史博物馆），马克·威尔逊（Mark Wilson）（加拿大艾伯塔省埃尔伯特大学），格洛丽亚·阿拉蒂亚（Gloria Arratia）和汉斯-彼得·舒尔策（Hans-Peter Schultze）（堪萨斯大学，劳伦斯市），迈克尔·科亚特斯（Michael Coates）（芝加哥大学），奥利弗·汉佩（Oliver Hampe）（柏林自然历史博物馆），佩尔·阿尔伯格（Per Ahlberg）（瑞典乌普萨拉大学），泽莉娜·约翰松（Zerina Johanson）（伦敦自然博物馆），布莱恩·朱（Brian Choo）（维多利亚博物馆），罗伯特·桑瑟姆（Robert Sansom）（莱斯特大学），莫亚·M.史密斯（Moya M. Smith）（伦敦盖

斯医院），珍妮·克拉克（Jenny Clack）和肯尼思·麦克纳马拉（Kenneth McNamara）（两人都来自剑桥大学）。我感谢我曾经的和现在的博士生，他们包括凯瑟琳·特里安基斯蒂奇（Katherine Trianjstic）（科廷大学，珀斯），布莱恩·朱，蒂姆·霍兰德（Tim Holland），以及爱丽丝·克莱门特（Alice Clement）。还有我的同事大卫·皮克林（David Pickering），托马斯·里奇（Thomas Rich）（他们都在维多利亚博物馆）和帕特里夏·维克斯-里奇（Patricia Vickers-Rich）（莫纳什大学），感谢他们在本书写作期间进行的热烈讨论和支持。

我衷心感谢以下为本书提供图片和艺术作品的人（上文所列者不再重复）：蒂姆·森登（Tim Senden）（堪培拉，澳大利亚国立大学）彼得·斯考滕（Peter Schouten）（新南威尔士州，马利市），彼得·特拉斯勒（Peter Tru-sler）（维多利亚州，林格伍德市），奥列格·列别德夫（Oleg Lebedev）（古生物学院，莫斯科），约翰·迈赛（John Maisey），泰德·达斯勒（Ted Daeschler）（费城科学院），安娜·帕加诺尼（Anna Paganoni）（贝加莫自然科学博物馆），艾琳·格罗根（Eileen Grogan），理查德·伦德（Richard Lund）（卡内基博物馆），菲欧娜·弗格森（Fiona Ferguson）（鱼类年代博物馆，卡南德拉）；伊瓦斯·祖宾斯（Ivars Zupins），埃尔维克斯·

鲁克塞维奇 (Erviks Luksevic) (两人都来自拉脱维亚里加的自然历史博物馆), 克雷·布莱斯 (Clay Bryce) (珀斯, 西澳大利亚博物馆), 鲁迪·库伊特尔 (Rudy Kuiter), 约翰·布罗姆菲尔德 (John Broomfeld) (两人都来自墨尔本的维多利亚博物馆), 马丁·布拉佐 (Martin Brazeau) (柏林自然博物馆), 马特·弗里德曼 (David Friedman) (英国牛津大学), 大卫·沃德 (David Ward) (英国奥尔平顿), 米海尔·金特 (Michal Ginter) (华沙大学) 和皮奥特·斯泽雷克 (Piotr Szrek) (华沙大学) 以及数本美孝 (Yoshitaka Yabumoto) (北九州自然史与人类历史博物馆)。

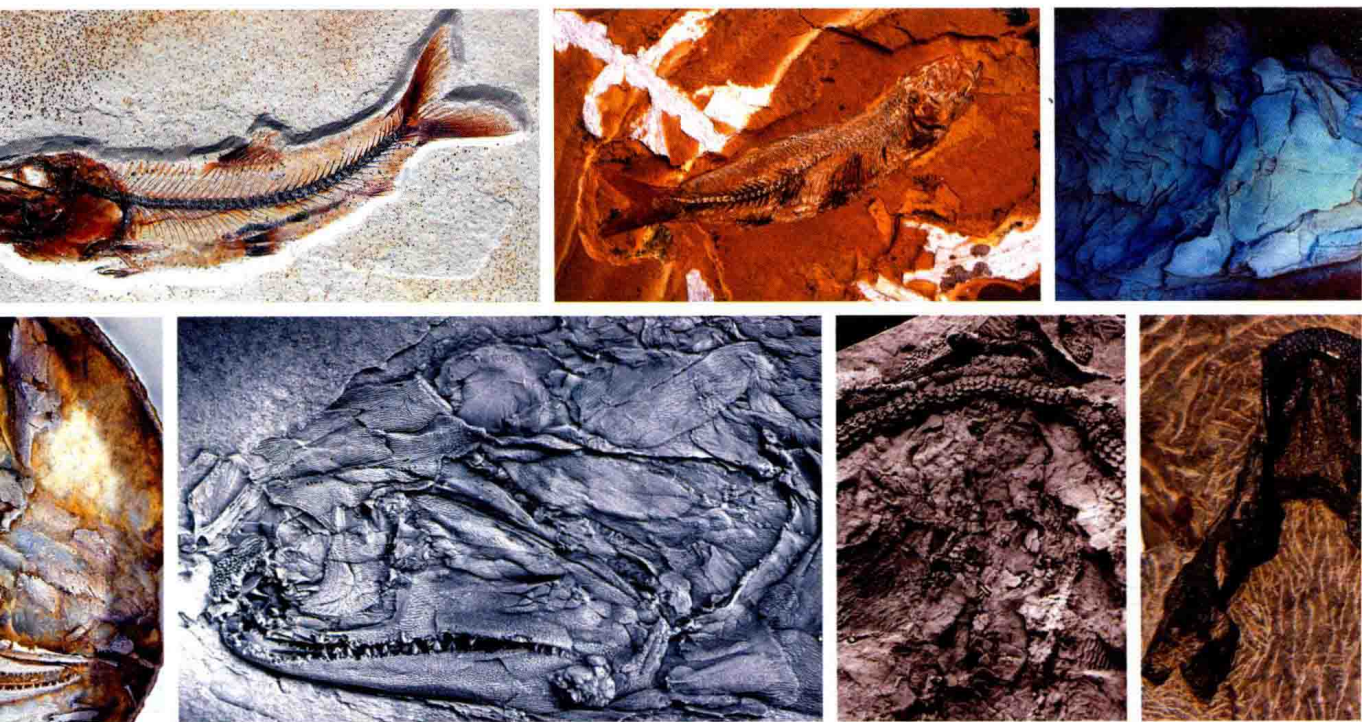
以下机构在许可协议书中允许本书使用它们的图

片: 伦敦自然历史博物馆; 剑桥大学动物学博物馆; 瑞典自然历史博物馆; 法国国家自然历史博物馆; 拉脱维亚自然历史博物馆; 克利夫兰自然历史博物馆; 美国纽约自然历史博物馆; 费城科学院; 西澳大利亚博物馆; 墨尔本维多利亚博物馆。

我还要感谢约翰·霍普金斯大学出版社的编辑团队为提升该版本书籍整体质量而做的努力。

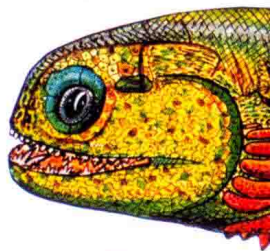
最后, 我要特别感谢我的妻子希瑟·鲁滨逊 (Heather Robinson), 她始终如一地支持着我, 在需要进行打字以及帮助编辑部分手稿时, 她也帮上了大忙。

约翰·A·朗 (John A. Long)



目录

Contents



前言 / xi

第二版前言 / xiii

致谢 / xv

第一章 地球、岩石、进化和鱼 / 001

了解鱼类进化过程的背景信息 / 001

化石和岩石 / 003

岩石中的生命史 / 004

进化的事实 / 005

基本的脊椎动物解剖知识指南 / 008

测定岩石和化石的时间 / 010

漂流的大陆和鱼的进化 / 012

自然界内的秩序 / 013

化石研究与制备 / 016

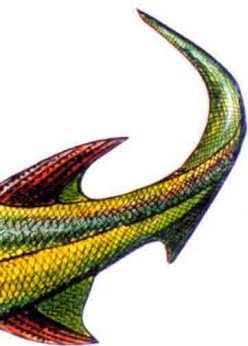
第二章 声名显赫的游泳蠕虫：第一批鱼类 / 017

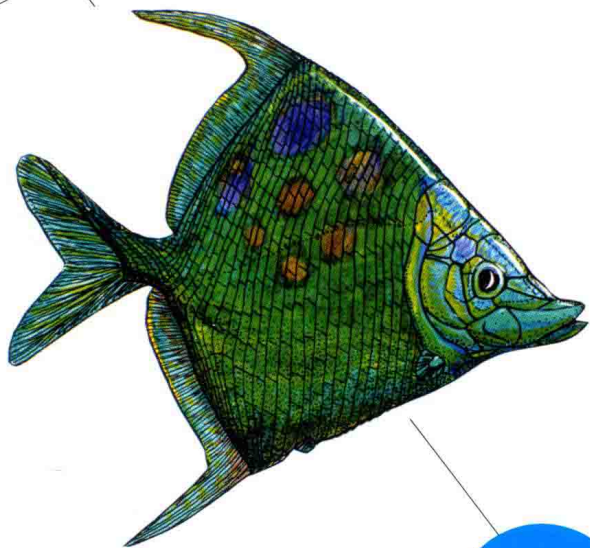
脊索动物和第一批脊椎动物的起源 / 017

幼鱼和进化 / 019

鲟鱼 / 020

被囊类动物 / 021





目录

Contents

海口鱼及其亲属 / 023

牙形虫：神秘的化石 / 024

骨骼：早期的起点 / 026

第三章 无颌的神奇动物 / 028

八目鳗、七鳃鳗，以及它们那些灭绝了的披有甲胄的亲属 / 028

最古老的有骨鱼：寒武纪和奥陶纪的无颌鱼 / 031

原始无颌鱼的基本结构 / 032

异甲类：一个伟大的辐射分化物种 / 035

缺甲鱼亚纲：七鳃鳗的先驱？ / 038

腔鳞鱼亚纲：鳞片讲述着一段故事 / 042

盔甲鱼亚纲：神秘的东方无颌鱼 / 044

茄甲鱼：自成一派 / 048

骨甲鱼亚纲：无颌类成就的巅峰 / 048

与第一批有颌鱼的联系 / 052

无颌帝国的终结 / 054

第四章 甲胄鱼和长着胳膊的鱼 / 056

长有甲胄，统治着泥盆纪海洋、河流和湖泊的盾皮鱼 / 056

盾皮鱼类的起源和关系 / 057

戈戈鱼和酸制备技术 / 060

斯坦鱼目和假瓣甲鱼目：早期的谜团 / 061

盾皮鱼的基本结构 / 063

硬鲛目和棘胸鱼目：拥有精细甲胄的鱼类 / 064

胴甲鱼：始终与胳膊差不多长 / 065

褶齿鱼目：拥有坚硬的牙齿和多刺的鳍足 / 071

瓣甲鱼目和它们奇怪的亲属 / 072

节甲鱼目：伟大的盾皮鱼分化群体 / 076

第五章 鲨鱼和它们的软骨亲属 / 091

历史悠久的杀手 / 091

鲨鱼的起源 / 095

原始软骨鱼的基本结构 / 096

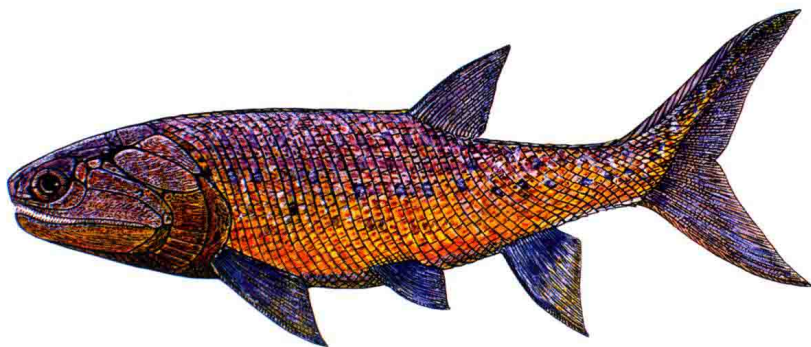
原始软骨鱼的牙组织 / 104

晚古生代软骨鱼的辐射分化 / 105

白手起家的现代软骨鱼 / 108

全头鱼：一种早期的辐射分化？ / 112

“鳐”向新时代 / 115



目录

Contents

第六章 颌部长有棘的鱼 / 118

早期颌鱼的奇异混合体，如棘鱼和其亲属 / 118

棘鱼的起源和亲缘关系 / 120

棘鱼的基本结构 / 121

栅棘鱼目：带有甲冑的棘鱼 / 123

坐棘鱼目：掠食者 / 124

棘鱼目：过滤捕食者和幸存者 / 126

第七章 进化过程突然显现 / 130

内骨骼高度骨化的硬骨鱼 / 130

有脊类：硬骨鱼的神秘祖先 / 133

硬骨鱼的基本结构 / 135

早期的肉鳍鱼或硬骨鱼分支？ / 135

第八章 原始的条鳍鱼 / 138

第一批硬骨鱼的快速崛起 / 138

原始条鳍鱼的基本结构 / 140

泥盆纪条鳍鱼 / 141

原始条鳍鱼的快速兴起 / 148

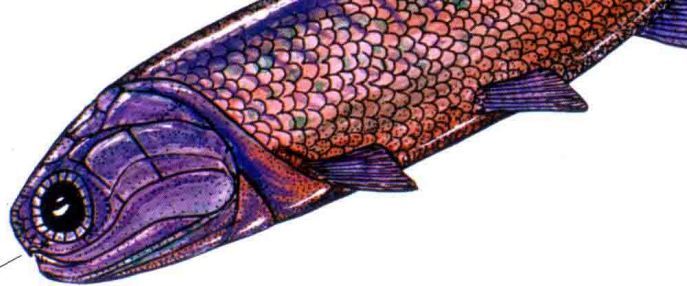
新鳍鱼：成功的曙光 / 152

第九章 真骨鱼，真正的冠军 / 154

世上最成功脊椎动物的起源和分化 / 154

硬骨鱼类的早期开端 / 156

骨舌总目：骨质的舌头 / 158



化石比目鱼的奥秘 / 159

海鲢：漫长的进化过程 / 161

鲶鱼及其亲属的帝国 / 165

纯真骨类：无与伦比的一种分化形态 / 167

第十章 鬼鱼和其他原始掠食者 / 174

长有肉鳍的肉鳍鱼以及适合它们生存的地方 / 174

中国鬼鱼和它的亲属 / 176

杨氏鱼和威尔士王子鱼 / 180

长有匕首状牙齿的鱼 / 180

肉鳍亚纲的基本结构 / 182

腔棘鱼（空棘鱼）：长有穗的尾巴 / 184

肉鳍亚纲群体的关系 / 187

第十一章 咬合方式奇怪的鱼类 / 188

肺鱼是怎样学会呼吸空气的 / 188

孔鳞鱼目：头部很胖、眼睛好似珠子的掠食者 / 189

肺鱼：两种呼吸方式 / 191

一条原始肺鱼的基本结构 / 192

肺鱼的起源 / 195

肺鱼的多样性 / 196

牙本质覆盖的腭骨：在早期用于碾碎猎物的结构 / 201

精细的捕食机制 202



目录

Contents

第十二章 巨大的牙齿，强壮的鱼鳍 / 208

拥有与人类手臂和腿部类似鳍骨鱼类 / 208

四足鱼类的起源 / 208

石炭纪的巨型杀手：根齿鱼目 / 210

迈向陆地的一步：四足形亚纲茎群 / 212

第十三章 进化中最伟大的一步 / 223

从水中游动的鱼到步行于地面的陆上动物 / 223

从水到陆地：如何生存 / 225

希望鲟目——是鱼还是长着鳍的两栖动物？ / 227

四足动物干群 / 231

鱼类的一小步，人类的一大步 / 238

鱼的分类 / 240

词汇表 / 245

参考文献 / 251