

Energy and Climate

VISION FOR THE FUTURE

Michael B. McElroy

能源与气候

前景展望

〔美〕M. B. 麦克尔罗伊 著
鲁 玺 王书肖 郝吉明 译



科学出版社

能源与气候——前景展望

〔美〕M. B. 麦克尔罗伊 著

鲁 玺 王书肖 郝吉明 译

科学出版社

北 京

图字：01-2017-3338 号

内 容 简 介

全球气候正在以一种前所未有的速度变化着，地球能源的收支平衡被打破，由于日益严重的温室效应，地球从太阳所获得的能量超过了返还太空的能量。海洋所含的热量在增加，地球表层和大气层的温度在升高，中纬度的冰川在融化，海平面持续上升，北冰洋的冰盖正在消失，这些说法都不是理论推断而是基本事实。本书紧跟气候变化科学研究前沿，引领广大读者一起探讨当前全球面临的能源与气候变化问题，论述高屋建瓴，深入浅出。在全面探讨化石能源（煤、石油、天然气）的开发与使用对环境与气候变化影响的基础上，着重阐述未来多种低碳能源（核能、风能、太阳能、水能、地热和生物能）的前景与面临的挑战。此外，还特别比较了中、美两个能源大国的能源体系，阐明了两国在应对全球气候变化的挑战中的关键地位。最后，为全球能源系统提出了持续、低碳的未来发展路径，为我们重新审视中国的能源战略和发展模式提供借鉴。

本书可供对能源、环境与气候变化感兴趣的各类读者阅读，包括政府公务人员、企业管理人员、高等院校师生、科研人员及普通读者。

审图号：GS（2018）912 号

图书在版编目（CIP）数据

能源与气候：前景展望 /（美）M. B. 麦克尔罗伊（Michael B. McElroy）著；鲁玺，王书肖，郝吉明译. —北京：科学出版社，2018.6

书名原文：Energy and Climate: Vision for the Future

ISBN 978-7-03-056974-5

I. ①能… II. ①麦…②鲁…③王…④郝… III. ①能源-研究②气候变化-研究 IV. ①TK01②P467

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 051686 号

责任编辑：杨 震 刘 冉 宁 倩 / 责任校对：韩 杨

责任印制：肖 兴 / 封面设计：东方人华

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

保定市中国画美凯印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张：16 1/4

字数：330 000

定价：98.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

© Oxford University Press 2016

Energy and Climate: Vision for the Future was originally published in English in 2016. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. China Science Publishing & Media Ltd. (Science Press) is solely responsible for this translation from the original work and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.

本书英文版 *Energy and Climate: Vision for the Future* 于 2016 年出版。牛津大学出版社授权中国科技出版传媒股份有限公司（科学出版社）翻译出版本书中文版。科学出版社对中文版负全部责任。牛津大学出版社对中文版的任何错误、遗漏、偏差或歧义以及由此造成的任何损失概不负责。

译者序

本书的翻译工作在两个大背景下展开：一是联合国发布了题为《新的征程和行动——面向 2030》的报告，提出了 17 大类 2030 年可持续发展目标；一是《巴黎协定》正式签署并开始实施。减少全球气候变化的风险和影响已经成为全人类可持续发展进程中共同面临的课题与挑战。确保清洁能源的可持续性发展无疑与实现《巴黎协定》温升目标息息相关。目前的化石能源使用对气候变化造成了怎样的影响？哪些能源可以帮助人类应对气候变化并推动可持续发展？这些问题是本书探讨的核心问题。除此之外，本书还客观地对比了中国和美国的能源使用现状和发展前景，探究二者开发、使用新能源的潜力。他山之石可以攻玉。本书带给中国读者的思考是：在新时代，我们如何调整改善能源结构，走出一条绿色低碳之路，实现经济和社会的可持续发展。

本书的作者 M. B. 麦克尔罗伊教授是美国哈佛大学的学术大师和全球杰出的环境能源学家。他曾任美国政府环境顾问，美国前副总统、诺贝尔和平奖得主戈尔先生称其为自己在气候变化方面的“启蒙导师”。他 29 岁即被聘为哈佛大学终身教授，是该校有史以来最年轻的终身教授之一。他创建了哈佛大学地球与行星科学系、环境科学与公共政策系两大院系，并担任首任系主任。除此之外，他还领导创办了哈佛大学首个跨学院的校级研究机构——哈佛大学环境中心（中国项目组），致力于推动中美两国在气候、能源与环境领域的交流合作。多年来，麦克尔罗伊教授以其丰富的学识、独到的见解和敏锐的洞察力，指导了一批又一批活跃在世界环境与能源前沿领域的杰出科学家与领导者。

本书是麦克尔罗伊教授在能源与环境领域的又一部力作，处处体现了他的智慧、卓见以及多年的研究心得。作者针对全球变暖和极端天气事件频发的现状，详尽分析了人为因素导致的气候变化以及全球能源系统的演变历程。本书不仅剖析了化石能源存在的问题与挑战，也探讨了各种低碳能源技术的应用前景，包括风能、太阳能、水能、地热能、潮汐能和生物质能等。不同于其他能源与气候领域的专业书籍，本书从地球发展演变的视角出发分析能源与气候变化的相关问题，冷静客观地向人类提出警示：我们必须摆脱对化石能源的依赖，开发替代性新能源势在必行，刻不容缓。除此之外，作者还特别关注中国的能源使用现状和发

展前景，认为中国在应对全球气候变化的挑战中将发挥关键作用。麦克尔罗伊教授采用简明诙谐的语言和生动有趣的实例阐释了严肃深奥的能源与气候问题，深入浅出，通俗易懂。本书视角独到，观点新颖，内容翔实，为应对气候变化及能源结构的转型升级提供了重要的理论和实践基础。

三位译者在不同阶段分别与麦克尔罗伊教授合作共事。郝吉明院士与麦克尔罗伊教授有着 20 多年的研究合作，他们不仅是同事也是老朋友。王书肖和鲁玺是麦克尔罗伊教授亲自指导的博士后与博士研究生。在译者看来，本书体现了麦克尔罗伊教授作为科学家和教育家所具备的探寻真理、思考现实问题并积极寻求解决方案的坚韧和勇气，以及以推动人类社会可持续发展为己任，致力于改善地球环境的责任感和使命感。

谨以此中文译本献给我们共同热爱的中国环境事业。

译者

2018 年 3 月于清华园

前 言

全球气候正在以近代人类历史上前所未有的速度发生变化。地球从太阳吸收的能量远超返回太空的能量。作为一个整体，地球在不断获取能量。海洋热含量增加，地表和大气层升温，中纬度地区冰川持续消融，海平面不断上升，北冰洋冰盖一直萎缩。所有这些推断都是基于实际观测的事实而得出。

温室气体，尤其是二氧化碳、甲烷和一氧化二氮浓度增加，是造成地球能量收支不平衡的主要原因。以煤炭、石油和天然气为代表的化石燃料燃烧，导致这些气体浓度不断增加，至少高于过去 80 万年中任何时间段的浓度。如果要阻止当前趋势持续恶化，经济模式转型，大力发展替代能源成为必然。面对这一挑战，我们需要立即做出反应。气候变化的影响已经十分显著，未来其带来的破坏性影响只可能增加。

明确区分天气和气候这两个概念尤为重要。气候是地球上某一地区多年时段大气的一般状态，是该时段各种天气过程的综合表现。天气的本质是不断变化的，因而我们很难预测未来超过两周的天气变化情况。正如《纽约时报》专栏作家 Thomas Friedman 所述，有充足可信的证据表明，天气正变得越来越不可预测，近年来，洪水、干旱、暴风和热浪等自然灾害日趋频繁，这恰恰是气候变暖所导致的。大气中水蒸气含量正在增加，水蒸气冷凝的同时会释放热量，这是大气主要的能量来源。如果气象条件有利于上升运动，则预示着风暴即将来临。由于大气中水蒸气浓度较高，因此雨雪天气情况会多于往常。如果大气中的水分供应在全球范围内能够保持相对恒定（一项合理的假设），那么其他地方一定少雨，或者出现更多的洪水与干旱情况。风暴携带有更多能量，这也增加了其发生的概率，从而导致更严重的冲击。无论是出于有意或无意的人为原因，还是自然原因（如雷电等），森林区域的持续干旱增加了发生火灾的可能性。无论哪种情况，都会严重地破坏人类生命财产和自然资源，影响广泛。

在科学界有一项共识，即人为因素导致的气候变化是真实紧迫的，并且很快会发生，应该引起人们的重视。然而，仍有人对这一结论提出异议，尤其是在美国。这些怀疑论者虽然也是其他领域的杰出代表，但几乎毫无例外，他们并不是气候科学家。正如我在本书后边所述，他们的论点只代表个人意见，尽管其

并未以专业气候科学家获取的观测数据和基础科学理论作为论据，但仍然具有一定影响力，我们需要对他们的论点做出回应。因此，我决定在本书专设两个章节，一章概述人们为什么需要认真对待气候问题，另一章回应那些异议者提出的观点。

过去几年中，基于大学通识教育课程的赞助，我在哈佛大学教授了一门课程，该课程目的是让学生体验有用的思维模式和分析技能，这对于基础广泛的人文科学教育至关重要。通识教育课程旨在促使学生在其学习领域补充专业知识，如物理和生物科学、社会科学和人文学科等传统学科。来自不同学科背景的学生选择我教授的课程，主要是出于对能源与环境问题的关注。我的教学目标是从现在到不久的将来，对本课程涵盖的主题进行广泛概述。我之前写的一本书（*Energy: Perspectives, Problems, and Prospects*, Oxford University Press, 2010*），主要目的是作为支撑本课程的资料。写那本书时，为了适合更多的读者阅读，书中包含了方程和数值实例。我的一些非科学家朋友不得不忍受这种细节，这使他们感到沮丧。这也说明，如果该书可以删除这些专业细节，重新出版发行，效果也许更好，并获得更多的读者。

当我开始写这本书时，我已有弱化专业细节的想法。因此，我决定使用文字和图表来呈现相关资料，而非之前的方程和数值实例。这一点很重要，但并非严格意义上的妥协。为了满足那些可能希望更深入探讨相关主题的读者，我选择在书中引用原始文献作为参考资料。要想在气候问题上进行有根据的辩论，并从根本上解决这一问题，首先必须了解气候和相关的能源知识。令我失望的是，尽管这些问题在美国被大量公开讨论，但却缺乏实质内容。我希望本书所提供的资料，至少能为鼓励进行有根据的辩论提供支撑。大量的能源系统数据以及有关气候系统的详尽论述可能会令普通读者稍感困惑，但我认为非常重要的一点是，陈述事实的同时不能掩盖细节。标准的高中科学课程讲解应该为学科提供充足的背景，让感兴趣的读者充分理解。如果读者不愿仔细阅读本书多个图表中展示的细节，也应该能够比较容易地跳过这些细节，继续阅读本书主线内容。

本书首先进行总体概述，随后介绍能源基础，并论述美国和中国当前能源系统现状，然后是上述提到关于气候的章节。接下来是有关具体能源选择的一系列章节，包括煤炭、石油、天然气、核能、风能、太阳能、水能、地热能和生物质能。这些内容从全球视角进行阐述，其中美国和中国是特别关注的对象，我们必须认识到这两个国家在应对全球气候变化挑战方面发挥的关键作用。当前中国已

* 中文版《能源：展望、挑战与机遇》，科学出版社，2011——译注

经取代美国，在温室气体排放方面位居全球第一，特别是二氧化碳排放问题尤为突出。最后，本书总结了目前正在采取的至少能够降低温室气体排放增长率措施，以及理论上可以将能源系统对全球气候的长期影响最小化的未来低碳能源前景。未来我们很大程度上必须过渡到使用可再生能源的低碳社会，低碳能源包括风能、太阳能、水能、生物质能、地热能以及潜在的核能等，我们应当知道如何去做。正如所讨论的，要想获得成功，我们需要重点投资基础设施，尤其是升级现有电力分配网络，实现预期的技术进步，进行全球合作，更为重要的是，要有坚定的政治领导。

致 谢

2015年8月下旬，美国西部大部分地区野火肆虐，过去几年中该地区经历长期干旱，这是不可避免的结果。生命不断逝去，财产遭到破坏，经济损失估计高达数十亿美元。来自遥远的澳大利亚和新西兰的消防员也参与了救火。极端天气频发，不仅包括降水和气温波动，还有猛烈的暴风雨。极端天气的影响不仅局限于美国西部，还扩展到全球各地。

导致极端天气频发的根本原因并非一个谜团，它与大气不断积聚热量直接相关，主要由于我们过度且不可持续地依赖煤炭、石油和天然气作为现代能源经济的主要能源，它们是二氧化碳的主要排放源。当前大气二氧化碳浓度水平高于过去至少85万年中的任何时期。除非我们采取行动，否则二氧化碳浓度肯定会攀升到自恐龙时代（超过5000万年以前）至今都没有过的高度。地球从太阳吸收的能量超过不断返回到太空的能量，过剩的能量主要存储在海洋中。气候模式正在发生变化，海平面不断升高。正如本书所述，毫无疑问，我们要对气候变化负责。

面对这些问题构成的挑战，尤其是在美国，其反应常常不是基于相关科学因素的考虑，而是依赖于特定政治哲学立场。我之所以决定写这本书，核心因素是确信人们对人为原因导致气候变化的反应，应该通过对相关事实进行客观分析来确定。如何就解决这个问题进行建设性对话，出发点应该是承认问题的存在。我的目标是定义这一挑战，并提出如何解决这一挑战的构思和愿景。

本书有两章是气候方面的内容，一章是提出关于为什么应该认真对待人为导致的气候变化问题，另一章是对持异议者进行回应。前者所用材料主要是几年前D. James Baker和我为美国情报机构所做研究的相关资料，内容为极端气候对国家安全的影响(http://environment.harvard.edu/sites/default/files/climate_extremes_report_2012-12-04.pdf)。感谢 Linda Zall 高瞻远瞩，委托我们做这项研究，感谢担任评审的十位杰出专家（报告中有他们的姓名）。特别感谢 Gregory Bierman, Ric Cicone, Marc Levy 和 Tom Parris 分享他们的专业知识，并对本研究做出重要贡献。

同时，还要感谢我的同事 D. James Baker, Ralph Cicerone, 鲁玺, Chris Nielsen, Ruth Reck, William Schlesinger 和 Yuk Yung，他们花费大量时间阅读了全部书稿。我衷心感谢他们不吝时间，为提高终稿质量无私奉献。特别感谢鲁玺，在本项工

作中，他对能源科学各领域的深刻见解，使我受益匪浅。同时，感谢黄俊灵分享他对科学的热爱，并在我的指导下写出优秀的博士论文。

在我哈佛大学的职业生涯中，能够有幸与诸多杰出同事结交，从他们身上学习。特别感谢 Fred Abernathy, George Baker, Jim Anderson, Daniel Jacob, Dale Jorgenson, Dan Schrag 和 Steve Wofsy, 我与他们分享我对未来能源发展的认知。与哈佛商学院教授 Joseph Lassiter 进行的对话和电子邮件交流，使我对未来核能发展有了更加谨慎的认知，感谢 Joe。

过去几年中，我非常荣幸，同时也很乐意能够为哈佛大学一些才华横溢的本科生提供建议，并与之一起工作，他们选择在我的指导下写一些与能源相关的高水平论文。需要特别提到的人有 Andrew Cohen, Charles Gertler, Jonathan Park, Jackson Salovaara, Jun Shepard, Nora Sluzas 和 Jeremy Tchou (按姓氏字母顺序排列)。他们工作质量总是很高，这可以通过其在大学时所受到的一些卓越奖励，以及某些情况下在专业文献附加的后续出版物来证明。我感谢他们对其所承担工作投入的热情，以及对我们研究计划做出的重要贡献。

最后，我想向 Stephen McElroy 表达我的谢意，他阅读了本书大部分原稿，有针对性地提出了很多需要改进的内容和有关表述的建议，还要感谢 Cecilia McCormack, 他为我们的办公秩序，我们的研究团队，以及我个人的职业生涯提供了完好保障。

单位换算表

磅	lb	1 lb=0.454 kg
公顷	hm ²	1 hm ² =10 ⁴ m ²
海里	nml	1 nml=1.852 km
华氏度	°F	华氏度 (°F) = 摄氏度 (°C) × 1.8 + 32
加仑	gal	1 gal(US)=3.785 43 L
克卡	therm	1 therm=105.506 MJ=29.3 kWh
库德	quad	1 qual=10 ¹⁵ BTU
英尺	ft	1 ft=0.304 8 m
英寸	in	1 in=2.54 cm
英国热量单位	BTU	1 BTU 指的是将 1 磅 (0.454 kg) 水加热 1°C 所需的热量
英里	mile	1 mile=1.609 344 km
英亩	acre	1 acre=4046.856 m ²
	ppb	1 ppb=10 ⁻⁹ 量级, 十亿分之一
	ppm	1 ppm=10 ⁻⁶ 量级, 百万分之一

目 录

1 绪论	1
2 能源基础	12
3 当代美国能源系统及其与中国能源系统的比较	23
4 人类活动导致的气候变化：为什么我们需要严肃地对待	30
5 人类活动导致的气候变化：怀疑论者提出的论点	59
6 煤：充足但存在着问题	72
7 石油：过去的波动与未来的不确定性	80
8 天然气：化石燃料中最清洁的能源	97
9 核能：乐观的开端，暗淡的未来	111
10 风能：机遇和挑战	128
11 太阳能：丰富但昂贵	143
12 水能：来自流水的能量	160
13 地球热量和月球引力：地热和潮汐能	172
14 生物质：交通运输中石油的替代燃料	182
15 限制美国和中国的排放：北京协议	195
16 低碳能源前景	209
索引	235

1 绪 论

气候变化导致的破坏性风险是现实且紧迫的。热带地区形成的低压系统可以发展成一级飓风，沿着美国东海岸缓慢北上。通常情况下，飓风应当右转穿过大西洋。然而，此次桑迪飓风的情况异乎寻常，这场风暴遇到了一个具有强烈低压系统的急流，该急流的形成与北极地区反常的温暖状况有关。预报显示这场风暴没有右转，而是向左转并在新泽西海岸经过一段反常的温暖水域时强度逐渐增加。这场飓风被人们称为世纪风暴。纽约和新泽西受到破坏性冲击，风暴的影响北至缅因州，南到北卡罗来纳州。下曼哈顿区被 14 英尺（约 4.27 米）高的巨浪吞没，地铁被淹，39 大道以南城区陷入一片黑暗。斯塔滕岛居民的房屋被毁、遭遇停电、与外界完全隔离，这些灾害已经威胁到他们的生命安全。当洪水吞没大部分市区后，被淹死的人数多达 23 人。新泽西海滩上的社区也被冲毁。风暴过去一周之后，纽约和新泽西仍有超过一百万的家庭和企业未恢复供电。本次损失估计高达 600 亿美元。这就是关于 2012 年 10 月下旬桑迪飓风造成的破坏性影响的报道。

桑迪飓风的影响引起了有关人类活动诱导全球气候变化议题的讨论。纽约州州长 Andrew Cuomo 评论道：“从本次事件中我们认识到，气候变化和极端天气问题都是确实存在的事实。”市长 Michael Bloomberg 的反应更加明确，他说：“气候正在发生变化。纽约市和世界各地经历的极端天气增加，这或许是气候变化导致的结果，也可能不是，但考虑到本周遭受的破坏，这一风险应当让所有领导人立刻采取行动。”奥巴马在他连任总统之后说道：“我们希望我们的孩子在美国成长，而不是这个因气候变暖而产生破坏性威胁的星球。”然而有些人则怀疑这些事件的关联性。来自商业频道 CNBC 的一位记者提出，这场飓风应当仅仅被看作是时运不济，是一个百年才一遇的偶然事件。另外，在同一个节目上的一位嘉宾建议大家也可以松一口气了，因为在未来一百年内，我们几乎不可能再遭遇类似情况。我们应当如何协调这些不同观点？事实又是怎样的呢？

气候变化产生的严重威胁确实存在。海平面上升速度超过了预期值，只要 10% 的格陵兰冰盖融化，就会使全球海平面升高 1 米。2012 年夏天，受异常温暖天气影响，格陵兰冰盖有很大一部分在持续几天的时间内被一层液态水覆盖。如果目前覆盖在南极洲西部陆地上的冰盖融化，影响将更加严重。北冰洋夏季冰盖正

在逐渐消退，预测未来几十年内，该地区每年至少会出现一段大面积无冰时期。极端天气愈加频发，越来越多史无前例的热浪、毁灭性的森林火灾、暴风雨、洪水和干旱天气频繁发生。现代工业经济依赖于煤、石油和天然气等化石能源。化石能源的燃烧过程伴随着大量二氧化碳（ CO_2 ）的排放。如果我们不能立刻采取行动，从根本上解决温室气体浓度必然升高的问题，情况可能会变得更糟。现在 CO_2 浓度高于过去80万年的任何时候。鉴于目前趋势，未来几十年内， CO_2 浓度很可能攀升至自5000万年前恐龙时代以来前所未有的高度。此外，我们担心影响气候变化的温室气体不只是 CO_2 。相比 CO_2 ，甲烷（ CH_4 ）和一氧化二氮（ N_2O ）的温室效应更强，如今浓度也达到了创纪录的高水平，未来很可能进一步升高。

我们能确定像桑迪这样的飓风和全球气候变化有直接关系吗？答案是否定的。桑迪飓风可能仅仅是一个掷骰子得到的糟糕结果，一个百年一遇的偶然事件，这可以从历史纪录中推断出。但类似事件重复发生的可能性正在增加，以前百年一遇的事件，未来可能会更为普遍（二十年一遇或十年一遇？）。天气和气候的基本游戏规则正在改变。过去发生的事情并非是未来可能发生事件的可靠指南。

继续无限期地依赖煤、石油、天然气这些影响气候变化的化石燃料，并不是一个合适的选择。我们需要尽快过渡到更易接受、更可持续的发展道路，以满足未来对能源的需求。与此同时，还需要尽量减少对经济以及生活方式的潜在不利影响。这一挑战是可以克服的。但是，若想要成功解决这一问题，我们首先要承认问题是真实存在的。

首先是充分认识这一问题，然后来面对那些试图将气候变化意识形态化，或者为了短期的政治或者经济利益而拒绝对气候变化问题的人。我们的目标是坦诚地提供事实，告诉大家我们知道什么以及不知道什么，来帮助大家更理智地讨论这一复杂的问题。我计划在本书中列出气候变化需要被认真对待的原因，同时还将回应那些气候变化异议者的论点。人类活动导致的气候变化威胁真实与否，以及是否严重，都不应该被视为政治游戏。然而，政治能够并且应当在讨论如何处理这一问题时发挥作用。

有关如何最优地实现这一目标，仍有讨论空间，但是我们需要理智地探讨。把这一问题推迟到明天，或者下一个选举周期，都是不负责任的选择。

生命是永恒的：人类历史很短

历史上生命对地球的影响广泛而深远，与之相比，人类开始假想自己成为地

球主人的时间则非常短暂，认识到这一点具有重要的启发意义。

地球大约有 45 亿年的历史。在过去的 35 亿年里，生命一直是这颗星球的历史特征。早期生命形式由原核生物构成，这是一种能够从环境中的化学物质或阳光中直接获取能量的简单生物。细菌和蓝绿藻是这些早期生命形式的实例，它们有着很强的适应能力。直到今天，在地球以生命为特征的复杂网络中，这些原核生物仍发挥着重要作用。生物进化的第二阶段涉及我们所说的真核生物，以及比它们的原核祖细胞更复杂的单细胞生物。Lynn Margulis 认为真核生物是由先前存在的原核生物通过细胞融合演化而来，一种原核生物吃掉另一种，从而把它们的 DNA 融合在一起。长久以来，生物进化的步伐显然是不连续的。既有大量新物种涌现的时期，也有大规模物种灭绝的时代，二者相互抵消。几乎现在所有生物门的祖先都存在于像伯吉斯页岩这样的地方，这是 1909 年由 C. D. Walcott 在加拿大落基山高地发现的一处化石集群，距今约有 4.4 亿年。

根据伯吉斯页岩记录，在寒武纪时期（距今 5.43 亿至 5.1 亿年）新生命形式出现爆炸式增长之后的几亿年（距今 2.25 亿年）间，地球生物经历了像 Stephen Jay Gould 所说的“所有物种鼻祖的灭绝”。这一重大事件导致当时多达 95% 的海洋物种遭到灭绝。第二次大规模灭绝发生在距今 6500 万年前，地球受到巨型陨石（群）撞击，导致恐龙灭绝，为后来哺乳动物乃至人类的出现创造了契机。Gould 幽默地评价道：“从字面上来说，我们作为大型的理性动物能够存在，应该感谢我们的幸运之星。”毫无疑问，大规模环境变化在这些时期的灭绝事件中发挥了重要作用。另一方面，不适应环境的物种遭受灭绝，为新物种进入历史舞台和取代其地位做出了贡献。

板块构造很大程度上促进了地球上生命存续的长期持久性。以海洋为例，随着生物死亡，尸体的碎片部分沉落到海底，并被埋藏且有效地固定在沉积物中。这一过程能够去除生命的必需元素，如碳、氮、磷。以碳为例，在大气-海洋-生物圈中碳的寿命（也就是在典型碳原子被转移到沉积物之前所需要的平均时间）小于 20 万年。这意味着，如果沉积物中的碳损失是永久性的，则对于生命体来说至关重要的地表环境在很久以前就已经耗尽了组成生物体的碳元素。幸运的是，沉积过程是暂时的。沉积物在巨大地壳板块上传输，地壳像竹筏一样漂浮在又热又重的下地幔上。当地壳汇聚时，沉积物可能被抬升也可能被收缩到下地幔中。抬升会形成山脉，碳和其他生命必需元素可以通过抬升的岩石在风化作用下直接循环，返回到大气和生物圈系统。如果沉积物被带回地幔，它将由于接触高温地幔而被加热到高温。沉积物中的碳和其他挥发性物质可以作为温泉和火山的一部

分，大规模地被释放或转移到大气和海洋中。在地球历史的进程中，平均每个碳原子至少要经历 10 次这样由构造驱动的循环过程。

人类是如何适应这种生物进化大冒险的呢？一个清晰的事实是我们进入生命舞台的时间非常短暂。线粒体 DNA 的研究表明，我们有着共同的母系祖先——生活在距今 15 万年前非洲的“夏娃”。我们最早的祖先是游牧民、猎人和采集者，他们要频繁地四处奔波寻找食物。到了 2 万年前，他们已经把活动范围扩大到除南极洲以外的所有大陆。人类首次到达美洲可能在距今约 3 万年前，他们趁着最后一个大冰河时代穿过白令海峡，当时海平面比现在大约低 120 米（北美和亚洲通过大陆桥相连）。

想想这意味着什么，如果我们将地球 45 亿年的历史压缩为 1 年，那么直到 12 月 31 日午夜前的 3.5 分钟，人类才第一次到达美洲！

农业和畜牧业的发展是地球物种历史上第一项重要性转变。最早可能扎根于距今一万年前的中东区域，该地区被称为“肥沃月湾”。我们的祖先先后学会了利用铜、锡和铁制作工具和武器（在距今 5000 年到 3000 年间）。此外，木材是早期人类社会经济实用的能源，对于随后各种文明的发展和兴盛至关重要。当木材供应枯竭时，文明随之崩溃。正如 Perlin（1989）举例所述，这是历史上反复出现的规律，如美索不达米亚、埃及、印度河地区、巴比伦、克里特岛、希腊、塞浦路斯以及后来的罗马。

早期西方文明主要集中在地中海周围，随后转移到大西洋沿岸地区，特别是西班牙和葡萄牙，之后是法国、荷兰和英国。这几千年时间里，东方文明一直由中国主导。的确，正如 Fairbank 和 Goldman（2006）指出的，大部分时间里，中国是“世界上高度文明的国家，不仅能和罗马媲美，更远超中世纪的欧洲”。从 16 世纪到 19 世纪初，中国一直是世界最大经济体。然而，现代工业时代的黎明并未在中国到来，而是出现在欧洲西北部的边缘——英国。工业革命发生在大约 250 年前（按照之前的类比，这相当于 12 月 31 日午夜前 2 秒）。从此，世界彻底改变。

工 业 革 命

工业革命通常是指 18 世纪末和 19 世纪初在英国开展的一系列变革。这些变革大都涉及生产方式的转变，从利用人力或动物的力量，过渡到利用水力特别是后期利用燃煤产生蒸汽来推动机器运转。工业革命的发展具有划时代意义，并为