

新时代中国生物多样性与保护丛书

The Series on China's Biodiversity and Protection in the New Era

中国生态学会 组编



气候变化的应对： 中国的碳中和之路

*Climate Change Strategy:
China's Road to Carbon
Neutrality*

刘 竹 逵 非 朱碧青 主编

河南科学技术出版社

· 郑州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

气候变化的应对: 中国的碳中和之路/中国生态学会组编; 刘竹, 逯非, 朱碧青主编.
—郑州: 河南科学技术出版社, 2022.1
(新时代中国生物多样性与保护丛书)
ISBN 978-7-5725-0505-8

I. ①气… II. ①中… ②刘… ③逯… ④朱… III. ①中国经济—低碳经济—研究 IV. ①F124.5

中国版本图书馆CIP数据核字 (2021) 第123408号

出版发行: 河南科学技术出版社

地址: 郑州市郑东新区祥盛街27号 邮编: 450016

电话: (0371) 65737028 65788613

网址: www.hnstp.cn

选题策划: 张 勇

责任编辑: 田 伟

责任校对: 张萌萌

整体设计: 张 伟

责任印制: 张艳芳

地图审图号: GS (2021) 5512号

地图编制: 湖南地图出版社

印 刷: 河南博雅彩印有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 787 mm × 1 092mm 1/16 印张: 11 字数: 146千字

版 次: 2022年1月第1版 2022年1月第1次印刷

定 价: 86.00元

如发现印、装质量问题, 影响阅读, 请与出版社联系并调换。

本书编写人员名单

主 编：刘 竹 逯 非 朱碧青

编写人员：（按姓氏音序排列）

崔 夺 邓 铸 窦新宇 郭 睿

柯丕煜 林晓娟 刘博杰 刘魏魏

鲁晨曦 宋暄任 孙韬淳 谭建光

王效科 杨师帅 于 颖 于天任

张 国 赵 红



序言

生物多样性是地球上所有动物、植物、微生物及其遗传变异和生态系统的总称。习近平总书记指出：“生物多样性关系人类福祉，是人类赖以生存和发展的重要基础。”生物多样性是全人类珍贵的自然遗产，保护生物多样性、共建万物和谐的美丽世界不仅是当前经济社会发展的迫切需要，也是人类的历史使命。

我国国土辽阔、海域宽广，自然条件复杂多样，加之较古老的地质史，形成了千姿百态的生态系统类型和自然景观，孕育了极其丰富的植物、动物和微生物物种。

我国是全球自然生态系统类型最多样的国家之一，包括森林、灌丛、草地、荒漠、高山冻原与海洋等。在陆地自然生态系统中，有森林生态系统 240 类，灌丛生态系统 112 类，草地生态系统 122 类，荒漠生态系统 49 类，湿地生态系统 145 类，高山冻原生态系统 15 类，共计 683 种类型。我国海洋生态系统主要有珊瑚礁生态系统、海草生态系统、海藻场生态系统、上升流生态系统、深海生态系统和海岛生态系统，以及河口、海湾、盐沼、红树林等重要滨海湿地生态系统。

我国是动植物物种最丰富的国家之一。我国为地球上种子植物区系起源中心之一，承袭了北方古近纪、新近纪，古地中海及古南大陆的区系成分。我国有高等植物 3.7 万多种，约占世界总数的 10%，仅次于种子植物最丰富的巴西和哥伦比亚，其中裸子植物 289 种，是世界上裸子植物最多的国家。中国特有种子植物有 2 个特有科，247 个特有属，17 300 种以上的特有种，占我国高等植物总数的 46% 以上。我国还是水稻和大豆的原产地，现有品种分别达 5 万个和 2 万个。我国有药用植物



11 000 多种，牧草 4 215 种，原产于我国的重要观赏花卉有 30 余属 2 238 种。我国动物种类和特有类型多，汇合了古北界和东洋界的大部分种类。我国现有 3 147 种陆生脊椎动物，特有种共计 704 种。包括 475 种两栖类，约占全球总数的 4%，其中特有两栖类 318 种；527 种爬行类，约占全球总数的 4.5%，其中特有爬行类 153 种；1 445 种鸟类，约占全球总数的 13%，其中特有鸟类 77 种；700 种哺乳类，约占全球总数的 10.88%，其中特有哺乳类 156 种。此外，中国还有 1 443 种内陆鱼类，约占世界淡水鱼类总数的 9.6%。我国脊椎动物在世界脊椎动物保护中占有重要地位。

我国保存了大量的古老孑遗物种。由于中生代末我国大部分地区已上升为陆地，第四纪冰期又未遭受大陆冰川的影响，许多地区都不同程度保留了白垩纪、古近纪、新近纪的古老残遗部分。松杉类植物世界现存 7 个科中，中国有 6 个科。此外，我国还拥有众多有“活化石”之称的珍稀动植物，如大熊猫、白鳍豚、文昌鱼、鹦鹉螺、水杉、银杏、银杉和攀枝花苏铁等。

我国政府高度重视生物多样性的保护。自 1956 年建立第一个自然保护区——广东鼎湖山国家级自然保护区以来，我国一直积极地推进自然保护地建设。目前，我国拥有国家公园、自然保护区、风景名胜区、森林公园、地质公园、湿地公园、水利风景区、水产种质资源保护区、海洋特别保护区等多种类型自然保护地 12 000 多个，保护地面积从最初的 11.33 万 km^2 增至 201.78 万 km^2 。其中，陆域不同类型保护地面积 200.57 万 km^2 ，覆盖陆域国土面积的 21%；海域保护地面积约 1.21 万 km^2 ，覆盖海域面积的 0.26%。这对保护我国的生态系统与自然资源发挥了重要作用。同时，我国还积极推进退化生态系统恢复，先后启动与实施了天然林保护、退耕还林还草、湿地保护恢复，以及三江源生态保护和建设、京津风沙源治理、喀斯特地貌生态治理等区域生态建设工程。党的十八大以来，生态保护的力度空前，先后启动了国家公园体制改革、生态保护红线规划、重点生态区保护恢复重大生态工程。我国是全球生态保护恢复规模与投入最大的国家。自进入 21 世纪以来，我国生态系统整体好转，大熊猫、金丝猴、藏羚羊、朱鹮等珍稀濒危物种种群得到恢

复和持续增长，生物多样性保护取得显著成效。

时值联合国《生物多样性公约》第十五次缔约方大会（COP15）在中国召开之际，中国生态学学会与河南科学技术出版社联合组织编写了“新时代中国生物多样性与保护丛书”。本套丛书包括《中国植物多样性与保护》《中国动物多样性与保护》《中国生态系统多样性与保护》《中国生物遗传多样性与保护》《中国典型生态脆弱区生态治理与恢复》《中国国家公园与自然保护地体系》和《气候变化的应对：中国的碳中和之路》七个分册，分别从植物、动物、生态系统、生物遗传、生态治理与恢复、国家公园与保护地、生态系统碳中和七个方面系统介绍了我国生物多样性特征与保护所取得的成就。

本丛书各分册作者为国内长期从事生物多样性与保护相关科研工作的一流专家学者，他们不仅积累了丰富的关于我国生物多样性与保护的基础资料，而且还具有良好的国际视野。希望本丛书的出版，可推动社会各界进一步关注我国复杂多样的生态系统、丰富的动植物物种和遗传资源，进而更深入地了解我国生物多样性保护行动与成效，以及我国生物多样性保护对人类发展做出的贡献。

在本丛书即将出版之际，特向河南科学技术出版社及中国生态学学会办公室范桑桑和庄琰的组织联络工作致以衷心的感谢。我国生物多样性极其丰富复杂，加之本丛书策划编撰的时间较短，文中疏漏和错误之处，敬请广大读者指正批评。

中国生态学学会理事长 欧阳志云

2021年8月



前言

生物多样性与气候变化相互影响、联系密切。气候变化在全球范围内对生物多样性的所有级别带来诸多改变。在 21 世纪，如何应对气候变化是保护全球及中国生物多样性面临的最重要的挑战之一。同时，生物多样性也对气候变化有重要影响。生态结构的改变直接或间接地影响地球生物化学过程和生物圈各个圈层的相互作用及物质循环，进而影响到地区及全球气候。

气候变化成因复杂。在近代，尤其是工业革命以来，人类活动对气候变化的进程的影响日益加剧。人类活动对气候变化的影响主要体现在通过化石燃料燃烧等过程大幅增加大气中温室气体的含量。相关研究表明，大气中温室气体浓度上升与全球温度上升有强关联性。中国作为幅员辽阔、人口众多的发展中大国，在发展过程中与多数发达国家历史进程一样，难免产生了大量温室气体排放。这些温室气体中，对气候变化影响最大的是二氧化碳。二氧化碳由于其排放总量巨大，且一旦排放又在大气中极其稳定等特性，最受关注。

二氧化碳等温室气体主要通过温室效应影响气候变化。而气候变化的影响并不局限于温室效应导致的全球平均温度的上升。气候变化在全球范围内带来诸多环境问题，包括因冰川融化带来的海平面上升、由海水吸收二氧化碳造成的海洋酸化、局部气候异常带来的极端天气增多等。这些环境问题在全球范围内均可能对海洋及陆地生物多样性和人类活动造成不利影响，因此，应对气候变化是当前全球各国共同面临的严峻挑战。

国家主席习近平于 2020 年 9 月在联合国生物多样性峰会上发表重要讲话，表达了中国积极参与全球环境治理的决心，同时指明了中国力争于 2030 年前二氧化碳排放达到峰值、争取 2060 年前实现碳中和的坚定目标。本书的编写基于中国在碳排放及碳中和等方面的研究成果和实践，期望为全球共同应对气候变化提供中国



经验和中国智慧。

本书共分为五章。第一章阐述了气候变化的基本概况，包括气候变化成因、影响、主要应对路径和全球碳中和目标与进展。第二章介绍了碳中和的科学基础，包括全球碳收支与碳平衡、碳排放、碳汇与人工增汇措施。第三章详细阐述了中国碳排放的现状、趋势与驱动因素。同时，因2020年新型冠状病毒感染肺炎疫情对全球及全中国社会活动的各个方面造成了巨大影响，本章详细分析了新冠疫情对中国各个碳排放部门的具体影响。本章最后从科学的角度上对中国未来碳排放的预期做出了分析。第四章阐述了中国生态系统碳汇的现状 & 未来发展潜力，因自然碳汇在过去及目前仍是中国碳汇的主要来源，本章详细介绍了陆地自然系统和海洋系统这两大自然生态系统的碳汇情况。第五章从多种角度综述了中国碳中和的相关政策措施，覆盖经济结构、低碳能源、转型政策、市场机制、零碳示范区及国际合作等。

本书主要由清华大学和中国科学院生态环境研究中心合作编写而成。由刘竹、逯非和朱碧青担任主编。各章执笔人分别是：第一章于颖、林晓娟；第二章柯丕煜、邓铸、谭建光、孙韬淳；第三章鲁晨曦、崔夺；第四章逯非、王效科、刘魏魏、张国、赵红、刘博杰、杨师帅、于天任；第五章窦新宇。插图由宋暄任绘制。英文摘要由朱碧青和郭睿编译。全书最后由刘竹、逯非和朱碧青修改定稿。在本书编写过程中，李金利老师提供了部分照片素材，在此表示感谢。书中引述的碳排放、碳汇资源数据主要基于我国在碳核算相关领域多年的研究成果，也包括作者过去多年发表的论著及组织搭建的数据库。在本书编写过程中，得到了中国生态学学会的支持和河南科学技术出版社的帮助，在此一并致谢。

本书可供从事生物多样性和气候变化、中国碳中和相关研究和教学的科研人员及教育工作者参考，也可供关注气候变化、碳达峰、碳中和等方面的管理人员、学生、社会公众及媒体宣传等方面的人士阅读。

由于编者水平有限，书中的疏漏或错误之处，恳请同行和读者多提宝贵意见，以便我们今后对本书进行修改和完善。

编者

2021年5月于北京

目录

第一章 气候变化基本概况	001
一、气候变化成因及影响	002
二、气候变化主要应对路径	007
三、全球碳中和目标与进展	011
第二章 碳中和的科学基础	017
一、全球碳收支与碳平衡	018
二、人类活动源与自然源的碳排放	028
三、自然系统碳汇及人工增汇措施	035
第三章 中国碳排放的现状、趋势与驱动因素	043
一、中国碳排放的现状与趋势	044
二、区域及城市的碳排放	049
三、新冠疫情对中国碳排放的影响	059
四、未来碳排放的预期	069
第四章 中国生态系统碳汇的现状与潜力	075
一、中国生态系统碳汇	076
二、中国生态系统碳增汇效应及潜力	086



三、生态系统固碳措施的温室气体泄漏和净 GHG	
减排	096
四、生态系统碳汇保护提升与生物多样性保护	109
第五章 碳中和的政策措施	113
一、经济结构调整、产业升级及技术进步	114
二、低碳能源发展	118
三、能源部门转型政策	119
四、促进碳中和的市场机制	121
五、零碳示范区及试点省市的建设	125
六、国际合作	128
主要参考文献	131
Abstract	146

第一章

气候变化基本概况





气候变化深刻影响着人类的生存和发展，是人类社会可持续发展的重大挑战。1992年缔约的《联合国气候变化框架公约》中将气候变化定义为“经过相当长一段时间得到的观察结果，在自然气候变化之外，由人类活动直接或间接地改变全球大气组成所导致的气候改变”。该定义强调人为活动这一外部因素的重要作用，并将气候变化与自然气候变动这一内部进程区分开来。现有研究认为，导致气候变化的自然因素主要包含太阳辐射变动、地球轨道变动以及大气和海洋环流变动等自然过程。自工业革命以来，人类活动特别是人类生产活动中，使用化石能源所产生的二氧化碳等温室气体的排放，是导致现今以全球变暖为主要特征的气候变化的重要驱动因素。

一、气候变化成因及影响

人类社会进入工业化以来，经济发展与人口增长大幅推动了人为温室气体的排放，从而对全球气候产生了显著影响（IPCC, 2014; IPCC, 2018）。人类工业活动尤其是化石能源燃烧产生的碳排放（ $34 \times 10^8 \text{tCO}_2$ in 2020）被认为是温室气体排放的主要形式（Keeling et al., 1995; Keeling et al., 1996; Friedlingstein et al., 2020; IEA, 2020）。以碳基能源（煤炭、石油、天然气等）为主的化石燃料在燃烧过程中能够释放占其成分90%~98%的碳，这些碳在大气中被完全氧化形成二氧化碳，构成了最主要的温室气体源（Lashof et al., 1990）。另外两种主要温室气体为氧化亚氮和甲烷。其中，氧化亚氮排放也主要来自于化石能源燃烧。甲烷排放一部分来自于化石燃料的燃烧，另一部分来自于油气泄漏、废弃物、生物沼气，以及牲畜体内的发酵过程。其他温室气体如氟化物等，则主要来自于工业化学生产过

程。值得注意的是，能源消费相关的碳排放不仅成为了主要的温室气体排放源，也彻底改变了全球碳循环这一最基本的地球化学循环格局（Levin et al., 2012）。除化石能源燃烧外，人类活动造成的土地利用变化每年贡献约 $10 \times 10^8 \text{t}$ 碳。在自然界碳循环体系中，陆地森林系统和海洋为最主要的碳汇（Sarmiento et al., 2010; Bernardellor et al., 2013），每年分别吸收 $25 \times 10^8 \text{t}$ 碳和 $23 \times 10^8 \text{t}$ 碳，剩余的 $41 \times 10^8 \text{t}$ 碳以二氧化碳的形式存留于大气之中，陆地、海洋系统的回馈作用保持了地球碳收支平衡，而人类活动正逐渐打破这一平衡。

在千年甚至更长的时间尺度上，大气中二氧化碳含量与全球气温变化呈现出严格的线性关联（Mann et al., 1998）（图1.1，图1.2）。现有观测数据表明，人为温室气体的大量排放促使全球平均表面温度（GMST）相对于1850—1900年基线（工业化前水平近似值）升高 $(1.2 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ （WMO, 2020）。如果以当前速度继续上升，该数据有可能在2030—2052年达到 1.5°C （IPCC, 2018）。全球温度升高促使两极冰川加快退缩并使格陵兰岛冰盖表面加速融化，进而对全球水循环产生巨大影响，并且极有可能与已观

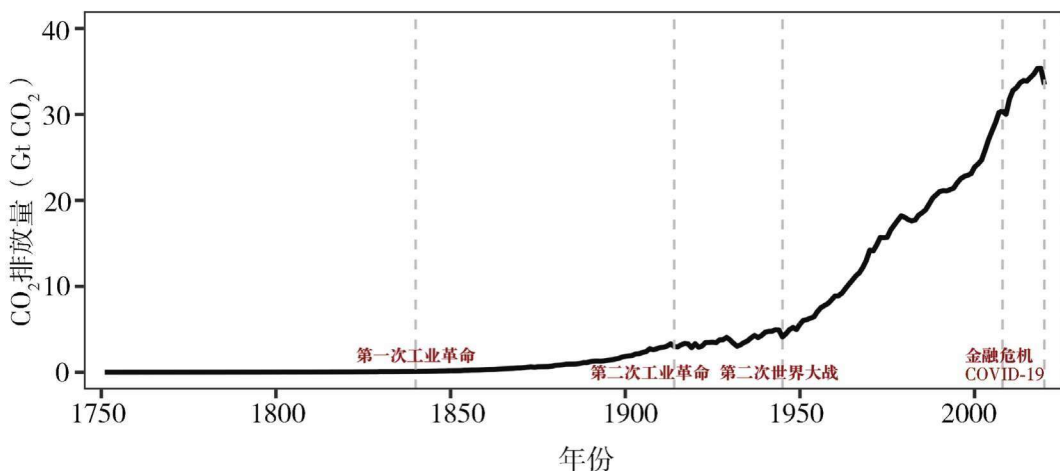


图 1.1 全球 1750—2018 年二氧化碳 (CO₂) 排放量动态变化趋势(相对于 1850—1900 年)
数据来源: Carbon Monitor <http://carbonmonitor.org/>; Friedlingstein et al., 2020

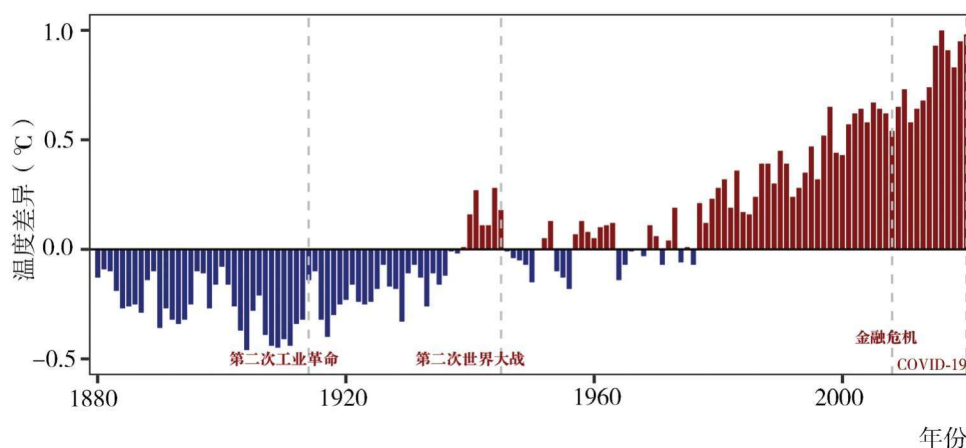


图 1.2 全球 1880—2020 年平均温差（相对于 1901—2000 年）

数据来源：NOAA

测到的全球海洋上层（0~700m）热量增加以及全球海平面的上升直接关联（IPCC，2014）。如对这种趋势不加以遏制，以全球变暖为主要特征的气候变化可能会对全球自然生态、人类社会与经济系统产生难以逆转的深刻影响。

大量研究表明，气候变化可能给自然生态系统，尤其是物种多样性带来难以估量的风险与损失。历史数据反演、全球卫星及气象数据观测（Bond et al., 2004; Francey et al., 2013）、模型模拟（Defries et al., 1999; Defries et al., 2000）以及其他相关数据（Stocker et al., 1997; Caldeira et al., 2003; Chakravarty et al., 2009; Vichi et al., 2011）证明气候风险会对全球生态系统、化学循环和能量平衡等产生深远影响。一方面，气候变化会增加干旱、洪水、飓风、森林火灾及其他极端气候事件的发生频率（Sheffield et al., 2012），全球变暖会加速极地冰盖及冰川的消融（Wigley et al., 1992），从而导致海平面上升与陆地面积减少（Oreskes, 2004）。极端天气及海平面上升引发的生物栖息地丧失与荒漠化（Walther et al., 2002; Thomas et al., 2004）极有可能导致陆地植被与生物多样性丧失（Hughes et al., 2003; Dusenge et al.,



2019)。另一方面，海洋吸收二氧化碳会导致海水 pH 值下降，自工业革命以来，人为温室气体的大量排放已然导致海洋酸化现象的加剧以及海洋含氧量的断崖式下跌（Caldeira et al., 2003），这不可避免地抑制了海洋动、植物的生长与发育，并进一步增大藻类到鱼类等海洋生物灭绝的风险。根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）于 2018 年发布的《全球升温 1.5℃特别报告》可知，在该报告研究所覆盖的近 11 万个物种中，在全球升温 1.5℃情境下，由于半数生物栖息地将因气候因素而减少，因而预计将有 6% 的昆虫、8% 的植物和 4% 的脊椎动物会物种丧失或灭绝。而在全球升温 2℃情境下，预计将有 18% 的昆虫、16% 的植物和 8% 的脊椎动物会物种丧失或灭绝。生物多样性和生态系统服务政府间科学-政策平台（IPBES）在 2019 年发布的《关于生物多样性和生态系统服务的全球评估报告》中同样指出，过去一个世纪的物种丧失与灭绝速度相比于过去 1 000 万年的平均速度增加了 100 倍。如果不采取相应措施，多达 100 万种陆地与海洋生物可能会由于人类活动而灭绝（Brondizio et al., 2019）。

气候变化不仅成为全球自然生态系统的巨大挑战，还对人类社会与经济系统构成了潜在威胁（Watts et al., 2020）（图 1.3）。研究表明，气候变化主要通过以下两个方面对人类社会产生影响。一方面，气候变化造成的自然灾害与极端天气事件（干旱、洪涝、热浪、飓风、低温冷害及沙尘暴等）促使人类健康状况遭受直接与间接的不利影响（Patz et al., 2005）。例如，全球变暖致使热浪天气频发，极端高温天气大幅提高了人类弱势群体热应激相关疾病的发病率与死亡率（Kovats et al., 2008）。此外，暴雨与洪涝灾害增加了以印度与非洲撒哈拉以南为代表的缺少水与环境卫生设施的地区的疾病负担，经水传播的疾病（霍乱和血吸虫病等）的蔓延给全球公共卫生带来了巨大挑战（Haines et al., 2006；IPCC, 2007）。另一方面，气候变化所导致的自然生态系统破坏和资源供应与分配困境可能引发人类社会国家安全与领土争端问题。例如，气候变化引起的海平面上