

序

全球气候变暖已成为全人类面临的共同挑战。积极应对气候变化，推动绿色低碳发展，是我国生态文明建设的核心要义，也是实现中华民族永续发展的必然选择。党中央作出“碳达峰、碳中和”的重大战略决策，为我国经济社会发展全面绿色转型指明了方向，也对各行业、各领域提出了新的时代命题。在此背景下，如何充分发挥水土保持在巩固和提升陆地生态系统碳汇能力中的独特作用、科学量化水土保持对碳汇的贡献、探索其价值实现路径，已成为水利科技工作者必须回答的关键课题。

《水土保持碳汇》一书的出版，恰逢其时。该书作者团队敏锐地把握了这一前沿交叉领域的发展脉搏，围绕国家重大战略需求，开展了系统深入的研究。全书以水土保持林草、工程和耕作三大措施为脉络，构建了水土保持措施的碳汇机理解析、测算方法体系建立，到全国尺度评估、典型项目核算与实践探索的完整逻辑框架，内容充实，结构严谨。

通览全书，笔者认为其突出价值体现在以下几个方面：一是系统性。首次将水土保持措施作为一个整体，系统阐释其对碳循环的影响过程与增汇、固碳、减排的综合功能，填补了该领域系统性专著的空白。二是方法论创新。构建了较为完整的水土保持碳汇测算指标、程序与核算方法体系，为相关工作的规范化、标准化提供了重要技术支撑。三是实践导向。不仅完成了宏观尺度的碳汇量评估，更深入到流域和项目层面，结合碳汇交易等市场机制，探讨了“绿水青山”转化为“金山银山”的可操作路径，体现了研以致用的鲜明特色。

水土保持学与全球变化科学、生态学、土壤学等多学科在此深度融合。该书的成果，不仅深化了我们对水土保持碳汇机理的科学认知，更为水利行业主动融入并服务国家“双碳”战略提供了扎实的科学依据和可行的技术工具。对于推动新阶段水土保持工作从传统的“保水保土”向“保水保土”与“增汇固碳”并重转型升级，助力水利高质量发展，具有重要的理论意义和应用价值。

作者张晓明研究员及其团队长期耕耘于水土保持与流域水沙科学研究一线，治学严谨，勇于探索。该书是他们潜心研究的结晶，也凝聚了相关领域同仁的智

慧。相信本书的出版，能够为水土保持、生态修复、环境管理、碳汇交易等相关领域的科研、规划、管理人员以及高校师生提供一部极具参考价值的专业著作，激发更多学者和实践者对此领域的关注与探索。

俞 书 华

中国工程院院士

2026 年 3 月

前 言

实现碳达峰、碳中和，是以习近平同志为核心的党中央统筹国内国际两个大局作出的重大战略决策，是着力解决资源环境约束突出问题、推动经济社会高质量发展、实现中华民族永续发展的必然选择。贯彻“双碳”决策部署，找准实施路径，是推进新阶段水利高质量发展的重大使命和责任。2021年，《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030年前碳达峰行动方案》明确了“双碳”工作的时间表、路线图，并将“水土流失综合治理”纳入“碳汇能力巩固提升行动”，凸显了水土保持在国家碳中和蓝图中的重要地位。

水土保持是生态文明建设的重要内容、江河治理的根本措施、乡村振兴的重要基础。它通过改变地表覆被与结构、土地利用方式及生态系统经营措施，深刻影响陆地生态系统的碳循环过程。植被的光合固碳与土壤的碳存储是陆地碳汇的两大核心，因此，水土保持是增强陆地碳汇能力的关键途径，是实现碳中和目标不可或缺的一环。科学阐明水土保持措施的增汇、固碳与减排机理，准确量化其贡献，对于提升生态系统碳汇功能、夯实水利行业支撑“双碳”目标的作用具有重大的理论与现实意义。

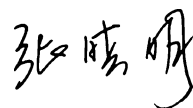
目前，全球及国内的碳汇研究多聚焦于森林、草地、农田等生态系统类型本身，而针对“水土保持措施”这一重要人为管理活动和工程手段所产生的碳汇效应，其系统研究起步相对较晚。对于自然与人为双重驱动下的碳源-碳汇转换机制、水土保持碳汇的明确内涵、标准化测算方法等，行业内尚未形成广泛共识，这在一定程度上制约了水土保持碳汇市场的发展及其对碳中和贡献的精准评价。

为此，本书以“机理-方法-评估-实践”为主线展开。首先，在阐明陆地碳汇概况的基础上，重点揭示了水土保持措施对碳储存、分配及迁移-沉积过程的影响机制，明确了水土保持碳汇的内涵。其次，系统构建了包含测算指标、程序、评估与核算的水土保持碳汇量化方法体系。随后，应用该方法评估了全国尺度下水土保持林草、工程和耕作措施的碳汇量，定量揭示了水土保持对陆地碳汇

的贡献。最后，结合典型流域评估案例和项目级碳汇核算与交易实践，探讨了水土保持碳汇价值的实现路径。

本书的研究成果，有望为深化理解水土保持在碳中和进程中的作用机制与贡献提供科学依据，为水土保持碳汇的监测、核算、交易及管理提供技术方法，从而拓宽“绿水青山”转化为“金山银山”的通道，对区域生态建设与国家“双碳”战略目标的实现具有积极的推动意义。

本书的撰写得益于中国工程院战略研究与咨询项目“黄河上游四川段水源涵养功能修复与保护战略研究（2022-DFZD-26）”和国家自然科学基金项目“黄土高原水土保持碳汇机理与潜力评估（52379082）”等支持，也凝聚了多位同仁的智慧。水利部水土保持监测中心为研究提供了坚实的数据基础，在此表示诚挚感谢。由于水土保持碳汇研究涉及多学科交叉，书中难免存在疏漏之处，恳请广大读者和专家批评指正。



2026 年 3 月

| 目 录 |

序

前言

第 1 章 全球变化下的陆地生态系统碳汇	1
1.1 气候变化、碳排放与气候治理	1
1.2 陆地生态系统碳汇内涵与途径	6
1.3 陆地生态系统的碳汇估算	14
1.4 水土保持对碳循环的影响	23
第 2 章 水土保持碳汇机理与过程	27
2.1 水土保持对碳储存及再分配的影响	27
2.2 侵蚀驱动下土壤有机碳迁移-沉积过程	37
2.3 水土保持对土壤有机碳影响的时空效应	87
第 3 章 水土保持碳汇的计量理论与核算体系	98
3.1 水土保持碳汇内涵与途径	98
3.2 水土保持碳汇能力评估与核算指标体系	105
3.3 水土保持碳汇能力评估与核算流程	106
3.4 区域水土保持碳汇能力评估	109
3.5 项目级水土保持碳汇核算	114
第 4 章 全国水土保持林草措施碳汇评估	115
4.1 水土保持林草措施概况	115
4.2 水土保持林草措施碳汇量	117
第 5 章 全国水土保持工程措施碳汇评估	133
5.1 水土保持工程措施概况	133
5.2 坡面工程措施碳汇	135
5.3 黄河流域沟道淤地坝碳汇	138
第 6 章 全国水土保持耕作措施碳汇评估	146
6.1 水土保持耕作措施概况	146
6.2 水土保持耕作措施土壤增汇	149
6.3 水土保持耕作措施保土固碳和减蚀减排	151

第 7 章 典型流域水土保持碳汇评估与核算 154

 7.1 漓江流域水土保持碳汇评估 154

 7.2 典型治理项目水土保持碳汇核算 186

第 8 章 水土保持碳汇的市场化实践 205

 8.1 国际生态碳汇市场经验与借鉴 205

 8.2 我国水土保持碳汇市场化实践探索 206

 8.3 水土保持碳汇市场化发展的对策建议 208

参考文献 210

附录 水土保持碳汇评估参数取值与调整表 223

第 1 章 | 全球变化下的陆地生态系统碳汇

实现碳达峰、碳中和，是以习近平同志为核心的党中央统筹国内国际两个大局作出的重大战略决策，是实现中华民族永续发展的必然选择。陆地生态系统碳汇能力巨大，巩固和提升其碳汇功能是实现“双碳”目标的重要途径。水土保持通过改变地表覆被和结构、土地利用和陆地生态系统经营措施等方式，深刻影响着碳循环过程，是实现碳中和的重要一环。

1.1 气候变化、碳排放与气候治理

1.1.1 气候变化与碳排放

温室气体排放引起的气候变化已经成为人类可持续发展所面临的严峻挑战。自第一次工业革命以来，全球二氧化碳（CO₂）浓度不断升高。在 1750 ~ 2021 年的 200 多年，大气 CO₂ 浓度从 277ppm^① 上升至 415.7ppm（World Meteorological Organization, 2022）。目前，全球每年的 CO₂ 排放量约为 400 亿 t，其中 14% 来自土地利用，86% 来自化石燃料利用；这些碳排放约有 31% 存留在陆地生态系统中，其余的 46% 和 23% 分别被大气和海洋生态系统所固定（Pierre et al., 2022）。《全球逐日二氧化碳排放报告 2023》指出，尽管在 2019 ~ 2022 年受新冠疫情影响，各国正常经济活动与社会稳定运行受到极大的干扰与限制，导致与生产活动密切相关的 CO₂ 排放在 2020 年大幅下降，但其排放水平仍高于过去 10 年的年平均增长率（Le Quéré et al., 2020）。

急剧增加的 CO₂ 浓度导致全球变暖，与工业革命前相比，全球平均气温已经升高了 1.1℃。从海平面上升、频发的极端天气事件，到海冰迅速融化，世界各个区域均面临着前所未有的气候系统变化，而气温上升将会进一步加剧这些变化。例如，全球气温每上升 0.5℃，极端高温、强降水和区域干旱的发生频率将更高、程度也更为严重。在人类活动影响较少的情况下，热浪平均每 10 年才会

① 1ppm=10⁻⁶。

出现一次；而在平均气温升高 1.5℃ 和 2.0℃ 时，高温热浪出现的频率将可能分别增加 4.1 倍和 5.6 倍。随着全球气候变化成为共识，为有效防止气候变暖进一步加剧，在 2015 年的第 21 届联合国气候变化大会上，近 200 个缔约方一致通过《巴黎协定》，承诺将全球平均温度升幅与工业化前水平相比控制在 2.0℃ 以内，并努力达到升温 1.5℃ 以内的目标。由政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的第六次评估报告（AR6）指出，当前全球 CO₂ 历史累积排放量已经逼近 1.5℃ 和 2.0℃ 温度目标排放预警，占 1.5℃ 情景碳预算的 4/5，占 2.0℃ 情景碳预算的 2/3，粗略估计只有 500Pg C（1Pg=1015 g）的排放空间（谭显春等，2022）。全球变暖已经成为世界公认且备受关注的环境问题。2021 年，在格拉斯哥举行的第 26 届联合国气候变化大会（COP26）上，各缔约国纷纷提出了更具雄心和决心的气候减排方案。

1.1.2 应对气候变化行动

1. 全球减缓气候变化行动

为积极、主动地应对全球气候变化，国际社会开展了一系列意义重大的行动，如建立 IPCC，制定《联合国气候变化框架公约》（United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC）和《京都议定书》（Kyoto Protocol），召开多届缔约方大会并达成多项共识。1992 年《联合国气候变化框架公约》和 1997 年《京都议定书》的通过，开启了全球碳汇研究的序幕。

1992 年，《联合国气候变化框架公约》提出“将大气中温室气体的浓度稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平上”的最终目标。1997 年，第 3 届联合国气候变化大会（COP3）通过的《京都议定书》是全球第一个带有法律约束力的、定量减排温室气体的国际环保协议，其宗旨在于通过国际社会的密切合作降低大气中的温室气体含量以保护环境。它规定，《联合国气候变化框架公约》缔约方（包括发达国家和经济转轨国家）应在 2008 ~ 2012 年的第一承诺期内，将温室气体排放量在 1990 年基础上平均削减 5.2%。其中，欧盟削减 8.0%、美国削减 7.0%、日本削减 6.0%、加拿大削减 6.0%、东欧各国削减 5.0% ~ 8.0%。在《京都议定书》的约束下，每个国家的温室气体（碳）排放权开始成为一种稀缺的资源，也就有了商品的属性。2015 年达成的《巴黎协定》第四条第一款中提出，要尽快达到温室气体排放的全球峰值，并认识到达峰对发展中国家而言需要更长的时间；同时，要在科学和公平基础上加快减排行动，统筹考虑可持续发展和消除贫困的现实需求，力争在 21 世纪下半

叶实现温室气体源人为排放与汇清除之间的平衡。

2. 中国应对气候变化行动

中国是最早制定实施应对气候变化国家方案的发展中国家。2007年6月3日，国务院印发《中国应对气候变化国家方案》，全面阐述了中国在2010年前应对气候变化的对策。这不仅是中国第一部应对气候变化的综合政策性文件，也是发展中国家在该领域的第一部国家方案。2008年10月29日，国务院新闻办公室发布《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书，全面介绍了中国减缓和适应气候变化的政策与行动，成为中国应对气候变化的纲领性文件。

2009年11月25日，中国宣布到2020年单位国内生产总值（GDP）CO₂排放比2005年下降40%~45%的行动目标，并将其作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划。2009年12月18日，国务院总理温家宝在第15届联合国气候变化大会上作出我国政府将实现CO₂减排、增加森林碳汇的郑重承诺。

2011~2014年，在气候治理方面，中国积极推进南南合作，向发展水平较为落后的国家和地区提供力所能及的支持，累计投入2.7亿元以帮助发展中国家提高应对气候变化能力。2014年9月，中国宣布从2015年开始，将在原有基础上把每年的南南合作资金支持翻一番，建立气候变化南南合作基金，并提供600万美元，以支持联合国秘书长推动应对气候变化南南合作事宜。2015年9月，中国宣布出资200亿元人民币建立中国气候变化南南合作基金，用于支持其他发展中国家应对气候变化。2014年，中国单位GDP能耗和CO₂排放比2005年已分别下降29.9%和33.8%。

2013年11月18日，中国发布了第一部专门针对适应气候变化的战略规划——《国家适应气候变化战略》。

2014年9月17日，国务院批复了《国家应对气候变化规划（2014—2020年）》，要求有效控制温室气体排放，努力实现绿色发展、低碳发展。这表明低碳发展以及积极应对气候变化正式上升为国家战略。

2015年4月25日，《中共中央 国务院关于进一步加快推进生态文明建设的意见》提出，增加森林、草原、湿地、海洋碳汇等手段，有效控制CO₂、甲烷（CH₄）、氢氟碳化物、全氟化碳、六氟化硫等温室气体排放。

2015年6月30日，中国政府向联合国气候变化框架公约秘书处提交了《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》。该文件提出，到2030年，中国强化应对气候变化的行动目标是，单位GDP CO₂排放比2005年下降60%~65%，非化石能源占一次能源消费比例达到20%左右，森林蓄积量比2005年增加45亿m³左右等。这不仅是中国作为公约缔约方的规定动作，也是为实现公约目标所能作

出的最大努力。世界自然基金会等 18 个非政府组织发布的报告指出，中国的气候变化行动目标已超过其“公平份额”。

2015 年 9 月 21 日，中共中央、国务院印发的《生态文明体制改革总体方案》提出，逐步建立全国碳排放总量控制制度和分解落实机制，建立增加森林、草原、湿地、海洋碳汇的有效机制，加强应对气候变化国际合作。

2016 年 10 月 27 日，国务院印发《“十三五”控制温室气体排放工作方案》，旨在为完成“十三五”规划纲要确定的低碳发展目标任务，推动我国 CO₂ 排放 2030 年左右达到峰值并争取尽早达峰提供支撑。该方案提出，到 2020 年，单位 GDP CO₂ 排放比 2015 年下降 18%，碳排放总量得到有效控制。氢氟碳化物、CH₄、氧化亚氮、全氟化碳、六氟化硫等非 CO₂ 温室气体控排力度进一步加大，碳汇能力显著增强。

2017 年，中共中央、国务院《关于完善主体功能区战略和制度的若干意见》提出，探索建立蓝碳标准体系及交易机制。

2020 年 9 月 22 日，中国政府在第 75 届联合国大会上提出，中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。

2021 年 3 月 5 日，《2021 年政府工作报告》指出，扎实做好碳达峰、碳中和各项工作，制定碳排放达峰行动方案，优化产业结构和能源结构。

2021 年 9 月 22 日，中共中央、国务院印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，为中国实现碳达峰、碳中和目标制定了“时间表”“路线图”。该文件提出，到 2025 年，绿色低碳循环发展的经济体系初步形成，重点行业能源利用效率大幅提升。单位 GDP 能耗比 2020 年下降 13.5%；单位 GDP CO₂ 排放比 2020 年下降 18.0%；非化石能源消费比例达到 20.0% 左右；森林覆盖率达到 24.1%，森林蓄积量达到 180 亿 m³，为实现碳达峰、碳中和奠定坚实基础。到 2030 年，经济社会发展全面绿色转型取得显著成效，重点耗能行业能源利用效率达到国际先进水平。单位 GDP 能耗大幅下降；单位 GDP CO₂ 排放比 2005 年下降 65.0% 以上；非化石能源消费比例达到 25.0% 左右，风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿 kW 以上；森林覆盖率达到 25.0% 左右，森林蓄积量达到 190 亿 m³，CO₂ 排放量达到峰值并实现稳中有降。到 2060 年，绿色低碳循环发展的经济体系和清洁低碳安全高效的能源体系全面建立，能源利用效率达到国际先进水平，非化石能源消费比例达到 80.0% 以上，碳中和目标顺利实现，生态文明建设取得丰硕成果，开创人与自然和谐共生新境界。

2021 年 10 月 24 日，国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》。该文件聚焦碳达峰目标，对推进碳达峰工作作出总体部署，要求将碳达峰贯穿于经济社会发

展全过程和各方面，重点实施能源绿色低碳转型行动、节能降碳增效行动、工业领域碳达峰行动、城乡建设碳达峰行动、交通运输绿色低碳行动、循环经济助力降碳行动、绿色低碳科技创新行动、碳汇能力巩固提升行动、绿色低碳全民行动、各地区梯次有序碳达峰行动，即“碳达峰十大行动”，建立分领域分行业碳达峰实施方案及保障方案。

1.1.3 碳中和的实现路径

1. 各国碳中和现状

“双碳”行动是应对气候变暖的重要国际行动。根据《IPCC 全球升温 1.5℃ 特别报告》，碳中和定义如下：当一个组织在一年内的 CO_2 排放通过 CO_2 去除技术应用达到平衡，就是碳中和或净零 CO_2 排放。碳中和应从碳排放（碳源）和碳固定（碳汇）这两个方面来理解。碳排放既可以由人为过程产生，又可以由自然过程产生。人为过程主要来自两大块，一是化石燃料的燃烧形成 CO_2 向大气圈释放，二是土地利用变化（最典型者是森林砍伐后土壤中的碳被氧化成 CO_2 释放到大气中）；自然界也有多种过程可向大气中释放 CO_2 ，如火山喷发、煤炭的地下自燃等。然而，应该指出，近一个多世纪以来，与人为碳排放相比，自然界的碳排放对大气 CO_2 浓度变化的影响几乎可以忽略不计。碳固定也包括自然固定和人为固定两大类，并且以自然固定为主。最主要的自然固碳过程来自陆地生态系统。在陆地生态系统的诸多类型中，又以森林生态系统为主要来源。所谓人为固定 CO_2 ，一种方式是把 CO_2 收集起来后，通过生物或化学过程，把它转化成其他化学品；另一种方式则是把 CO_2 封存到地下深处和海洋深处。

近年来，越来越多的国家陆续提出碳中和目标的时间表和路线图。截至 2023 年，全球已有 151 个国家提出碳中和目标，覆盖 92% 的 GDP、89% 的人口和 88% 的排放，90% 的国家将实现碳中和目标的年份设定为 2050 年及 2050 年以后。德国等 13 个国家和地区已就碳中和目标完成立法，爱尔兰等 3 个国家和地区正处于立法进程中。欧洲仍然走在全球净零排放之路的前列。例如，芬兰计划到 2035 年实现碳中和；冰岛和奥地利承诺到 2040 年实现碳中和；德国和瑞典承诺到 2045 年实现碳中和，均先于 1.5℃ 情景下要求全球实现净零排放的年份（2050 年）。大多数作出碳中和承诺的国家都将 2050 年设定为目标年，其中中国、沙特阿拉伯、斯里兰卡、乌克兰、尼日利亚、巴西、巴林和俄罗斯的碳中和目标年份为 2060 年；印度提出于 2070 年实现碳中和。在第 26 届联合国气候变化大会上，不丹和苏里南发起了“负碳”俱乐部，目前贝宁、加蓬、几内亚比

绍、圭亚那、柬埔寨、利比里亚和马达加斯加也都加入了该倡议，这一群体经济相对不发达，温室气体排放量小，并且有较高的森林覆盖率。

2. 中国碳中和实现路径

目前，中国的 CO₂ 年排放总量及其占全球 CO₂ 年排放总量的比例已跃居世界首位，预计到 2030 年可能达到 100 亿 ~ 110 亿 t (Xu et al., 2020)。在此背景下，我国“双碳”目标的量化任务可概括为：如何在维持预期的经济发展目标前提下，通过未来 40 年的努力，采用多种技术途径消纳当前每年约 100 亿 t CO₂ 的人为排放量。

一种具有参考意义的中国碳中和方案是：通过能源转型和工业减排的努力，每年直接减排 70 亿 ~ 80 亿 t CO₂ 的人为排放量，于 2060 年前使直接人为排放量每年降低到约 30 亿 t CO₂ 的水平。针对这部分人为排放量，首先利用生态系统碳汇每年中和 20 亿 ~ 25 亿 t CO₂，再采用工程性碳捕获利用与封存 (CCUS) 技术每年封存 5 亿 ~ 10 亿 t CO₂，以实现人为碳排放与自然和人为碳吸收的碳收支平衡目标 (于贵瑞等, 2022a)。该方案意味着将为国家发展每年留出约 30 亿 t CO₂ 的人为碳排放空间，即以生态系统碳汇巩固和提升来换取维持经济发展和国家安全的基础性人为碳排放量空间。

在各大生态系统类型 (森林、草地、灌丛、荒漠、湿地、农田和城市等) 面前，只有对生态系统碳源汇的研究现状和趋势做到充分了解，才能有效应对提升陆地生态系统碳汇能力所面临的挑战。这一研究有利于更准确、更系统地评估陆地生态系统碳汇能力与潜力，并为其提供研究思路，从而更好地支撑我国碳中和目标行动方案的拟定和实施路径的设计。中国生态系统具有显著的碳汇效应，并蕴藏着巨大的提升潜力，在“双碳”目标实现的过程中将扮演重要角色。通过巩固和提升生态系统碳汇功能，有望为我国工业减排每年保留 20 亿 ~ 25 亿 t CO₂ 的排放空间 (于贵瑞等, 2022b)。生态系统碳汇不仅可以为清洁能源和绿色技术创新与发展赢得宝贵的缓冲时间，更重要的是，可为国家的经济社会系统稳定运行提供基础性的能源安全保障，因此这一举措被认为是中国“双碳”目标行动的“压舱石”和“稳定器”。

1.2 陆地生态系统碳汇内涵与途径

1.2.1 碳汇定义

目前，人们对碳汇还没有严格的定义，较为常见的表述包括：碳汇是指从大

气中清除 CO₂ 的过程、活动或机制；碳汇是发生在某个碳库中的动态过程，是一定时间内碳吸收量和碳排放量平衡的结果。碳源是指向大气中释放 CO₂ 的过程、活动或机制。碳源和碳汇是相对的概念，即碳源是指自然界中向大气释放碳的母体，碳汇是指自然界中碳的寄存体。受纬度、立地条件、地表覆盖以及时间等外界因素的影响，普遍存在碳源与碳汇的转化现象。碳库是碳源和碳汇之间的桥梁。

1. 碳汇

本书采用文献计量分析方法，对国内碳汇领域文献进行了研究，直观地分析了碳汇研究的趋势。数据主要来源于中国知网（CNKI）中的核心期刊、中国社会科学引文索引（CSSCI）和中国科学引文数据库（CSCD）。结合文献被引用情况统计，碳汇各代表性的定义如表 1.2.1 所示。

表 1.2.1 碳汇的代表性定义

引用排名	作者	文献名称	文中碳汇的描述
1	方精云、郭兆迪、朴世龙等	1981 ~ 2000 年中国陆地植被碳汇的估算	当生态系统固定的碳量大于排放的碳量，该系统就成为大气 CO ₂ 的汇，简称碳汇，反之，则为碳源
2	陶波、葛全胜、李克让等	陆地生态系统碳循环研究进展	随着 CO ₂ 浓度的不断升高，陆地生态系统将是人类活动引起碳排放的潜在碳汇，但不同类型植被对 CO ₂ 升高的响应机制各不相同
3	方精云、杨元合、马文红等	中国草地生态系统碳库及其变化	草地碳库与草地生态系统碳库是同义语，主要包括生物量碳库和土壤有机碳（SOC）库；生物量碳库包括地上生物量碳库和地下生物量碳库
4	赵荣钦、秦明周	中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异	汇是指将温室气体从大气中移除的任一过程、活动或机制。固碳是指固定并确保碳储存以免碳排放到大气中
5	曹吉鑫、田赞、王小平等	森林碳汇的估算方法及其发展趋势	当生态系统固定的碳量大于排放的碳量，该系统称为大气中 CO ₂ 的汇，简称碳汇。森林在生长过程中通过同化作用吸收大气中的 CO ₂ ，并以生物量的形式将其长期固定，由此可以判断森林在其生长过程中是一个汇
6	李玉强、赵哈林、陈银萍	陆地生态系统碳源与碳汇及其影响机制研究进展	温室气体“汇”为从大气中清除温室气体、气溶胶或其前体的过程、活动或机制。陆地生态系统净生物群系生产量就是全球变化研究中所使用的碳源与碳汇的概念，可正可负，反映了自然和人类的干扰活动对碳循环的影响

续表

引用排名	作者	文献名称	文中碳汇的描述
7	曲建升、 孙成权、 张志强等	全球变化科学中的碳 循环研究进展与趋向	温室气体“汇”为从大气中清除温室气体、气溶胶或温室气体前体物的过程、活动或机制。全球碳循环的源与汇是以大气圈为参照系，以从大气中输出或向大气中输入碳为标准来确定。全球碳源与碳汇分布极为普遍，由陆地到海洋、由耕地到森林、由自然界到人类社会等都存在碳源与汇。碳源与汇的分布受纬度、立地条件、地表覆盖以及时间等外界因素的影响，普遍存在碳源与汇的转化现象
8	谢高地、 李士美、 肖玉等	碳汇价值的形成和 评价	把生态系统吸收、蓄积 CO ₂ 的过程和机制定义为碳汇的话，那么碳蓄积价值和碳固定价值之和就可称之为碳汇价值。从生态服务功能的视角来看，生态系统一方面能够将大气中的 CO ₂ 固定成有机物，这一过程给人类带来的利益可以称之为碳固定价值。固定的碳以有机物形式储存或蓄积在生态系统中，这一蓄积或储存过程给人类带来的利益可以称之为碳蓄积价值
9	崔俊富、 苗建军、 陈金伟	低碳经济与中国碳汇 发展研究：基于森林 碳汇、土壤碳汇和地 质碳汇的讨论	碳汇是指在一定时期将碳捕获并储存的活动。这种捕获可以是自然过程，如植物的光合作用，也可以是人为过程，如利用碳捕集与封存（CCS）技术将发电厂产生的碳捕获。储存的地点可以是自然的地点，如植物内部，也可以是人类选择的具体地点，如矿井
10	王俊、 李佐军	探索碳汇交易机制实 现生态产品价值：以 深圳市大鹏新区为例	碳汇具有气候调节功能，实质上是一种可交易的生态产品。碳汇一般是指从空气中清除 CO ₂ 的过程、活动和机制，它主要是指载体（森林、土壤、岩石、湿地等）吸收并储存 CO ₂ 的多少，或者说是载体吸收并储存 CO ₂ 的能力

碳汇研究涵盖生态学、林业科学、地球科学、环境科学、资源科学、岩溶学、生态经济、林业经济以及水土保持等领域。因此，碳汇研究具有一定的学科交叉性和系统性。随着研究逐步深入，碳汇研究的内涵渐趋丰富、体系更为庞大、领域逐步拓宽、应用愈发广泛。目前，碳汇的研究领域主要涉及生物碳汇、林业碳汇、草原碳汇、农业碳汇、湿地碳汇、海洋碳汇、矿区碳汇、水泥碳汇和岩石风化碳汇。

综合国际国内碳汇研究领域关于碳汇的定义，本书将碳汇的定义概括如下：碳汇是指从大气中清除 CO₂ 的过程、活动或机制，是森林、草原、土壤、湿地、海洋和岩层等各种载体吸收并存储 CO₂ 的能力和水平。

2. 碳源

《联合国气候变化框架公约》将源定义为向大气中释放产生温室气体、气溶胶或其前体的过程、活动或机制 (Greene, 2000)。通常来讲, 在碳循环研究中, 释放 CO₂ 的库称为源。

温室气体的源有自然源和人为源之分, 自然界中碳源主要是海洋、土壤、岩石与生物体。工业生产、生活等也会产生 CO₂ 等温室气体, 是主要的碳排放源。人为源的增加被认为是目前大气温室气体浓度逐渐上升的主要因素。因此, 碳源可以理解为向大气圈释放碳的通量、过程或系统。具体来说, 碳源是指 CO₂ 气体成分从地球表面进入大气 (如地面燃烧过程向大气中排放 CO₂), 或者在大气中由其他物质经化学过程转化为 CO₂ 气体的成分 [如大气中的一氧化碳 (CO) 被氧化为 CO₂, 对于 CO 来说也称之为源]。在碳源排碳量的估算中, 为避免重复计算, 碳源不包括 CH₄、氟氯化碳等其他含碳温室气体的排放源。

以经济合作与发展组织 (OECD) 和国际能源机构 (IEA) 共同于 1991 年初提交的温室气体清单编制方法的报告为基础, 经联合国 IPCC 等组织合作, 历时五年修改和完善, 最终对碳源进行了较为详尽的分类。主要将其分为能源及转换工业、工业过程、农业、土地使用的变化和林业、废弃物、溶剂使用及其他七个部分。由于联合国 IPCC 的研究是在发达国家的背景下产生的, 对发展中国家的化石燃料和工业发展所涉及的排放状况没有足够的估计。以我国为例, 在能源活动中, 除化石燃烧外, 我国农村很大程度上仍以传统的生物质为燃料。因此, 在 2001 年 10 月国家发展计划委员会国家气候变化对策协调小组启动的“中国准备初始国家信息通报的能力建设”项目中, 正式对温室气体的排放源进行了分类。国家气候变化专家委员会公布碳源分类如表 1.2.2 所示。

表 1.2.2 国家气候变化专家委员会公布的碳源分类

类别	内容
能源相关	(1) 能源生产: 煤炭、石油、天然气开发 (2) 能源加工与转换: 发电、炼油、炼焦、煤制气、煤炭洗选、型煤加工 (3) 能源消费: 农业、工业、交通、建筑、商业、民用
工业生产	(1) 生物质能燃烧 (2) 水泥、石灰、电石、乙二酸、钢铁
土地利用变化与森林	森林和其他木质生物质储量的变化、植物恢复、土壤碳变化以及森林、草地和农田管理

资料来源: 国家发展计划委员会国家气候变化对策协调小组, 2002 年。只列出排放 CO₂ 气体的源类别, 不包括其他温室气体。

3. 碳库

碳库，即碳的储存库，是指在碳循环过程中，地球系统各个存储碳的部分；碳库的大小即称为碳储量，单位面积碳库的大小为碳密度。碳元素在地球生物圈、岩石圈、水圈及大气圈中交换，并随地球的运动循环不止（图 1.2.1）。岩石圈是地球上最大的碳库，含碳量约占地球上碳总量的 99.9%，其碳库中碳活动缓慢，实际上起着储存库的作用。地球上还有三个碳库：大气圈库、水圈库和生物库。大气圈库、水圈库和生物库这三个碳库虽然碳储量较小，但碳活动却十分活跃，其所储存的碳在生物和无机环境之间迅速交换，起着交换库的作用。

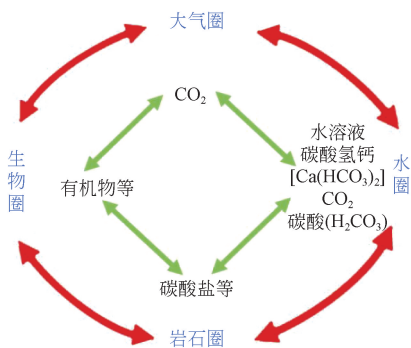


图 1.2.1 碳循环示意图

生物圈包括陆地生态系统和水域生态系统。从生态系统组分来看，陆地生态系统碳库可划分植被碳库、土壤碳库、凋落物碳库。目前，我国陆地生态系统碳库储量约为 89 ~ 100Pg C，植被碳库储量约为 13 ~ 15Pg C，土壤碳库储量约为 69 ~ 92Pg C，土壤碳库是地球陆地生态系统中最大的碳库。从植被类型来看，陆地生态系统碳库可划分为森林、草地、湿地、荒漠和农田等生态系统碳库。其中，森林生态系统碳库是陆地生态系统碳库的主体。

1.2.2 碳汇途径

过去几十年，海洋对人为排放 CO_2 的吸收比例为 23%，这一过程较为稳定。陆地生态系统固碳能力强、碳汇潜力大，根据 CO_2 形成的机理不同，碳汇途径可分为植被碳汇、土壤碳汇、湿地碳汇和地质碳汇等。

1. 植被碳汇

植被碳汇是指通过生物碳的产生和传递过程实现的碳汇。生物碳是指生物体