

编者按：习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。这是中国基于推动构建人类命运共同体的责任担当和实现可持续发展的内在要求作出的重大战略决策。“十四五”是碳达峰的关键期、窗口期。开局之年，我国如何打好实现碳达峰、碳中和这场硬仗？在瞄准碳中和推动碳达峰的社会背景下，全球经济将如何转型？对深圳而言，如何能够更好发挥“双区”叠加效应，实现碳达峰碳中和如何率先示范？对个人来说，如何迈向个人碳中和？围绕这些问题，本刊开设“碳达峰碳中和研究”专栏。这一期推出两篇文章，分别从林业和交通运输业这两个领域，分析探讨实现近期碳达峰及远期碳中和目标的相关路径、技术、政策，为国家和深圳实现碳达峰碳中和战略提供政策建议和解决方案。后期将陆续推出系列文章，以飨读者。

碳中和：基于林业的解决路径研究

周国模 邱亦维 徐 林

摘要：实现碳中和是应对气候变暖的必由之路，通过林业措施增加森林碳吸收是达成碳中和的重要路径之一。文章在简要回顾国内外碳中和目标提出以及基于自然的解决方案相关背景基础上，提出了林业增汇减排路径是基于自然解决方案的重要实施手段之一，分析了基于林业的解决路径中森林碳汇相关的项目方案及实践步骤——通过造林再造林、可持续森林经营管理等达到森林碳固持的增汇方案、减少毁林和森林退化的减排方案、开发利用竹木制品和生物质能源替代的减排方案、森林碳汇监测技术体系研发以及森林碳汇交易和量化生态补偿机制等，研讨基于林业实现碳中和目标的相关路径、政策和技术，为国家碳中和战略提供解决方案。

关键词：碳中和；森林碳汇；基于自然的解决方案；林业解决路径

中图分类号：F326.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1673-5706(2021)05-0037-08

一、碳中和：一个全球共同的愿景

气候变化是当今全球面临的重大挑战之一。

2015年《巴黎协定》提出，2080年实现全球净零排放，将全球平均气温上升控制在低于2℃之内，并努力限制在1.5℃之内。净零排放目标需要实现整体经济活动的源汇相抵，需要在尽可能减少CO₂排放的同时，科学设计“零排放甚至负排放”的各种途径与技术并落实可行的减排方案。这种新的变化和请求对社会经济发展模式带来颠覆性改变，需要兼顾减排目标实现、能源资源安全和社会经济可持续发

展的多重需求，亟需区域、行业（企业）和社会公众的参与，以及整体的系统优化集成提供支撑。

根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的《全球1.5℃升温特别报告》，碳中和是指在一定时期内，一个国家、企业、团体或个人，其二氧化碳的人为排放与人为移除相抵消，实现二氧化碳“零排放”。^[1]人为排放即人类活动造成的二氧化碳排放，包括化石燃料燃烧、工业过程、农业及土地利用活动排放等；人为移除则是人类从大气中移除二氧化碳，包括造林经

营增加的碳吸收、人工碳捕获与碳封存等。该报告强调，只有在 21 世纪中叶实现全球范围内的净零碳排放——碳中和目标，才有可能将全球变暖幅度控制在 1.5℃ 以内，从而减缓气候变化带来的极端危害。然而，联合国环境规划署（UNEP）发布的《2019 排放差距报告》指出，当前各国的减排雄心与 1.5℃ 目标的要求之间存在较大差距。^[2] 为了缩小排放差距，越来越多的国家通过参与碳中和等气候行动强化其减排力度，可见碳中和在国际气候行动的重要作用正逐步凸显，也意味着长期低碳发展策略成为全球共同的愿景。

长期以来，中国积极参与全球气候治理，将温室气体减排任务纳入国民经济和社会发展规划和 2035 远景目标，承诺力争于 2030 年前达到 CO₂ 排放峰值并努力争取 2060 年前实现碳中和，这些都凸显了我国实现碳达峰与碳中和愿景的决心和信心，以及重信守诺的责任担当。通过产业结构调整、能源结构优化与效率提高、增加生态碳汇、碳市场建设等一系列措施，使得中国应对气候变化行动取得了显著成效。然而，我们必须清醒地认识到，实现碳中和并非易事。相比于欧洲、美国等发达国家的历史进程，中国实现碳中和目标，面临时间紧、任务重的严峻挑战，需要用比发达国家更短的时间去实施更大体量的碳中和。那么，中国应该如何走出自己的碳中和道路？作为发展中国家，高质量发展是硬道理，必须科学规划、合理布局，在尽可能大力开展降碳减排的基础上，要充分利用自然生态系统的潜力开展主动增汇、研发“负排放”技术，是实现碳中和目标的重要路径之一。

二、基于自然的解决方案：一个融合科学、政策与实践交叉学科的新术语

基于自然的解决方案（NbS）是建立在先前诸多可持续发展概念之上并演化而来，逐渐发展成为一个综合性的名词，在演化过程中出现的名词或概念都将生态系统视为一个整体，使人们认识到自然不仅改善健康和福祉，同时也可促进经济增长和创造就业。1997 年，学者 Benyus 基于仿生学理论正式提出“基于自然的解决方案”，主要是指受自然界的启发和支持，并复制自然界的系统行动方案，改变以往依赖工业技术手段进行

生态保护与治理的观念，利用自然来应对可持续发展挑战的理念和方式，^{[3][4][5]} 其主要目标是促进可持续城市化、恢复退化的生态系统、减缓和适应气候变化的能力以及提升风险管理能力和弹性。自 2013 年以来，基于自然的解决方案已被广泛采用，并在欧盟研究与创新政策议程中不断推进，以促进自然、社会与经济之间的协同效应。^[6]

从科学的角度来看，NbS 需要链接不同行业的从业者、政策制定者和不同领域科学家，以跨学科的研究方法，与各类利益相关者互动，科学展开和正确评估 NbS 系统内的主要项目以及项目之间的关系对达成系统目标非常重要。从政策和实践的角度来看，NbS 鼓励将环境目标纳入到传统上可能不考虑或不重视环境的政策、产业和实践中，从而增强相关政策和决策中可持续发展的潜力。在全球气候变化及碳中和目标战略背景下，增加对 NbS 的知识技术理解和降低其技术壁垒，制定适应性监测指标和评估，协调政策并促进各部门之间的协同增效，以及创新的合作与治理系统都值得进一步研究和落实。

三、碳中和——基于林业的解决路径分析

以基于自然的解决方案减缓气候变化的潜力日受关注，这反映了自然生态系统作为碳汇来源的重要性。鉴于森林是陆地上自然生态系统最大的活跃碳库，碳吸收潜力巨大，林业碳汇的发展对实现碳中和目标具有重要意义。没有森林生态系统的参与，国家和区域碳中和目标就无法实现，因为社会经济系统不可能有纯粹的零碳排放，只能是自然系统的碳吸收，才能实现“零”排放（碳中和）；而且，林业碳汇也是最优质的碳汇类型，不仅具有多维价值（保护生物多样性和生态系统、增加生计和减少社区贫困），而且经济成本也远低于化石能源的减排（工业减排约 500 元到 700 元的边际成本；林业减排只有不到 100 元的边际成本）。基于林业的解决路径作为 NbS 的重要内容之一，可以通过增加森林面积和提升森林质量，并以竹木产品替代建筑材料及生物能源替代化石燃料以减少二氧化碳排放来助力全球减缓和适应气候变化进程，其增汇的价值也可以通过碳交易市场带来经济收入等协同效益，切实体现其经济和环境的双重资产特性。因

此，林业碳汇对区域平衡经济发展和环境保护之间的关系具有重要意义。科学使用具有多维性和多功能性的林业碳汇，通过经济发展战略、土地使用战略和相关研究投入等一系列措施促进林业碳汇的系统计划和实施，最终实现生态效益和经济效益双丰收的碳中和，将是一种全方位且崭新的路径选择。

依据主要国际组织和机构在推动 NbS 的过程中提出的对林业领域解决路径的认识（见下表），林业经营管理领域应对气候变化的解决路径可以分为八类，分别为造林再造林、减少毁林和森林退化、天然林管理、改善人工林经营、增加使用木质材料、合理使用生物质能源、森林火灾管理以及森林恢复。综合上述林业经营管理领域及政策、技术，将基于林业的解决路径归纳总结为五个方面的内容：森林碳固持的增汇方案、减少毁林和森林退化的减排方案、开发利用竹木制品和生物质能源替代的减排方案、森林碳汇监测技术体系研发、林业碳汇交易和量化生态补偿机制。林业解决方案在增加森林碳汇和实现碳中和目标过程中的重要作用已被广泛认可，然而，基于林业解决路径的认识、实践、政策及技术研究方面还存在诸多障碍和挑战。下面就上述五个方面的内容，进一步深入探讨如何通过林业碳汇服务国家碳中和战略的具体路径与实施方案。

林业领域解决路径内涵

组织机构	林业管理措施	主要目标	协同效应
世界银行	强调造林和再造林、减少毁林和森林退化等	保护生物多样性	气候变化减缓与适应
世界自然保护联盟 (IUCN)	森林生态系统的保护和修复，例如：采取避免毁林和森林退化、恢复和可持续森林经营等	实现森林生态系统增汇减排以及增强气候适应性	保护生物多样性、保护生态环境等
大自然保护协会 (TNC)	森林生态系统的保护、恢复和可持续经营管理，造林再造林、避免毁林、改进天然林经营、人工林管理、避免薪材采伐以及火灾管理等	实现森林生态系统增汇减排，帮助人类和野生生物适应气候变化	保护生物多样性、涵养水源、保持水土、防灾减灾等
欧盟	造林和再造林、改善森林经营管理等方式促进碳储存，恢复和改善森林生态系统	增强生态系统韧性、减缓和适应气候变化、改善风险管理和生态恢复能力等	改善人类福祉、增加自然资本

（一）森林碳固持的增汇方案

我国 2060 年实现“碳中和”目标的基本途径主要有两个：一是通过多种途径减少碳排放，如节能减排、促进低碳能源替代与发展等；二是通过发展工程碳封存和生物碳封存技术增加碳吸收，如碳捕集、利用与封存技术 (CCUS)，造林和再造林以及森林可持续经营管理提升森林生态系统的固碳能力等，其中增加森林碳吸收是最经济、最绿色、协同效益最高的方式。

1. 造林和再造林。

造林和再造林通过增加森林面积，在森林成林前及成林后通过森林植物的光合作用吸收固定大气中二氧化碳并储存在植被、土壤中，从而达到降低大气二氧化碳浓度的成效。造林再造林方案提供了最大且最具有成本效益的基于林业的气候解决方案的减缓潜力。

“十三五”期间，我国加快实施造林绿化和重点区域工程建设，国土绿化行动在全国各地广泛开展，累计完成造林面积 5.29 亿亩。《全球森林资源评估 2020》显示 2010—2020 年间我国森林面积年均净增长量达到 190 万公顷，位居全球第一。第九次（2014—2018 年）全国森林资源清查结果显示，中国森林覆盖率达到 22.96%，实现了连续 30 年森林面积和森林蓄积量的“双增长”。^[7]在国土绿化取得较大成绩的同时，研究表明我国可用于造林的土地仍有约 3000 万公顷，加上退耕还林、退耕还草的土地，共有 4000 多万公顷土地可以用来扩大林草面积。^[8]因此，根据现有森林的提质增效和扩大潜在造林面积的基础上，科学估算出 2010—2040 年中国森林生物质碳储量将增加 8.89—10.37 Pg C，2010—2050 年间森林植被碳储量将增加 13.92 Pg C，预计年均增加速率在 2030 年左右达到峰值约 230.15 Tg C yr⁻¹。^{[9][10][11]}造林和再造林在增加森林地上生物质碳储量的同时，同样可以增加森林土壤碳汇能力。中国森林土壤有机碳库过去 20 年以每年 20 gC m⁻² 的速率增加，1999—2012 年间中国林业工程使得 0—20cm 土壤有机碳库增加了 156 ± 108 Tg C，其中退耕还林和荒山造林的贡献占 90%。^[12]预计到 2050 年，中国造林活动将使 0—20cm 森林土壤有机碳库增加

383 ± 188 Tg C, 其中我国西北、西南和南部地区的贡献约占 80%。^{[13][14]} 目前中国的森林覆盖率仍然低于全球的平均水平(2020 年全球森林覆盖率为 31.0%),^[15] 森林资源质量不高, 森林资源总量仍然相对不足, 且地区间分布不均, 生态系统较为脆弱, 而且不同地区的物种分布、造林方法也会造成森林碳汇在数量上的差别。

2. 可持续的森林经营管理。

《马拉喀什协定》(2001 年第七届缔约方会议)界定的森林经营管理是一种林地利用和管理系统, 是指通过科学的管理措施、合理的经营方式, 维持森林生态系统的健康与活力, 维持生物多样性, 以满足对森林生态产品及其碳汇等生态服务功能的需求。其目的是实现可持续的森林生态(包括生物多样性)、经济和社会功能系统。^[16] 可持续经营管理作为科学合理的经营管理技术, 可以增加森林蓄积, 提高森林质量, 更好地提升森林生态系统固碳潜力。

据 IPCC 第五次评估报告估计, 陆地生态系统中约储存了 2.02 万亿吨碳, 其中 1.15 万亿吨碳储存在森林生态系统中, 占陆地生态系统的 57%。森林是陆地生态系统中最大的碳贮藏库, 维持着全球植被碳库的 86% 和土壤碳库的 39%。第三期(2014—2018 年)中国森林资源核算研究成果表明, 我国现有森林面积 2.2 亿公顷, 森林蓄积 175.6 亿立方米, 森林植被总碳储量 91.86 亿吨; 全国森林全口径碳吸收 4.34 亿吨碳, 折合吸收 15.90 亿吨二氧化碳, 吸收了同期全国二氧化碳排放量的 15.91%; 依据现有森林面积和各龄级的生物量结构特征, 按照年均 0.6%—1.4% 的增长速率, 预测 2060 年中国森林年约吸收二氧化碳最高可达到 21.90 亿吨。根据《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告结果估算, 在 2℃ 温控目标情景下, 2060 年总碳排放 37.56 亿吨 CO₂ 当量(其中已扣除 CCS/BECCS 碳封存量约 7.6 亿吨 CO₂ 当量), 届时, 森林碳吸收量占总温室气体排放量的 66.0%, 可吸收接近 2/3 的温室气体排放。由此可见, 未来森林碳吸收在我国碳中和目标实现过程中将发挥着十分重要的作用, 同时也进一步凸显了森林可持续经营管理的重要性。

目前, 我国森林平均每公顷蓄积量仅 80 多立方米, 要持续加强森林经营管理, 采取科学的森林抚育措施, 建立健康、稳定、高效的森林生态系统, 才能有效提高我国森林碳汇能力。通过对比不同林业解决路径的成本效益发现, 亚洲地区最具成本效益的林业减排路径是森林经营管理。^[17] 以竹林可持续经营管理为例, 通过竹林生态低碳经营, 竹林生态系统植被碳汇量增加, 土壤碳排放量减少, 在增加碳汇量的同时, 增加了竹材生物量。2016 年, 由浙江农林大学林业碳汇科技创新团队作为技术支持, 在浙江省遂昌县和安吉县分别开发毛竹林经营碳汇项目 8636.00 hm² 和 1426.27 hm², 对项目的碳汇收益和竹材收益进行联动分析发现, 遂昌县毛竹林经营碳汇项目每公顷年平均固碳量增加 7.19 吨, 碳汇收益为 237 元, 带来的竹材收益为 1868 元, 竹材收益是碳汇收益的 7.9 倍; 安吉县毛竹林碳汇项目每公顷年平均固碳量增加 6.01 吨, 碳汇收益为 198 元, 带来的竹材收益为 1761 元, 竹材收益是碳汇收益的 8.9 倍; 由此可见, 竹林经营不仅带来额外的碳汇收益, 其竹材收益也更加可观。^[18]

(二) 减少毁林和森林退化的减排方案

毁林活动是《京都议定书》第三条第 3 款和第三条第 4 款中除造林、再造林和森林管理外主要林业活动之一。由于发展中国家的毁林和森林退化导致的碳排放占全球二氧化碳排放量的 1/5, 因此如何减少发展中国家毁林和森林退化所导致的碳排放已成为国际气候谈判的另一个热点。在 2009 年哥本哈根气候峰会和 2011 年德班气候峰会期间, 发展中国家减少毁林和森林退化对其二氧化碳排放量的降低所起到的积极作用得到了广泛的认同, 发挥森林固碳在后京都时代的重要作用方面取得了独特的进展。

毁林活动会造成地上生物量碳储量的减少, 同时造成严重水土流失, 土壤碳库随之减少。通过对比不同林业解决路径的成本效益发现, 减少毁林是拉丁美洲、中东和非洲地区最具成本效益的林业减排路径。^[19] 《中国应对气候变化国家方案》指出, 1980—2005 年中国通过减少毁林活动减少了 4.3 亿吨 CO₂ 的排放。^[20] 同样, 森林退化

也会造成林木固碳能力减弱,病虫害加剧,进而影响森林碳汇等生态服务功能的健康发挥。以竹林为例,近些年来受劳动力成本的上升和竹材价格下降的影响,竹农经营毛竹林的意愿不断下降,很多毛竹林正由集约经营向不移除林下植被和竹筴、不采伐、少挖笋的粗放经营模式逆转变,毛竹林退化趋势越来越明显。毛竹林在退化前期,由于老竹采伐量减少和地表枯落物增多,地上植被碳储量增加了 38.44 t hm^{-2} ,但此时没有隔年采伐的竹材收获,使竹材产品碳库为零。随着竹林年龄结构逐渐趋于老龄化,发笋能力逐渐减弱,退化后期会导致地上植被碳储量减少,使竹林碳源汇动态发生转变。^[20]因此,从森林可持续经营的角度,保护现有森林资源,减少毁林、防止火灾、病虫害等导致的森林退化和死亡,这些都是提升包括森林碳汇在内的森林生态系统服务功能的重要路径。

(三) 开发利用竹木制品和生物质能源替代的减排方案

林业应对全球气候变化除了造林和再造林、森林可持续经营管理及减少毁林和防止森林退化外,开发利用竹木制品及生物质能源替代也是基于林业的解决路径的重要路径之一。如增加使用森林产品来替代高碳能源从而减少 CO_2 排放的过程,这在更大程度上扩大了森林储存碳的空间。^[21]例如,利用可再生绿色生物质能源替代化石燃料可以减少二氧化碳排放;用竹木制品替代钢、水泥、铝、塑料等可以避免能源密集型材料在生产过程中二氧化碳的排放。

竹木材产品作为使用端的间接碳汇,以合成板、竹木家具等各种产品形式储存碳。以中国竹材产品为例,2018 年全国竹材生产量 31.55 亿根,转移至竹材产品中的碳储量达到 1840 万吨,形成了巨大的产品碳库,我国竹林以 2.94% 的面积占比,提供了约 22.5% 的材质资源。因此,增加竹木产品的使用量和延长竹木制品的使用寿命并将其回收利用是减少碳排放的有效途径之一。由竹木材和各类黏合剂制成的工程竹木材,具有更高的物理强度,二氧化碳排放量远低于矿物性建筑材料,且成本更低。根据《巴黎协定》的温室气

体减排承诺及相应的经济管制和贸易政策,比较美国使用木材替代钢铁和混凝土等二氧化碳密集型材料对经济和排放的影响,发现生产木材的二氧化碳强度(每生产 1 美元产品的二氧化碳排放量)比金属制品低 20%,比钢铁低 50%,比混凝土低 25%。此外,使用木材建造,在实现减排的同时,可降低生产成本。^[22]

(四) 森林碳汇监测技术体系研建

森林碳汇形成过程的复杂性决定了森林碳汇监测与计量技术研发的难度,迄今,森林碳汇监测与计量标准体系还在进一步完善中。我国政府高度重视林业应对气候变化工作,自 1998 年以来,已在增加森林碳汇能力、开展森林碳汇项目试点、构建森林碳汇监测与计量技术标准与体系、研发林业碳汇项目方法学等方面开展了大量卓有成效的工作,取得了良好进展。

在森林碳汇精准监测技术方面,国家林业和草原局组织建成了中国森林生态系统定位研究网络,该网络由分布于全国典型森林地段的 103 个森林生态站组成,通过建立长期观测点与观测样地,对森林生态系统的组成、结构、生物生产力、养分循环、水循环和能量利用等在自然状态下或某些人为活动干扰下的动态变化格局与过程进行长期观测,阐明森林生态系统发生、发展、演替的内在机制和自身的动态平衡,为全国尺度上森林碳汇监测提供了全面可靠的科学依据。1973 年建立的国家森林资源连续清查体系以省(区、市)为调查单位,运用数理统计抽样,在全国范围内设置固定样地,并每隔五年进行一次定期复查,掌握各省市的森林资源现状及其消长变化,其数据结果可以为全国和省(区、市)森林碳汇监测与评价提供重要依据。这些森林生态系统定位监测网络和森林资源连续清查体系的建立,为我国森林碳汇功能的准确评估和高频出数提供了重要的技术支撑。

(五) 林业碳汇交易和量化生态补偿机制

林业碳汇发展需要社会各方主体的共同参与,市场化的碳汇交易机制将提高减排降碳的效率,基于森林碳汇的价值和使用价值属性,通过合理定价有助于将气候风险纳入商业成本,消费者基

于价格选择将促使生产者寻求碳排放更少的技术，同时使得各参与方获得更好经济效益，可望形成新的碳使用价值。森林碳汇的精准计量与监测是推动森林碳汇进入碳交易市场、优化林业资源配置的基础。而森林碳汇要开发成可供市场交易的碳汇产品，要有相应的碳汇项目方法学作为技术支撑，是开展林业碳汇交易的前提条件。方法学其实是技术和政策的双重产物，它是受政策引导下的一种计量监测标准。林业碳汇项目方法学对林地的合格性、权属的无争议性、增汇的额外性、效益的多样性都有具体明确的要求，涉及在不同情景下碳汇量的计测预估、对环境与社会经济影响评价和利益相关方分析等等。

为了解决森林碳汇进入碳市场的技术瓶颈，我国开发了《中国温室气体自愿减排方法学》，其中涉及林业的方法学有四个，分别为碳汇造林项目方法学、森林经营碳汇项目方法学、竹子造林碳汇项目方法学、竹林经营碳汇项目方法学。用这些方法学开发的碳汇项目称为 CCER 项目，开发出的碳汇量称为国家核证自愿减排量（英文简称 CCER），这些项目碳汇量可进入全国统一碳市场进行抵排交易。目前，国际上基于不同方法学的林业碳汇项目类型主要有两个：一个是 CDM 项目，是指符合清洁发展机制方法学项目，也称京都市场项目，包含了造林再造林、森林经营两种类别；另一个是 VCS 项目，是指符合国际核证减排标准的方法学项目，涉及林业的方法学有三个类别，分别是造林、再造林和植被恢复（ARR）、改善森林管理（IFM）、减少森林砍伐和退化造成的排放（REDD）。然而，根据现有方法学开发符合国际、国内碳交易市场要求的林业碳汇存在项目类型与技术要求高、审核程序繁复、开发成本较大、可提供的碳汇量受限等问题和实际困难。基于碳中和目标，我们认为需要创新林业碳汇项目方法学，对方法学的合格性、额外性进行重新定义，重新梳理审核程序，开发出适应碳中和背景下市场需求的林业碳汇，我们把它称为“中和碳汇”。

森林碳汇精准计量、监测与评价，也为森林生态价值实现提供了技术保障和科学依据，基于碳汇指标容易统一标准、容易监测、核查和容易

定价的特性，可以制定基于碳汇指标的生态价值量化体系，探索建立基于不同生态区位、经济发展水平的区域间差异化生态补偿机制，更好发挥生态补偿机制对区域绿色低碳发展的促进作用。

四、碳中和——基于林业碳汇项目开发的实践

基于林业实现区域碳中和目标的解决路径有造林再造林、可持续森林经营管理、减少毁林和森林退化以及开发利用竹木制品和生物质能源替代等，在上述森林经营管理的实践过程中，遵循相应方法学设计的林业碳汇项目实践活动，可以开发出能够进入国家碳交易市场的林业碳汇核证减排量，也可达到量化林业生态补偿的目的。

林业碳汇项目开发流程包括项目设计、项目审定、项目注册、项目实施、项目监测、项目核证、项目减排量签发、项目减排量交易等，其中由项目业主或者咨询机构编制项目设计文件（PDD）是整个流程的最核心环节。林业碳汇项目设计文本（PDD）主要包括项目活动描述、基线和方法学应用、项目运行期和计入期、环境影响评价、社会经济影响评价、利益相关方分析和相关材料等。

下面以森林经营碳汇项目开发步骤为例：

森林经营碳汇项目活动描述：主要包括项目目的与项目概述、项目活动的具体地点、项目环境条件、森林经营活动采用的技术与措施、项目业主及申请备案人、项目土地权属和 CCER 权属、土地合格性评估、项目减排量非持久性问题的解决方法。

选定的基线和监测方法学应用：主要包括所采用的方法学、方法学的适用性、碳库和温室气体排放源的选择、项目碳层划分、基线情景识别与额外性论证、项目减排量的事前预估、项目监测计划等。方法学采用国家发改委备案的森林经营碳汇项目方法学。

项目运行期和计入期：主要包括符合碳交易市场规则及方法学要求的项目正式运行期和项目减排量计入期。

项目环境影响评价：主要包括项目权属范围内对环境造成影响的分析与评价。

项目社会经济影响评价：主要包括项目权属

范围内对当地社会经济造成影响的分析与评价。

项目利益相关方分析：主要包括收集当地利益相关方对项目的评论、当地利益相关方的评论概要、关于处理当地利益相关方评论的报告。

项目相关附件材料：包括项目涉及的原始材料等。

五、讨论与建议

为了实现碳中和目标，基于林业的解决路径实现森林增汇减排是一条不可或缺的重要途径，本文重点阐述了森林增汇减排相关路径与方案，简要分析了基于林业碳汇项目开发实践。当然，基于林业的解决路径需要充分理解自然——社会——经济复合生态系统过程，需要各类利益相关者在环境、社会、经济等方面协同配合，并进一步解决好以下几个方面的问题：

政策保障问题：基于林业的解决路径，亟须健全配套相关保障、支持和激励机制，构建自上而下的创新政策。如建立促进竹木替代建筑材料和生物质能源利用的政策，减少能源消耗和生产过程中的碳排放，支持竹木材加工企业的发展；在未来深度减排的情景下，技术的减排潜力将不断收窄，且非二氧化碳温室气体减排的边际成本越来越高，这时应考虑提高林业碳汇减排量在碳排放配额市场的抵消比例，可从目前的5%提至10%以上，提高林业碳汇参与碳市场的积极性。

科技创新问题：建立科学可行的基于林业解决路径的技术标准体系，要在充分考虑生物多样性的同时，深入理解森林增汇减排技术原理，系统评估森林碳库的现存量与潜力，凝练提出森林碳储量评估及其不确定性量化的方法体系，定量分析森林固碳速率及碳汇功能的稳定性和持续性，以及森林生态系统碳固持与碳汇功能的关键过程与调控机制，制定一套科学合理、有效透明、可操作的碳计量监测体系，创新研发林业碳汇项目方法学。

绿色金融支持问题：推进林业碳汇的发展并有效发挥森林固碳的经济效益，需要在完备有效的碳交易市场平台基础上，通过合理的碳定价机制和碳资产融资机制，为企业提供合理的减排成本预期；引导金融机构将低碳、绿色投资的潜在社会收

益纳入其投资和风险管理的考量，促进金融机构业务调整，加大资本市场对低碳转型的支持力度；同时厘清碳中和目标与长期经济增长的相关影响，也要研究进出口贸易对我国碳中和路径的影响，发展适合中国国情的碳中和经济学理论。

公众绿色低碳意识：加大低碳科普知识宣传力度，积极倡导低碳行为，提高公众对应对气候变化、碳中和目标实现路径的认知程度，构建包含林业碳汇教育元素的生态文明教育体系，培养具有林业碳汇专业素养的人才队伍，使全民积极参与到国家碳中和目标战略的实现过程中去。

参考文献：

- [1] IPCC. Global Warming of 1.5 ° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. 2018, V. MassonDelmotte et al. Eds.
- [2] UNEP. Emissions Gap Report 2019. Retrieved April 15, 2020. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30797/EGR2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [3] Benyus J M. Biomimicry: Innovation Inspired by Nature[M]. 1997, New York: William Morrow.
- [4] Cohen-Schacham, E. Walters, G. Janzen, C., et al., In: Iucn (Ed.), Nature-based Solutions to Address Global Societal Challenges. 2016, IUCN, Galnd, Switzerland (pp. xiii + 97).
- [5] European Commission. Horizon 2020 Work Programme 2016-2017-17. Cross-cutting Activities (Focus Areas). Brussels.
- [6] Cohen-Shacham, E. Andrade, A., Dalton, J., et al., Core principles for successfully implementing and upscaling Nature-based Solutions. Environmental Science and Policy, 2019, 98, 20-29.

[7] 林伯强, 中国森林碳汇是实现碳中和目标的重要一环 [R/OL]. 2021-01-18, <https://www.yicai.com/news/100918580.html>.

[8] 朱建华, 绿色发展要闻, 降碳减排在行动 我国森林植被总碳储量已达 92 亿吨 [R/OL]. 2021-01-15, <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1688948064796467708&wfr=spider&for=pc>.

[9] Yao Y., Piao S. Wang T., Future biomass carbon sequestration capacity of Chinese forests [J]. Science Bulletin, 2018, 63: 1108-1117.

[10] He N., Wen D. Zhu J., et al., Vegetation carbon sequestration in Chinese forests from 2010 to 2050 [J]. Global Change Biology, 2016, 23 (4): 1575-1584.

[11] Zhang C., Ju W., Chen J., et al. Sustained biomass carbon sequestration by China's forests from 2010 to 2050 [J]. Forests, 2018, 9 (11): 689.

[12] Yang Y., Li P., Ding J., et al., Increased topsoil carbon stock across China's forests [J]. Global Change Biology, 2014, 20: 2687-2696.

[13] Shi S., Han P. Estimating the soil carbon sequestration potential of China's grain for green project [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2014, 28: 1279-1294.

[14] 方精云, 黄耀, 朱江玲等. 森林生态系统碳收支及其影响机制 [J]. 中国基础科学, 2015, 17 (3): 20-25.

[15] FAO. Global Forest Resources Assessment 2020 — Key findings. Rome. 2020, <https://doi.org/10.4060/ca8753en>.

[16] 侯振宏, 中国林业活动碳源汇及其潜力研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.

[17] 田惠玲, 朱建华, 李宸宇等. 基于自然的解决方案: 林业增汇减排路径、潜力与经济评价 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17 (2): 195-203.

[18] Gu L., Wu W., Ji W. et al., Evaluating the performance of bamboo forests

managed for carbon sequestration and other co-benefits in Suichang and Anji, China, Forest Policy and Economics, 2019, 106: 101947.

[19] 中国国家发展和改革委员会, 中国应对气候变化国家方案 [R/OL]. 2007-06-04, http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/szyw/200706/04/t20070604_11594800.shtml.

[20] Yin J., Geng Z. Deng X., et al. Abandonment lead to structural degradation and changes in carbon allocation patterns in Moso bamboo forests [J]. Forest Ecology and Management, 2019, 449: 117449.

[21] Li, S. Research on Forest Carbon Sinks. Harbin, China: Northeast Forestry University Press, 2006.

[22] Mark Dwortzan. Taking the carbon out of construction with engineered wood [R/OL]. 2019, <https://techxplore.com/news/2019-12-carbon-wood.html>.

作者: 周国模, 浙江农林大学环境与资源学院教授、博士, 浙江省特级专家, 亚热带森林培育国家重点实验室主任, 国家林业和草原局竹林碳汇工程技术研究中心主任

邱亦维, 浙江农林大学国际教育学院副教授、博士

徐林, 浙江农林大学环境与资源学院讲师、博士

责任编辑: 熊哲文