

《陆地生态系统固碳服务功能评估技术规范（试行）（征求意见稿）》

编制说明

标准编制组

二〇二六年八月

目 录

1 项目背景	1
1.1 任务来源	1
1.2 主要工作过程	1
2 标准制订必要性分析	2
2.1 制订标准的法律法规依据	2
2.2 项目相关行业发展概况	3
2.3 我国相关行业需求	4
2.4 相关生态环境管理工作的需要	5
2.5 其他相关行业的需要	6
2.6 国家现有相关标准存在的主要问题	6
3 国内外相关标准情况	7
3.1 国外相关标准	7
3.2 国内相关标准	13
3.3 现行相关标准与本标准的关系	15
3.4 需要进一步加强的内容	16
4 标准制订基本原则和技术路线	16
4.1 基本原则	16
4.2 标准制订的技术路线	16
5 标准主要技术内容	17
5.1 适用范围	17
5.2 规范性引用文件	18
5.3 术语和定义	18
5.4 总则	19
5.5 指标方法体系的依据和科学性	19
5.6 实测方法及选择依据和可操作性	21
5.7 遥感-地面同步观测方法及选择依据和可操作性	24
5.8 模型法及选择依据和可操作性	26
5.9 光能利用率模型及选择依据和可操作性	27
5.10 光合作用生化机理模型及选择依据和可操作性	28
6 与国内外同类标准水平对比和分析	29
7 标准实施建议	30
8 参考文献	31

1 项目背景

1.1 任务来源

本项目于 2022 年 5 月被列入国家生态环境标准项目，于 2022 年 5 月 20 日通过《关于开展 2022 年度第二批国家生态环境标准项目实施工作的通知》（环办法规函[2022]205 号）下达，子项目名称为“生态系统固碳服务功能评估技术规范”，开题论证会后根据专家意见修改名称为“陆地生态系统固碳服务功能评估技术规范”，项目统一编号为 2022-25。本标准由生态环境部卫星环境应用中心、中国科学院地理科学与资源研究所、首都师范大学，共同编制完成。

1.2 主要工作过程

技术规范编制组成员通过调研并系统分析了生态系统野外观测与评估等相关标准，结合国内外相关研究成果，在前期项目研究、文献资料分析和基础调研的基础上，编制组召开了研讨会，讨论并确定了开展技术规范编制工作的原则、程序、步骤和方法，形成了技术规范初稿。

2022 年 1 月-2022 年 4 月，开展需求调研，明确生态系统固碳服务功能评估所涉及的编制目标、评估指标、参数获取方法等。

2022 年 4 月-2022 年 7 月，对国内外生态系统固碳服务功能评估工作，以及我国现有相关的技术标准与规范进行调研；完善并签订项目任务书。

2022 年 8 月-2022 年 12 月，根据调研情况，形成初步的标准编写思路，并召开专家咨询会，向相关专家咨询标准编制工作的总体思路。

2023 年 1 月-2024 年 1 月，结合专家意见以及调研情况，讨论并形成项目开题论证报告以及标准草案，并经过多次讨论修改。

2024 年 2 月-2024 年 6 月，提交《生态系统固碳服务功能评估技术规范》草案和开题论证报告至标准所，按要求修改。根据要求，对标准制订的必要性分析、国内外相关标准研究等内容进一步修改完善。

2024 年 7 月，自然生态保护司在卫星中心组织召开标准开题论证会，标准所技术负责相关同志参会，专家组对标准草案存在问题提出意见，并对下一步改进给予专题指导。

2024 年 8 月-2025 年 7 月，编制组根据开题论证会的专家意见，对国内外生态系统固碳服务功能评估工作，以及我国现有相关的技术标准与规范重新调查研究，明确了生态系统固碳服务功能评估所涉及的编制目标、评估指标、参数获取方法；

2025 年 8 月-2025 年 10 月，编制组根据调查结果征求专家意见，召开编制组讨论会，结合开题论证会和咨询专家意见、讨论结果对评估指标和技术方法体系及内容进一步修改完善，形成目前的标准征求意见稿和编制说明。

2 标准制订必要性分析

2.1 制订标准的法律法规依据

本标准的制修订严格遵循国际公约约定、国家现行法律规定及相关法规文件要求，是对接国际履约义务、落实国家法律条款、响应生态环境管理法规要求的必要举措，其制修订具备充分且坚实的法律法规及国际公约依据。

（1）公约依据

我国作为《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）及其《巴黎协定》的缔约方，肩负着实现碳达峰、碳中和的国际承诺，需向国际社会准确核算并报告陆地生态系统碳汇贡献，履行温室气体排放与碳汇核算的国际履约义务。政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的系列温室气体清单指南，为全球生态系统碳汇核算制定了通用框架和技术原则，是各国开展固碳评估的重要参考依据。同时，联合国千年生态系统评估（MA）框架将固碳服务列为生态系统核心调节服务，明确了固碳功能评估的整体逻辑，为全球生态系统固碳服务评价提供了理论范式。制修订本标准，是我国对接 IPCC 核算规则、契合国际生态系统服务评估框架，保障陆地生态系统固碳评估结果国际可比、支撑国际履约工作的重要技术举措。

（2）法律依据

本标准的制修订以国家现行法律为根本遵循，多项法律条款为陆地生态系统固碳服务功能评估划定了法定要求和工作方向。《中华人民共和国生态环境法典》作为生态环境领域的基础性、综合性法典，系统整合了环境保护、大气污染防治等 10 部现行法律，为固碳功能评估提供了顶层法律支撑。其中，明确要求建立健全生态系统碳汇监测核算体系，开展森林、草原、湿地等碳储量本底调查和评估，要求巩固提升生态系统碳汇能力；要求加强全国生态状况的调查评价，构建生态环境监测网络；将应对气候变化纳入生态环境工作范畴，明确了固碳服务功能评估在气候治理中的法定地位。《中华人民共和国森林法》提出规范森林碳汇核算与交易，要求开展森林生态系统服务功能评估，为森林固碳评估的技术规范制定提供法律支撑；《中华人民共和国草原法》《中华人民共和国湿地保护法》要求量化草原、湿地的生态服务价值，固碳服务功能评估是其核心组成部分。上述法律明确了开展陆地生态系统固碳服务功能评估的法定需求，为本标准的制修订奠定了坚实的法律基础。

（3）法规依据

国家出台的一系列行政法规、部门规章及规范性文件，对陆地生态系统固碳服务功能评估的技术规范制定提出了具体、明确的要求，成为本标准制修订的直接法规依据。生态环境部发布的《全国生态状况定期遥感调查评估方案》（环办生态〔2019〕45 号）明确要求建立全国统一的生态状况调查评估技术规范，涵盖生态系统服务功能评估全领域，为固碳服务功能评估技术规范制修订划定了工作要求；生态环境部等 17 部门联合印发的《国家适应气候变化战略 2035》，要求完善生态系统固碳能力评估体系，提升生态系统适应气候变化和碳汇能力，明确了本标准制修订的核心目标；《碳排放权交易管理办法（试行）》明确了

生态系统碳汇在碳排放权交易中的地位，要求碳汇核算方法符合国家统一技术规范，为本标准的制修订提供了应用场景的法规要求；生态环境部《关于开展 2022 年度第二批国家生态环境标准项目实施工作的通知》（环办法规函[2022]205 号）将本标准项目列入国家生态环境标准制定计划，直接明确了本标准制修订的工作任务和法规依据；各类生态保护修复相关规范性文件，如《生态系统碳汇能力巩固提升实施方案》，要求建立科学的生态系统固碳服务功能评估方法，为生态保护修复成效评价提供量化依据，进一步细化了本标准制修订的技术要求。此外，《森林生态系统服务功能评估规范》《陆地生态系统碳汇核算指南》等国家现行标准的制定原则和技术要求，也为本标准的制修订提供了配套的技术法规参考，保障本标准与现有技术规范体系的衔接统一。

2.2 项目相关行业发展概况

联合国于 2001 年启动千年生态系统评价，于 2005 年发布包括综合报告、评价框架等一系列成果，提出了评价生态系统和人类福祉之间相互关系的框架，建立了多尺度、综合评价其各个组分之间相互关系的方法，对不同生态系统碳储量进行了相应的评价探索，但均未形成国际标准。

陆地生态系统有机碳固定的研究最早起源于美国，20 世纪 90 年代美国能源部开始研究如何将大气中的 CO_2 封存在土壤中，从而降低温室效应的负面影响，并于 2001 年提出了固碳科学（carbon sequestration science）和固碳科学技术（science and technology of carbon sequestration）的概念。美国土壤学会将土壤固碳定义为，碳固定是碳以稳定固体的形式被储存，是通过大气 CO_2 被直接或间接固定而实现的。前者是植物通过光合作用将大气中的 CO_2 转化为植物能量；后者是 CO_2 转化为诸如土壤碳酸盐的过程。而生态系统碳增汇潜力是相对于某个基准水平而言的增加能力，其因选择不同的基准年或基准水平来分析增汇潜力的结果可能是完全不同的。依据估算原理，可大致将目前的估算方法分为碳储量清单法、模型估算法和涡动相关法等。

碳储量清单法，是利用不同植被/土壤类型的碳密度乘以该类型面积得到碳储量，碳密度可以来自文献记录，也可以来自野外调查数据。该方法最早可追溯到 Olson 等于 1983 年建立的全球植被类型的生物量碳密度数据库，随后这种高度简化的植被生物量碳密度的类似方法在国际上被广泛采用。该方法具有直接和技术简单等优点，适用于中小尺度碳源汇的研究，特别适用于拥有多期植被类型（土地利用/覆盖）图或统计数据的研究，其结果对缺乏准确的 CO_2 通量测量数据的区域进行碳储量的估测有一定的参考和借鉴作用，但同时也存在“因基础（采样）数据差异而造成研究结果差距较大”的问题。此外，由于地下生物量测定极其困难，通常采用地上和地下生物量的比值作为经验常数来推测地下生物量，但是这种经验常数的确定本身就已存在很大的不确定性，将其应用于区域碳收支评估会产生较大的误差。

模型估算法作为生态系统固碳量评估的核心技术手段，其技术体系以“数据输入-模型运算-结果验证”为核心，涵盖四类主流方法：经验统计模型基于固碳量与环境因子、遥感指数的相关性构建回归方程，适用于区域尺度快速估算；过程机理模型整合碳循环生理生态

过程,通过参数化碳库通量交换实现长时间序列动态模拟;遥感耦合模型融合多源遥感数据与生态模型,保障固碳量时空连续性;机器学习模型依托算法挖掘海量数据复杂关系,适配复杂下垫面估算需求,四类方法均需以野外实测、遥感、气象、土壤等多源预处理数据为输入,经参数校准运算后,通过实测数据、通量塔观测等验证校正结果;该技术体系的核心优势在于突破野外实测的时空局限,能清晰量化固碳过程机制,兼具高效低成本的特点,且具备情景预测和多源数据融合能力,为不同尺度固碳评估、潜力分析及碳达峰碳中和决策提供科学支撑。模型估算法包括气候模型、遥感反演模型、光能利用率模型和生态系统过程模型等。例如,BEPS、TriPlex及IBIS等生态系统过程机理的模式,可以应用于农业和森林生态系统的固碳潜力分析,这类方法多用于从区域到国家乃至全球尺度,而应用到区域(或更小)尺度会遇到参数的可获得性问题、遥感数据空间分辨率与时间分辨率的矛盾问题、模型可靠性和尺度转化问题等。

涡动相关法,或称为涡动相关通量观测法,其提供了一种直接测定植被与大气间CO₂、水、热通量的方法。涡动相关指某种物质的垂直通量,即这种物质的浓度与其垂直速度的协方差。涡动相关法可测得生态系统长期或短期的环境变量,使人类能定量理解生态系统中水和CO₂的交换过程,能更深入地了解气候变化对生态系统所造成的影响,弥补了生物量清查法、地面同化箱和卫星遥感等测定方法在时间上的不连续及积累数据耗时长等方面的不足,可以在较短的时间内获得大量高时间分辨率的CO₂通量和环境变化数据,为开展不同时间尺度的碳通量变化及其环境响应机理研究提供了方便。该方法目前已在全球范围内得到广泛应用,成为研究森林和草地等植被与大气CO₂交换量最直接而有效的观测方法。然而,涡动相关技术仍是一种小尺度生态系统观测方法,其结果本身还只是代表观测塔周边的生态系统碳收支特征,如果盲目地将站点的观测结果直接外推到更大区域尺度会导致较大的不确定性。

2.3 我国相关行业需求

党的十八大以来,中央对生态文明建设作出一系列决策部署,发布了《中共中央 国务院关于加快推进生态文明建设的意见》《生态环境监测网络建设方案》《中共中央 国务院关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见》等一系列重要文件。开展生态状况调查评估,是落实党中央、国务院决策部署的重要支撑。

2000年以来,生态环境部(原环境保护部、环境保护总局)联合中国科学院等相关部门完成了4次全国生态状况调查评估,分别是2000年全国生态环境调查、全国生态环境十年变化(2000-2010年)遥感调查与评估、全国生态状况变化(2010-2015年)调查评估和2015-2020年全国生态状况变化遥感调查评估。调查评估成果为生态保护红线划定、中央生态环境保护督察、“绿盾”自然保护地强化监督、京津冀和长江经济带等区域生态环境保护规划编制提供了重要支撑。

为落实生态环境部“三定”职责,以及《全国生态状况定期遥感调查评估方案》(环办生态〔2019〕45号)中建立技术规范的要求,制定本标准。2020年2月,自然生态保护司将技术规范报请黄润秋副部长通过生态环境部绿色通道立项,经黄润秋副部长审定,批准技

术规范通过生态环境部绿色通道立项流程。2021 年，生态环境部卫星环境应用中心联合中国科学院生态环境研究中心等单位编制并印发了《全国生态状况调查评估技术规范——生态系统遥感解译与野外核查》等 11 项全国生态状况调查评估系列技术规范，其中包括《全国生态状况调查评估技术规范——生态系统服务功能评估》（HJ 1173），其中规定了包括水源涵养、土壤保持、防风固沙、生物多样性维护等在内的 4 类生态系统服务功能的调查评估方法，未涉及陆地生态系统固碳服务功能。

2022 年 6 月，生态环境部等 17 部门联合印发《国家适应气候变化战略 2035》（以下简称《适应战略 2035》），对当前至 2035 年适应气候变化工作做出统筹谋划部署。《适应战略 2035》以习近平生态文明思想为指导，全面贯彻党的十九大和十九届历次全会精神，完整、准确、全面贯彻新发展理念，统筹发展与安全，在深入评估气候变化影响风险和适应气候变化工作基础及挑战机遇的基础上，提出新阶段下我国适应气候变化工作的指导思想、基本原则和主要目标，进一步明确我国适应气候变化工作重点领域、区域格局和保障措施。政府间气候变化专门委员会（IPCC）于 2022 年 2 月 28 日正式发布第六次评估报告（AR6）第二工作组报告《气候变化 2022：影响、适应和脆弱性》中指出，当前气候变化、生态系统以及人类社会的相互作用以负面影响为主，人类正面临显著的气候变化风险，全球大约有 33 亿至 36 亿人生活在气候变化高度脆弱环境中，大部分物种都展现出其响应的脆弱性，区域间和区域内不同群体的脆弱性也存在着差异。我国农业科学院首席专家高清竹提出，“随着气候变化速率加快，生态系统的自主适应已经达到极限。”

我国 1960 年至 2019 年平均气温增幅达 $0.27^{\circ}\text{C}/10$ 年，气候持续变暖及其导致的极端事件频发对我国的环境和发展条件构成威胁，尤其是在生态脆弱地区，气候变化对植被和水体的不利影响更为严重——在气候变化以及人为活动干扰的双重作用下，我国草原严重退化，湿地萎缩、水质降低、水资源减少甚至枯竭、生物多样性降低、生态系统功能降低甚至丧失。而对于具有公认碳汇作用的陆地生态系统来说，气候变化与陆地植被生长固碳功能发挥的相互影响作用研究就显得更加重要，通过科学、统一的技术方法开展陆地生态系统固碳服务功能评估的需求更加紧迫。目前，基于卫星遥感的宏观生态系统观测方法已相对成熟，基于卫星遥感的陆地生态系统碳循环模型研究成果也不断涌现，基于卫星-无人机-地面联动的、适用于气候变化和生态环境相互作用与影响研究的、多尺度观测与相互印证推演的生态系统固碳服务功能评估技术体系已经基本建立，为本项目的实施奠定了基础。

2.4 相关生态环境管理工作的需要

本标准的制定是以满足生态环境管理工作的需要，可以表现在以下几个方面：

定期开展全国生态状况遥感调查评估工作的需要。《中共中央国务院关于加快推进生态文明建设的意见》、《生态环境监测网络建设方案》（国办发〔2015〕56 号）、《中共中央国务院关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见》等文件均对开展全国生态状况评估作出明确要求；2019 年生态环境部发布的《全国生态状况定期遥感调查评估方案》（环办生态〔2019〕45 号）明确规定要建立技术规范。及时建立行业技术规范，可以指导生态状况调查评估规范化开展，保障调查评估成果质量。本标准的实施解决了传统

评估方法不一、结果偏差大的问题，为生态环境规划、国土空间用途管制提供统一的固碳评估基准，减少因数据分歧导致的管理决策延误。

为履行国家承诺提供评价依据。第七十五届联合国大会（2020年9月22日）上，中国政府提出：“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。”开展生态系统固碳服务功能评估为履行国家承诺提供了测算和评价依据。

服务国家中长期规划。中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年（2021-2025年）规划和2035年远景目标纲要中积极应对气候变化中，明确提出“提升生态系统碳汇能力”的要求。开展生态系统固碳服务功能评估是了解生态系统碳汇能力及其增量的必要手段，服务国家中长期规划。

满足绿色发展新需求。植被固碳量的计算方法已有广泛的研究成果，但不同方法计算的结果差异大，且没有统一的相关标准规范对生态系统固碳服务功能开展评估，难以综合比较。现有关于碳汇计算的标准如国家林业局发布的《造林项目碳汇计量监测指南（LY/T 2253-2014）》仅涉及林木碳汇计算，不能满足不同生态系统固碳功能评估的需求。目前碳汇评估相关标准规范的缺失，不能满足绿色发展新需求。

2.5 其他相关行业的需要

生态系统固碳功能是全球碳循环平衡与生态安全的核心支撑，其重要作用集中体现在四大维度：通过光合作用吸收大气CO₂碳汇；固碳过程与植被生长、土壤肥力维持紧密相关，能增强生态系统生产力和抗干扰能力，保障水文调节、水土保持等生态功能稳定发挥；为碳汇交易市场提供核心标的，推动林业、农业等行业通过提升固碳能力获取碳汇收益，带动低碳技术研发与绿色产业发展；作为实现碳达峰、碳中和目标的关键自然途径，既降低人为减排压力，又能提供清洁空气、生态宜居环境等公共产品，全面支撑社会可持续发展。

陆地生态系统固碳功能评估对林业、农业、环保、能源、规划等多个行业至关重要。其核心体现在为行业发展提供科学依据、优化资源配置和支撑绿色转型：林业领域可精准规划造林育林、森林经营方案，提升森林固碳潜力与碳汇交易价值；农业行业能通过评估优化种植结构、推广低碳农作技术（如秸秆还田、轮作），实现农业固碳与产能提升协同；环保行业可依托评估结果制定碳减排目标、优化生态保护修复方案，支撑生态环境治理与碳达峰碳中和考核；能源行业能结合区域固碳容量合理布局新能源项目，降低项目生态影响并提升绿色低碳属性；国土空间规划行业可通过评估明确生态保护红线、碳汇功能区，实现国土空间开发与固碳功能保护协调，同时为碳汇交易市场、生态补偿机制的建立提供核心数据支撑，推动相关行业向低碳可持续方向发展。

2.6 国家现有相关标准存在的主要问题

我国目前已经形成了国家层面、行业层面、地方层面的不同层级生态系统固碳标准规范。但当评估区域包含多种生态系统类型时，无论区域尺度是全国、省份还是流域等自然地理分区，都会因标准规范的适配性、核算标准的统一性、技术支撑能力局限性、边界界定的不确

定性等多方面问题，出现核算不准、效率低、结果可比性差等情况。总结起来有四个方面的主要问题，具体如下：

标准间适配性差，难以统筹多生态类型核算。首先是生态系统类型覆盖存在盲区且衔接不足的问题。目前我国现行多数标准聚焦单一生态系统，如《竹林低碳经营与碳汇计量监测技术规范》仅针对竹林，《蓝碳生态系统保护修复项目增汇成效评估技术规程（试行）》仅限红树林等三类蓝碳生态系统。而综合型区域往往涵盖森林、农田、湿地、城市绿地等多种类型，这些单一标准难以全覆盖，且不同标准的核算指标、方法差异大，现有标准难以形成统一的核算逻辑。比如林业碳汇侧重生物量碳核算，农业碳汇侧重土壤有机碳，两者无法直接衔接，导致跨类型生态系统碳汇量难以汇总统计。其次是层级标准冲突增加方法和评价结果统筹难度的问题。目前国家级、行业级、地方级标准存在条款不一致情况，如行业标准《林业碳汇项目审定和核证指南》（LY/T 2409 - 2015）与后续国家级同主题标准部分内容存在差异，因此当评价省级功能时，若部分地市采用地方标准、部分参照行业标准，会导致区域内不同片区的核算结果缺乏一致性，难以整合出全省准确的碳汇总量。

尺度适配性不足，难以匹配不同区域范围需求。首先，宏观尺度的标准存在区域核算精度不足的问题。如《陆地生态系统碳汇核算指南》这类国家级标准虽覆盖范围广，但核算方法偏通用，缺乏对不同区域地理特征的细化。评价全国尺度时，难以兼顾青藏高原高寒生态系统、南方湿润森林等差异化区域的碳汇特性，导致核算结果仅能反映整体趋势，无法精准体现区域内部碳汇差异；而评价省份时，通用标准又难以适配省内山地、平原、沿海等不同地貌单元的碳汇核算需求。其次，微观尺度的标准难以推广至大范围区域。地方标准如《青藏高原碳汇造林技术规程》仅适配特定小范围区域，将其推广到其他省份或全国时完全不适用。同时，流域这类自然边界区域常跨越多省，各省份地方标准不同，且没有针对流域的跨区域统一核算规范，导致流域整体碳汇评价只能拼凑各段数据，结果准确性和连贯性差。

数据获取与模型局限性凸显。区域评价需大量时空连续数据，但现有标准依赖的遥感数据与地面监测数据协同不足，偏远区域实测数据匮乏。且核算模型参数本地化验证不足，如CENTURY等模型在不同气候区的适配性差异大，用于评价跨气候带的大区域时，模型估算结果偏差较大。同时，零散林地、城市绿地等小斑块生态系统的碳汇数据难以高效采集，易被区域评价忽略，造成总量核算遗漏。

3 国内外相关标准情况

3.1 国外相关标准

国外针对生态系统固碳服务功能的评价标准和规范，多分散于生态系统服务评估框架、专项生态类型评价体系及权威技术规范中，核心聚焦固碳能力、稳定性及协同生态效益等维度的综合评价，而非单纯碳核算。主要包括以下主要标准或评估体系：

（1）千年生态系统评估（MA）框架

该框架由联合国主导发布，是全球生态系统服务评估的基础框架，将固碳服务归为核心调节服务，强调结合生态系统结构与过程综合评价固碳功能的完整性，而非仅量化碳储量。

其评估指标见表 1。

表 1 千年生态系统评估（MA）指标

指标类型	具体指标	指标说明
固碳核心指标	生态系统碳储量、净初级生产力（NPP）	碳储量涵盖地上生物量碳、地下生物量碳、土壤有机碳及枯落物碳；NPP 反映单位时间内植被固定碳的基础能力，体现固碳的持续供给水平。
固碳稳定性指标	生态系统弹性指数、植被覆盖度年波动系数	弹性指数衡量火灾、病虫害等干扰后固碳功能的恢复能力；植被覆盖度波动系数反映短期气候波动对固碳服务连续性的影响。
协同生态指标	物种丰富度指数、土壤侵蚀控制率	物种丰富度关联生态系统碳循环效率，多样的物种组成可保障固碳过程稳定；土壤侵蚀控制率体现固碳与土壤保护的协同性，避免土壤碳库流失。

该标准优势性明显。一是具有极强的综合性与系统性，并非局限于固碳量单一维度，而是将固碳服务纳入生态系统调节服务体系，关联生态系统结构、过程与人类福利的多链条关系，能体现固碳与物种保护、土壤保护等其他生态功能的协同效应。二是适用范围极广，可覆盖森林、草原、湿地等各类陆地和部分水域生态系统，不受区域和生态类型的限制。三是框架导向明确，为全球各类生态系统固碳服务评价提供了基础逻辑，后续诸多专项评价体系均以其为理论参考。

同时，该标准也具有一定局限性。该框架偏向宏观理论指引，缺乏具体可操作的量化流程，不同区域、不同生态类型的评价者在指标测算时易出现方法差异，导致结果可比性差。同时，框架未考虑不同区域的经济发展水平和生态管理需求差异，对发展中国家或生态脆弱区的针对性不足，难以直接用于项目级的精准评价。

（2）蓝碳倡议（Blue Carbon Initiative）专项评价规范

由联合国环境规划署等联合发起，是红树林、海草床、盐沼等蓝碳生态系统固碳服务的专项评价标准，重点关注潮间带生态系统固碳的特殊性和长效性。其评估指标见表 2。

表 2 蓝碳倡议（Blue Carbon Initiative）专项评价指标

指标类型	具体指标	指标说明
潮间带固碳核心指标	沉积物有机碳储量、碳埋藏速率	沉积物有机碳储量需分层测算（0-100cm 为主），适配潮间带土壤沉积特性；碳埋藏速率以百年尺度计算，反映蓝碳生态系统长期固碳能力。
固碳持续性指标	潮沟密度、植被群落完整度	潮沟密度影响沉积物碳的留存与交换，密度过高易导致碳流失；植被群落完整度（如红树林优势种覆盖率）保障固碳主体的稳定，避免群落退化引发固碳能力骤降。

该标准针对性极强，专门适配红树林、海草床、盐沼等潮间带蓝碳生态系统，充分契合潮间带沉积物碳埋藏、盐度影响等特殊固碳机制。评价指标聚焦长期固碳持续性，创新性设置了碳埋藏速率、潮沟密度等适配蓝碳生境的指标，还关注固碳项目与社区的关联，兼顾生态效益与社会公平。此外，其提出的土壤岩心分层分析、半岩心分用途检测等方法，可一定

程度降低蓝碳储量估算的不确定性。

但该标准也具有一定局限性。如存在显著的技术操作难点，土壤有机碳采样时易因未固结土壤压缩导致储量高估，且分深度切片分析需插值计算，可能引入额外误差。同时，未形成统一的温室气体通量核算标准，甲烷、氧化亚氮等气体的纳入与否会导致估算偏差达0.2~0.4倍。另外，其标准与不同国家的蓝碳司法、碳交易政策对接难度大，各地实操规范差异明显。

（3）美国碳登记（ACR）林业固碳服务评价规范

作为北美权威的林业碳汇登记体系，其评价标准侧重林业固碳服务的可验证性和可持续性，不仅关注碳量，更强调森林经营对固碳服务长效性的支撑。其评估指标如表3。

表3 美国碳登记（ACR）林业固碳服务评价指标

指标类型	具体指标	指标说明
森林固碳核心指标	林分碳密度、固碳速率年增长率	林分碳密度按树种组分类测算（如针叶林、阔叶林）；年增长率反映森林不同生长阶段固碳服务的变化趋势。
经营适配指标	森林龄组结构、采伐强度控制率	龄组结构需均衡（幼林、中龄林、成熟林比例合理），保障固碳服务的代际连续性；采伐强度控制率避免过度采伐导致碳库骤减，确保固碳服务可持续。
监测验证指标	碳储量复测误差率、遥感数据匹配度	误差率控制在10%以内，保障评估结果可靠；遥感数据与地面实测数据匹配度用于验证固碳服务评估的准确性。

该标准兼顾科学性与市场适配性，评价流程与北美碳市场紧密衔接，其核算结果可直接支撑林业碳汇项目获取加州碳市场抵消额度。注重固碳的风险管控，通过聚合项目的地理分散性降低灾害导致的固碳逆转风险，且设置严格的复测误差控制和数据匹配验证规则，保障结果可信度。同时，针对不同树种组制定差异化碳密度测算标准，适配北美多样化的森林类型。

然而，该标准在实际应用过程中存在明显的高估偏差，其采用的核算方法与基于生态系统净交换量的实测数据差异显著，均值远超实测值，且无法识别森林向净碳排放转变的状态。评价体系高度适配北美森林经营模式，对其他大洲的森林类型（如热带雨林、寒带针叶林）的树种特性、经营方式适配性差。此外，对小规模零散林地的评价流程较为繁琐，不适用于碎片化林业固碳项目。

（4）InVEST 模型固碳服务评价技术体系

InVEST 模型是斯坦福大学等开发的生态系统服务评估工具，其碳储存与固持模块已成为全球通用的固碳服务评价技术规范，通过模型整合多维度数据实现量化评价。其评估指标如表4。

表4 InVEST 模型固碳服务评价指标

指标类型	具体指标	指标说明
------	------	------

指标类型	具体指标	指标说明
固碳量化指标	各碳库碳密度、区域固碳总量	涵盖植被、土壤、枯落物等碳库，支持不同生态系统类型的差异化测算；区域总量可实现从地块到景观尺度的固碳服务评估。
时空动态指标	固碳量年际变化率、空间变异系数	年际变化率反映气候变化对固碳服务的长期影响；空间变异系数揭示区域内不同地块固碳服务的差异，为优化固碳布局提供依据。
驱动因子指标	土地利用类型、NDVI 指数	土地利用类型决定固碳基底（如林地与耕地固碳能力差异）；NDVI 指数关联植被生长状况，间接反映固碳服务的动态潜力。

该标准操作便捷性突出，相比其他复杂模型数据需求较低，且不依赖特定 GIS 软件，用户社区广泛，不同层次的使用者均可借助工具开展评价。具备强大的时空分析能力，能输出空间明确的碳储量分布图，支持不同土地利用情景下的固碳服务变化模拟，可为区域固碳布局规划提供直观依据。同时可同步评估碳储存、水源涵养等多种生态服务，便于量化固碳与其他生态功能的权衡关系。

该标准的局限性在于评价精度受基础数据质量影响极大，若缺乏准确的植被碳密度、土壤有机碳等基础数据，结果误差会显著增加。模型以土地覆盖类型为核心评价单元，难以揭示同一地类内部的碳储量空间异质性，评估精细化程度低于部分耦合栅格单元模型。此外，模型对山地等复杂地形的固碳模拟能力不足，且需要使用者具备一定的 GIS 数据处理能力，限制了非专业人员的应用。

（5）欧盟生态管理与审计计划（EMAS）陆地固碳服务评价规范

该计划是欧盟企业和区域生态管理的权威规范，其中陆地生态系统固碳服务评价部分，强调固碳与生态保护、可持续发展的协同性，适用于森林、草原等生态系统。其评估指标如表 5。

表 5 欧盟生态管理与审计计划（EMAS）陆地固碳服务评价指标

指标类型	具体指标	指标说明
固碳基础指标	单位面积固碳量、碳汇持续年限	单位面积指标适配欧盟不同气候区（如北欧针叶林、南欧地中海灌丛）；持续年限需满足至少 30 年的监测周期，保障固碳服务的长效性。
生态协同指标	水质净化贡献率、栖息地质量指数	固碳过程中植被和土壤可截留污染物，水质净化贡献率体现固碳与水文调节的协同；栖息地质量指数关联固碳生态系统对物种的支撑作用。
政策适配指标	固碳措施合规率、绿色认证达标率	合规率对应欧盟碳减排政策要求；绿色认证达标率确保固碳服务符合生态保护标准，避免以牺牲其他生态功能为代价提升固碳量。

该标准高度强调政策适配性，评价指标与欧盟碳减排政策、绿色认证体系紧密挂钩，固碳措施合规率等指标可直接对接区域政策要求。注重固碳服务的长效性，明确要求固碳汇持续年限至少达 30 年，避免短期固碳行为。同时兼顾生态与经济协同，将固碳与水质净化、栖息地保护等生态效益结合，避免单纯追求固碳量而破坏其他生态功能。

其局限性在于，地域适配性局限明显，其指标体系是基于欧盟内部气候区（如北欧针叶林、南欧地中海灌丛）设计的，对欧洲以外的气候和生态类型（如热带草原、亚热带荒漠）适配度低。此外，评价流程需契合欧盟的生态审计流程，其他区域若要采用，需调整以适配本地政策体系，转换成本较高。且对中小企业或中小规模生态项目而言，长期监测和认证的流程复杂，执行难度较大。

（6）IPCC 系列指南

作为全球植被固碳评估的基准框架，《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》涵盖森林、草地、湿地等生态系统，明确了五大碳库（地上生物量、地下生物量、枯死木、凋落物、土壤有机质）的核算规则。其提供分层计量法（Tier1-Tier3），低层级适配数据有限地区的简化估算，高层级结合遥感和实测数据提升精度，还推荐用蒙特卡洛模拟量化数据不确定性。后续更新的指南还融入了碳通量观测等新技术方法，为各国核算提供统一参考。其评估指标如表 6。

表 6 IPCC 系列指南评价指标

指标类型	具体指标	指标说明
方法学配套指标	分层计量等级（Tier1-Tier3）、不确定性量化参数（蒙特卡洛模拟输入）	Tier1 适用于数据有限地区简化估算, Tier3 结合遥感+实测提升精度; 不确定性参数用于量化核算误差
补充技术指标	碳通量（NEE/NPP）	后续更新指南新增，通过观测生态系统碳交换速率，丰富固碳动态评估维度

（7）ISO 相关标准

ISO 13391-2:2025（生物能源-可持续性准则和指标第 2 部分）：聚焦森林碳平衡计算，依据 IPCC 框架建立分层体系，地上生物量用异速生长方程计算，地下生物量通过根冠比推算，同时要求追溯 20 年土壤有机质历史数据，北欧国家借助该标准结合遥感技术，将碳汇量误差控制在±5%以内。其评估指标如表 7。

表 7 ISO 相关标准评价指标

指标类型	具体指标	指标说明
碳库核算指标	地上生物量、地下生物量、土壤有机质	地上生物量采用异速生长方程计算，地下生物量通过根冠比推算，土壤有机质需追溯 20 年历史数据
精度控制指标	碳汇量误差阈值	要求误差控制在±5%以内，需结合遥感技术实现精度达标
项目核证指标	项目固碳增量、固碳量监测频率、数据追溯性参数	聚焦森林等碳汇项目，量化减排/清除增量，明确监测周期与数据可追溯要求，适配碳汇

指标类型	具体指标	指标说明
		交易场景
流程合规指标	监测方案完整性、验证核查记录	规范固碳量测量、监测与验证全流程，确保数据可核查、结果可信

ISO 14064-2（温室气体第2部分）：针对森林等碳汇项目，规范了固碳量的测量、监测与验证流程，是国际碳汇交易中常用的核证标准，确保项目固碳数据可追溯、可核查。

（8）《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）相关机制

旗下清洁发展机制（CDM）的项目方法学手册，强调林业碳汇项目的额外性、可测量性，为项目固碳量核算和减排量核证制定标准；REDD+机制则聚焦森林保护相关的固碳计量，规范了森林参考排放情景建立、碳储量MRV（监测、报告与核查）等核心环节，适配全球森林固碳项目的规模化评估。其评估指标如表8。

表8 UNFCCC 相关机制评价指标

指标类型	具体指标	指标说明
项目资格指标	额外性参数、森林参考排放情景参数	CDM 机制核心指标，用于判定碳汇项目是否产生额外固碳量，排除自然增长等非项目贡献
计量监测指标	森林碳储量、MRV（监测/报告/核查）关键参数	REDD+机制核心，规范碳储量动态监测、数据报告格式及第三方核查标准，适配全球规模化森林固碳评估

（9）全球树木碳汇标准（Global Tree C-Sink Standard）

该标准用于人工造林和自然造林的植被固碳认证，不仅要求年度核查固碳量以避免无效碳汇信用，还包含现场检查、树木健康监测等环节。同时融入生物多样性保护要求，优先保护乡土树种，禁止导致森林退化的行为，兼顾固碳效果与生态平衡。其评估指标如表9。

表9 Global Tree C-Sink Standard 评价指标

指标类型	具体指标	指标说明
固碳效果指标	年度固碳量、固碳信用有效性参数	用于人工造林/自然造林固碳认证，需年度核查固碳量，避免无效碳汇信用
生态协同指标	树木健康状况、乡土树种占比、生物多样性保护达标率、森林退化风险系数	兼顾固碳与生态平衡，要求优先保护乡土树种，禁止导致森林退化行为，需同步监测树木健康与生物多样性

3.2 国内相关标准

在我国，生态系统固碳相关标准研究很早就开始了。生态系统固碳标准规范已形成覆盖国家、行业、地方三个层级，涵盖陆地、蓝碳等多生态类型的体系，既针对性适配不同场景的碳汇计量与增汇需求，也存在适配性、普适性等方面的局限。

（1） 国家标准

a) 《森林生态系统服务功能评估规范》（GB/T 38582-2020）

该标准的核心评估指标是：林木生物量碳、林下植被生物量碳、枯落物碳、土壤有机碳，同时将释氧作为关联指标配套评估；辅助指标涵盖林分类型、林龄、立地条件等，用于区分不同森林单元的固碳能力差异。评估中会结合这些指标，采用生物量法等计算实物量与价值量。该标准是聚焦森林固碳服务评估的专项国标，明确将固碳释氧纳入 9 项核心评估功能，界定了相关名词术语，还提出了行政区划、优势树种组等四级分布式测算方法。其数据来源涵盖森林资源、生态连清及社会公共数据，能精准匹配我国森林生态系统的特点，可支撑全国或区域尺度森林固碳量的精细化核算，同时能为气候谈判等提供科学数据支撑。该标准的局限性在于：适用范围仅限森林生态系统，无法用于草地、农田等其他生态类型的固碳评估。且评估参数多基于典型森林类型设定，对于荒漠边缘稀疏林、城市人工林等特殊森林类型的固碳测算适配性不足，易出现结果偏差。

b) 《生态系统评估 生态系统服务评估方法》（GB/T 43678-2024）

该标准中固碳功能的指标为固碳量，即生态系统吸收二氧化碳合成有机物质，将碳固定在植物和土壤中，降低大气中二氧化碳浓度的功能。采用生物量法、固碳速率法和净生态系统生产力法计算固碳量。其中，固碳速率法中固碳量为森林及灌丛、草地、湿地和农田生态系统固碳量之和，但是每种生态系统类型的植被固碳速率和土壤固碳速率均为固定参数，没有考虑动态变化。

c) 《陆地生态系统碳汇核算指南》（GB/T 46105-2025）

该标准适用范围广，涵盖森林、农田、草地等各类陆地生态系统，采用库差别法、损益法、质量平衡法计算碳汇量，明确了核算方法、数据质量管理和报告内容，能为全国尺度碳汇资源时空分布调研提供统一技术依据，是陆地碳汇核算的基础性标准。该标准的局限性在于：对城市、灌丛等特殊生态系统的核算细节提及较少，且核算依赖多源数据，不同区域数据质量差异易导致结果不确定性，同时难以兼顾各生态系统的地域特异性参数调整需求。同时，该标准用于碳汇核算，并不是专门评估生态系统服务功能的标准。

d) 《森林植被固碳释氧生态功能气象评价等级》（QX/T 714-2024）

针对森林植被，以净生态系统生产力（NEP）为核心构建评价体系，用碳转化系数 3.67 将 NEP 转化为 CO₂ 当量，还细分 8 类树种生理参数，结合 CO₂-水分-温度耦合模型提升计算精度，适用于碳汇交易基准值核定等场景。

e) 《林业碳汇项目审定和核证指南》(GB/T 41198-2021)

是我国首个林业碳汇领域的国家标准,明确森林碳汇项目的审定与核证要求,规范了数据采集、处理和验证的全流程,保障项目固碳数据的可信度。

(2) 行业标准

a) 《森林生态系统碳储量计量指南》(LY/T 2253-2014)

指标体系覆盖森林生态系统五大核心碳库,针对性极强。具体包括乔木层地上/地下生物量碳(如树干、根系的碳储量)、灌木层与草本层生物量碳、枯落物碳(不同分解状态的凋落物含碳量)、枯死木碳(枯立木、粗木质残体等碳储量)、土壤有机碳(地表特定深度内矿质土和有机土中的含碳量)。同时配套木材基本密度、根冠比、生物量扩展系数等辅助指标,用于精准换算碳储量。该标准可用于天然林、人工林等不同类型森林,既能支撑小范围小班尺度的碳储量测算,也能通过数据汇总实现省级、区域级森林碳库摸底,为早期林业碳汇项目开发提供了基础测算依据。该标准的局限性在于:核心聚焦“碳储量”静态测算,对一定周期内林地碳汇增量(如造林后碳储量增长)的核算方法界定模糊,难以直接适配碳汇交易中“可交易碳汇量”的测算需求,且该标准用于碳汇核算,并不是专门评估生态系统服务功能的标准。

b) 《林业碳汇项目审定和核证指南》(LY/T 2409-2015)

作为林业行业早期碳汇核证标准,为地方中小规模林业碳汇项目提供了灵活的核查依据,适配行业内多样化的碳汇项目类型。但该标准与后续发布的国家标准存在部分条款冲突,且核证指标较粗放,难以满足当前碳市场对碳汇数据精准性的高要求。同时,该标准用于碳汇核算,并不是专门评估生态系统服务功能的标准。

(3) 地方标准

a) 《生态系统碳汇计量与监测体系建设技术规范 第1部分:森林碳汇计量与监测方法》(DB 54/T 0498.1-2025)

该标准针对性解决西藏森林碳汇计量无统一标准的问题,适配高原森林生态系统特点,细化了区域内森林碳汇调查、监测及数据质控流程。该标准地域适配性过强,难以推广至其他气候、地形区域,且依赖本地实测数据,数据积累不足时易影响评估精度。且该标准用于碳汇核算,并不是专门评估生态系统服务功能的标准。

b) 《青藏高原碳汇造林技术规程》(DB 54/T 0497-2025)

该标准聚焦青藏高原特殊生态环境,规范了该区域碳汇造林的技术要求,助力高原生态修复与增汇协同推进。该标准适用范围狭窄,仅适配青藏高原,对其他高海拔区域的参考价值有限,且未考虑高原气候变化对造林碳汇持续性的影响。且该标准用于碳汇核算,并不是专门评估生态系统服务功能的标准。

3.3 现行相关标准与本标准的关系

本标准与国内现行相关标准是理论框架与落地实践和通用逻辑与专项细化的互补衔接关系，既存在重合的核心内容，也有各自的定位差异，具体可从覆盖范围、指标方法、应用场景三个维度展开分析：

（1）覆盖范围方面

本标准是陆地生态系统固碳服务的通用逻辑框架，覆盖所有陆地植被类型（森林、草地、农田等），提供“目标-指标-方法”的整体思路；而国内现有标准是针对特定生态系统或场景的专项细化落地。现行相关标准与本标准重合点在于：国内标准的核心指标（如碳储量、NPP）、基础方法（如实测法、模型法）均契合本标准的逻辑，如 GB/T 38582-2020《森林生态系统服务功能评估规范》中的“森林碳储量”对应体系的“生物量-碳储量差”指标。现行相关标准与本标准的差异点在于：本标准是“全类型通用”，国内相关标准是“分类型专项”。如 GB/T 43678-2024《生态系统评估 生态系统服务评估方法》是对多生态系统适配细化。

（2）指标方法方面

本标准是指标与方法的维度指引，明确了固碳服务需从“生物量、生产力、碳通量”三个维度评估，并匹配实测、模型等方法类型；国内现有标准则是对这些维度和方法的实操性细化。在指标层面，本标准提出碳储量差、NPP、NEP、NEE 等评估指标，国内标准根据不同生态系统类型补充了具体的测算细则（如 GB/T 38582-2020 明确了森林“乔木层生物量碳”的测算公式，是对生物量指标的细化）。在方法层面，本标准提出“实测法、模型法、涡动相关法”的方法分类，国内标准则细化了各方法的操作流程（如 LY/T 2253-2014《森林生态系统碳储量计量指南》明确了“地面实地测量”的样地设置、采样频率，是对“实测法”的专项规范）。

（3）应用场景方面

本标准是固碳服务评估的应用方向指导，指出可用于生态修复、碳市场等场景；国内现有标准则是针对具体场景的适配性调整。现行相关标准与本标准的重合点在于：两者的应用场景核心均围绕固碳服务的量化与价值转化，比如本标准提到的“碳汇交易支撑”，对应国内《林业碳汇项目审定和核证指南》的碳市场适配规则。现行相关标准与本标准的差异点在于：本标准是泛场景指导，国内标准是特定场景适配——例如《蓝碳生态系统保护修复项目增汇成效评估技术规程（试行）》是体系在蓝碳修复场景的适配，补充了“受损修复区碳增量核算”等场景专属规则；而《陆地生态系统碳汇核算指南》则是在全国尺度碳汇项目核算场景的落地，明确了区域汇总的统计规则。

综上，国内现有标准则是在不同生态类型、场景下的专项应用，本标准的制定目标是兼具通用性、全面性、易用性——两者有各自的适用范围，但鉴于本标准的制定从全国、省域、

区域评估要求出发，因此可以为国内相关领域标准提供框架性指引。

3.4 需要进一步加强的内容

总体上，现有国内标准存在指标覆盖不完整、维度单一的问题。多数标准（如 GB/T 38582-2020）侧重碳储量、NPP 等核心指标，但对固碳稳定性、协同生态效益等维度涉及较少（比如未明确固碳速率年波动系数、生态系统弹性指数等指标）；同时蓝碳、城市植被等特殊生态系统的固碳指标（如潮沟密度、城市绿地碳交换动态）缺乏专门的设计。同时，现有国内标准的方法体系存在尺度局限、技术单一的问题。方法层多聚焦样地实测、通用模型，缺乏小尺度精准化、大区域高效化的技术衔接（比如基层部门难以快速开展区域固碳评估，科研级评估缺乏本地化模型参数）；同时涡动相关法、遥感-地面同步观测的技术能力已经具备，但规范未充分落地。此外，现有国内标准还存在生态类型覆盖不全的问题，尤其对城市绿地、农牧交错带、河口湿地等复合生态系统的固碳评估标准缺失，难以支撑这类区域的固碳服务评价。

4 标准制订基本原则和技术路线

4.1 基本原则

本标准制订遵循规范性、可操作性、经济性、先进性原则。

（1）规范性原则

建立标准化的评估体系，明确方法适配规则，确保评估流程、数据处理、结果表述的一致性避免随意性，让同一区域、不同生态系统、不同时段内生态系统植被固碳服务功能的评估结果具备可比性。

（2）可操作性原则

充分考虑全国层面、省级层面技术能力、工作积累等方面的差异，通过指标和方法的分层设计、评估流程的拆解实现，降低操作门槛，让评估方法易于落地执行和推广。

（3）经济性原则

兼顾评估成本与技术可达性，提供低成本选项与高成本但高效等评估方法选项，根据评估预算灵活选择。

（4）先进性原则

在传统方法基础上，整合遥感、过程模型、通量观测等前沿技术方法，增强评估的精准度与大尺度应用能力，同时与全球碳循环评估体系接轨，提升评估结果的科学性与前瞻性。

4.2 标准制订的技术路线

具体技术路线见图 1。



图 1 标准制订的技术路线

5 标准主要技术内容

5.1 适用范围

本标准规定了陆地生态系统固碳服务功能评估的总则、指标体系、方法选取等要求。

本标准适用于全国、省级行政区和其他有评估需求区域的陆地生态系统的固碳服务功能评估。

5.2 规范性引用文件

本标准共 12 个引用文件。所引用的规范性文件涵盖了卫星遥感、陆-气通量观测、生态系统调查、碳汇核算、激光雷达及多光谱遥感数据处理等多个技术领域的国家与行业标准，为陆地生态系统固碳服务功能评估的技术实施提供了全面、系统的规范支撑。

5.3 术语和定义

（1）陆地生态系统 terrestrial ecosystems

陆地上生物与其环境通过能量流、物质流、信息流形成的功能整体。

该术语来源于 GB/T 46105《陆地生态系统碳汇核算指南》。

（2）固碳服务功能 carbon sequestration service

陆地生态系统通过光合作用吸收大气中的二氧化碳，合成有机物质，将碳固定在植物和土壤中，降低大气中二氧化碳浓度的调节服务功能。

该术语参考碳循环领域中固碳速率的通用研究表述。明确主体为生态系统中植被整体，并补充含地上、地下部分。强调是固定碳的总量，而非生态系统整体碳储量变化。

（3）碳汇 carbon sink

从大气中清除二氧化碳和甲烷等导致温室气体效应的气体、气溶胶或它们初期形态的任何过程、活动和机制。

该术语来源于 GB/T 46105《陆地生态系统碳汇核算指南》。

（4）碳源 carbon source

向大气释放二氧化碳和甲烷等导致温室气体效应的气体、气溶胶或它们初期形态的任何过程、活动和机制。

该术语来源于 GB/T 46105《陆地生态系统碳汇核算指南》。

（5）生态系统固碳速率 ecosystem carbon sequestration rate

单位时间内单位土地面积生态系统净固定并长期储存在生态系统的碳量。

该术语定义来源于 LY/T 3253-2021《林业碳汇计量监测术语》。明确转移物质为二氧化碳，而非笼统的碳元素。限定转移场景为从一个库向另一个库，并保留单位时间单位面积的量化维度。

（6）碳储量 carbon stock

特定时间陆地生态系统碳库中储存的碳的数量。

该术语定义来源于 GB/T 46105《陆地生态系统碳汇核算指南》。

(7) 净生态系统生产力 net ecosystem productivity (NEP)

指植物净初级生产力减去异养呼吸消耗的有机碳量,即光合作用固定碳量与生态系统总呼吸量的差值。

该术语定义来源于 GB/T 46105-2025《陆地生态系统碳汇核算指南》。

(8) 净生态系统二氧化碳交换量 net ecosystem exchange (NEE)

指陆地生态系统与大气之间的 CO₂ 通量差值,反映生态系统对大气 CO₂ 的吸收和释放能力,即单位时间单位面积上碳通量的净平衡值。

该术语定义来源于《陆地生态系统通量观测网络技术规程》。简化了表述,聚焦陆地生态系统与大气之间的 CO₂ 通量差值,剔除横向碳通量等复杂因素。补充单位时间单位面积上碳通量的净平衡值的量化说明,明确核心属性。

5.4 总则

本标准以服务全国生态状况调查评估为根本原则,旨在为全国范围内各类生态系统植被固碳服务功能评估提供统一遵循,通过标准化、分层化、低成本适配与技术创新的协同设计,实现评估工作的科学有序开展。

本标准具体明确:建立统一的评估体系与方法适配规则,保障不同区域、生态系统、时段的评估结果可比;结合不同层级技术能力差异,拆解流程、分层设计指标与方法,降低操作门槛以利于推广落地;提供多元评估方法选项,兼顾成本与技术可达性,适配不同预算需求;整合遥感、过程模型、通量观测等前沿技术,提升评估精准度与大尺度应用能力,同步对接全球碳循环评估体系,确保评估结果科学、前瞻且具备广泛适用性。

5.5 指标方法体系的依据和科学性

(1) 体系层级与核心逻辑

生态系统固碳功能可以用固碳速率、碳储量、碳汇强度、碳周转率、碳库稳定性指数等指标来评价。碳储量是生态系统长期固碳的存量,直接由历史时期的固碳速率累积形成,同时受碳周转率和碳库稳定性影响——周转率越低、稳定性越高,碳储量累积越显著。固碳速率是动态过程,它和碳汇强度定义最接近,是单位时间内碳的增量,直接决定碳储量的变化趋势。碳周转率是循环效率,反映碳在各碳库间的转移速度(如凋落物分解、土壤碳更新),间接影响固碳速率和碳储量。碳库稳定性指数体现碳储存的安全度,与碳周转率负相关,同时放大固碳速率的长期价值。用固碳速率评价生态系统固碳功能的优势。

本标准规定的陆地生态系统固碳服务功能以生态系统固碳速率作为评估指标,它可以直观反映动态变化,能直接体现生态系统当前的固碳活跃程度,比静态的碳储量更易判断固碳功能的实时趋势(如造林后固碳速率提升、退化草地固碳速率下降)。固碳速率指标更适合短期评估需求,无需长期监测碳储量累积,短期内即可获取数据,贴合 GB/T 41198 中碳汇项目增汇量核算的需求。固碳速率便于量化对比,且指标维度统一(时间+碳量),可直接

对比不同生态系统（森林和草地）、同一生态系统不同时段（修复前和修复后）的固碳能力差异，无需额外归一化处理（如面积、气候校正等）。固碳速率易通过遥感、通量观测、模型模拟等技术获取，适配 QX/T 714、IPCC 指南等标准的核算逻辑，数据获取与应用成本低、可操作性强。

本标准规定陆地生态系统固碳服务功能评估指标生态系统固碳速率通过清单法、模型法和涡度相关法获得。其中，清单法适用具有较好实测条件且具备时间连续实测数据的情况；模型法适用全国或省域等大尺度评估且已掌握光能利用率或植被光合作用生化机理模型的情况；涡度相关法适用已同时具备通量观测设备和涡动数据处理能力的情况。本标准规定的评估程序如图 2。

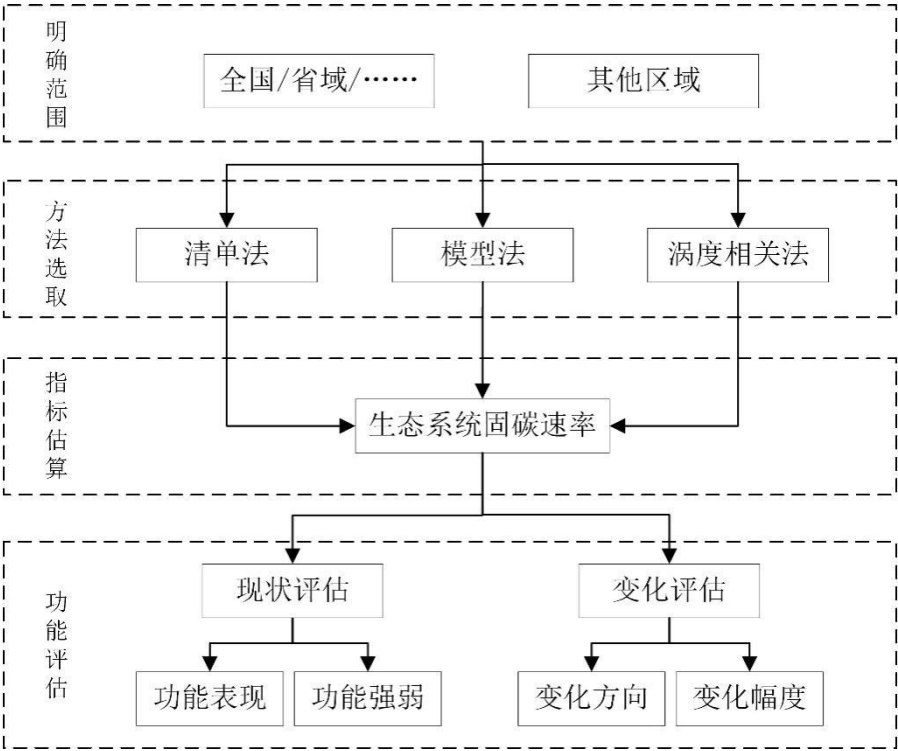


图 2 陆地生态系统固碳服务功能评估程序图

本标准依托成熟技术体系，无明显技术壁垒，且具有有力的数据支撑，评估可根据自身情况选择定期开展的地面调查数据、全国生态状况调查评估生态观测数据、已建成的国家生态监测网络数据、高分卫星遥感数据、气象站点网络数据等，无需额外搭建数据采集体系。本标准整合的光能利用率模型（CASA）、生化机理模型等均为行业成熟方法，参数校准、模型运行的技术流程已形成共识。现有遥感处理软件（ENVI、ArcGIS）、模型运算平台（Google Earth Engine）可直接支撑标准实施。本标准本地化适配能力强，通过建立本地化参数库（如不同区域树种的固碳参数），可解决通用技术在复杂地形、特色植被中的适配问题，提升技术应用的精准度。

（2）明确范围

作为流程起点，先确定评估的空间尺度，根据全国生态状况变化调查评估工作要求，可

选择全国/省域/.....（行政或特定区域）或其他区域，为后续方法选择和评估划定空间边界。

2. 方法选取

基于选定的范围，提供三类生态系统固碳速率的估算方法：清单法——通过编制碳收支清单核算生态系统固碳量；模型法——借助生态系统碳循环模型模拟固碳过程，当涉及多区域横向对比时，原则上采用模型法开展评估；涡度相关法——结合大气边界层湍流输送原理，通过监测净生态系统二氧化碳通量（NEE）估算固碳速率，适合配备长期连续微气象观测的站点（如森林、草地、农田通量塔）。不同方法适用于不同的数据基础和评估目的，评估者可根据实际需求，在清单法、模型法或涡度相关法中择优采用单一方法进行指标计算并开展评估。三类方法的结果共同指向生态系统固碳速率的评估指标。

3. 指标估算

核心输出是生态系统固碳速率，整合三种方法的核算、模拟或观测结果，得到评估固碳功能的关键量化指标。

4. 功能评估

基于生态系统固碳速率，从两个维度开展评估：现状评估——聚焦当前状态，拆解为功能表现（固碳功能的实际输出特征）和功能强弱（固碳能力的相对水平）；变化评估：聚焦时间维度的动态变化，拆解为变化方向（固碳功能的趋势性演变，如增强/减弱）和变化幅度（功能变化的量化程度）。整个流程从空间范围界定出发，通过多方法协同完成核心指标估算，最终实现对生态系统固碳功能的现状诊断与动态趋势评估，覆盖了“范围-方法-指标-评估”的完整技术链条。

5.6 实测方法及选择依据和可操作性

通过实地调查区域内各类植被生态生理参数，开展生态系统植被固碳服务功能评估。包括地面实地测量和遥感-地面同步观测两种方法。具体估算方法：以区域在某一时段内植被碳储量的年均变化量作为碳收支评价指标，评估陆地生态系统植被固碳服务功能。当碳储量变化量为正值时，植被表现出碳汇功能；当碳储量变化量为负值时，植被表现出碳源功能。

（1）地面实地测量

适用于通过地面实地测量获取区域内植被碳储量。各时刻植被碳库是该时刻区域内乔木、灌木、草本、枯死木、凋落物等五类植被碳库之和。该方法的核心逻辑（分碳库求和+地面实测）符合陆地生态系统碳循环的物质分类规律：植被碳库通常划分为活体植被（乔木、灌木、草本）与死有机质（枯死木、凋落物）两类，这是国际生态学领域对植被碳库的经典分类方式，通过分库测量再求和，能完整覆盖植被固碳的所有物质载体，避免碳库遗漏。

国际标准 IPCC《2006 年国家温室气体清单指南》（第 4 卷：农业、林业和其他土地利用），该指南明确将陆地生态系统植被碳库划分为地上生物量（乔木、灌木、草本）、地下生物量、枯落物、枯死木等类别，要求分库核算后汇总为植被总碳库，是全球碳核算的基础标准。

国内权威技术规范《陆地生态系统碳汇核算指南》（GB/T 46105-2025）是我国最新发布的国家标准，明确规定植被碳库包括乔木层碳库、灌木层碳库、草本层碳库、枯死木碳库、凋落物碳库，且要求采用地面实地测量法分库测算后求和，与该方法完全一致。《造林项目碳汇计量监测指南》（LY/T 2253-2014）同样将森林植被碳库分为乔木、灌木、草本、枯死木、凋落物五类，规定地面实测需分库采样、分别换算碳储量后汇总。《中国森林生态系统碳储量与碳循环》（方精云等，2007）是国内森林碳循环领域的经典成果，采用分碳库实地测量+求和的方法测算全国森林碳储量，验证了该方法在区域尺度的科学性与可行性。

a) 乔木碳储量计算

适用于森林、湿地等生态系统类型中的乔木，通过地面实地测量获取区域内乔木每木检尺进而估算碳储量。依照 HJ 1167 进行样地样方设置和每木检尺。按照优势物种对样地内所有乔木胸径、树高等信息进行归类，选择与树种对应的生物量异速生长方程，计算样地内所有乔木器官生物量及个体总生物量。

该方法的核心依据是行业标准+科学模型，确保计算的规范性和科学性。依照 HJ 1167 进行样地、样方设置与每木检尺，同时参考《立木生物量模型及碳计量参数》行业标准，明确了生物量异速生长方程、含碳系数的选取规则，保证了方法的合规性。同时，本标准采用生物量异速生长方程（通过胸径、树高与生物量的统计关系）计算乔木各器官生物量，再结合含碳系数换算为碳储量，这是林业碳计量中成熟的科学方法（生物量→碳储量的转化逻辑）。

本标准选用的乔木碳储量计算方法通过每木检尺（逐株测量胸径、树高）+分树种、分器官计算，细化到单株乔木的不同器官（叶、枝、干、根），减少了统一估算的误差，因此具有较高的精准度。该方法计算流程清晰（样地设置→每木检尺→生物量计算→碳储量换算），且对未发布标准的树种提供了树形近似替代的方案，覆盖了多数常见乔木，因此可操作性强。该方法依赖实地测量数据和公开行业标准参数，计算过程的每一步（样地面积、生物量方程、含碳系数）都有明确来源，便于核查与复现，因此结果可追溯。

b) 灌木碳储量计算

适用于森林、灌丛、草地、湿地等生态系统类型中灌木碳储量的实地测量。参照 HJ 1167 进行样地样方设置。通过实测灌木植被群系碳密度等信息，采用累加法估算灌木碳储量。

该方法的核心依据是行业标准+生物量-碳转化。参照 HJ 1167 进行样地样方设置，确保采样流程的规范性。本标准采用生物量→碳储量的转化逻辑；采用生物量碳转换系数，默认取 0.5，即植被碳计量中常用的经验系数，研究表明，植物（包括灌木、乔木等）的干物质中，碳元素占比通常在 45%~55%之间（不同树种、器官会略有差异，如针叶树含碳率略高于阔叶树），而 0.5 是该区间的中间值，能作为多数植被的平均含碳水平，因此被用作通用经验系数，目前大量森林、植被碳计量的学术研究以及国际碳循环研究中，均默认以 0.5 作为生物量-碳储量的转换系数。本标准同时考虑了样地坡度对面积的影响（用坡面面积×坡度的余弦，换算为投影面积），保证了面积计量的准确性。

本标准选用的灌木碳储量计算方法适用于森林、灌丛、草地、湿地等多种生态系统的灌

木，覆盖场景广，适用程度高；本标准通过碳密度×群系面积的累加逻辑计算总碳储量，同时样地投影面积默认取 25m²（常用标准样方面积），降低了实地测量的复杂度，因此操作简便；本方法同时还考虑实际地形，引入坡度修正面积（坡面→投影），避免了地形起伏对碳密度计算的误差，结果更贴合实际。

c) 草本植物碳储量计算

适用于森林、灌丛、草地、荒漠、湿地等生态系统类型中草本植物碳储量的实地测量。参照 HJ 1168 进行样地样方设置。采用实测草本植物各部分碳密度，采用面积加权累积法估算碳储量。

草本植物碳储量计算方法的依据是行业标准+分维度计量。首先，本方法参照 HJ 1168 进行样地样方设置，确保采样流程的规范性。其次，本方法采用分维度计量逻辑，将草本碳储量拆分为地上活体、地下根系两部分，覆盖了活体草本植物碳储存的全组分。同时碳密度计算通过生物量×含碳率换算碳密度，含碳率采用直接测定法（元素分析仪实测）是国际通用的植物碳含量精准测定方法，保证了参数的准确性。分层计量时将地下根系按 0~100cm 土层分层（7 个层次），符合草本根系在土壤中的分布规律，提升了地下碳储量的测算精度。

本方法具有全面性和精准性。同时覆盖地上、地下根系（同时还分层），完整捕捉了草本植物的碳储存组分，避免了传统方法只测地上部分的偏差。本方法含碳率采用元素分析仪实测而非经验系数，减少了估算误差；地下根系分层测量也更贴合实际分布，精度更高。本方法适用于森林、灌丛、草地、荒漠、湿地等多种生态系统的草本，通用性强。

d) 枯死木碳储量计算

适用于森林、灌丛等生态系统类型中枯死木碳储量的实地测量。通过实地调查获取区域内枯死木腐烂等级、体积、密度等参数进而估算碳储量。枯死木包括枯死立木和枯死倒木（直径≥5cm）两类，按照枯死木的形态、等级进行分类，根据不同腐烂等级（轻度、中度、重度）体积、密度以及相应的碳含量估算其碳储量。

将枯死木分为枯立木（直立枯死）、枯倒木（倒伏枯死，直径≥5cm），是基于枯死木的实际存在形态，覆盖了森林中主要的枯死木质残体类型。将枯死木的腐烂等级按轻度、中度、重度划分，是依据木材分解的物理特征（砍刀是否陷入、木材完整性），不同腐烂程度的木材密度、含碳量差异显著，分类测算更符合实际。

碳储量的计算公式通过体积×密度×含碳量计算，是基于物质质量的基本逻辑（质量=体积×密度），再结合实测含碳量（元素分析法）换算为碳储量，符合碳计量的科学原理。含碳量采用元素分析法，依据是《生态环境监测技术规范》中植物/木材含碳率的直接测定方法，保证参数精准性。

本方法区分枯立木、枯倒木，同时按腐烂等级细化，避免了不同类型/分解程度枯死木的碳储量混算误差；腐烂等级的密度、含碳量均对应实测值（而非统一经验值），更能反映

枯死木分解过程中的碳变化。本方法还涵盖了森林中主要的枯死木质残体（直径 $\geq 5\text{cm}$ 的枯倒木+枯立木），完整捕捉了枯死木碳库。

e) 凋落物碳储量计算

凋落物碳储量的计算采用“实地收获凋落物+含碳量换算”的方法，参考国际与国内权威标准/规范。如 IPCC《2006 年国家温室气体清单指南》（第 4 卷：农业、林业和其他土地利用）明确凋落物碳储量可通过实地采样（收获法）获取生物量，再乘以含碳系数计算，是全球碳核算的基础方法；国内国家标准：《陆地生态系统碳汇核算指南》（GB/T 46105-2025）规定凋落物碳库采用收获法采样，测定生物量后乘以含碳量系数（或元素分析法实测含碳量）计算碳储量。

本方法流程简单清晰，仅需样方布设、凋落物收获称重、含碳量测定三个核心步骤，无需复杂仪器或模型，基层监测人员经简单培训即可操作。本方法成本可控，采样工具（样方框、天平）和含碳量测定（元素分析仪）的设备/耗材成本较低，适合大范围区域的批量采样。收获法是凋落物生物量测定基准方法”，适用于森林、草地、灌丛等各类陆地生态系统的凋落物碳库核算，普适性好，且结果可重复验证，数据可靠性有保障。

5.7 遥感-地面同步观测方法及选择依据和可操作性

本方法主要参考由本编制组成员生态环境部卫星环境应用中心、首都师范大学共同编制的《森林地上生物量遥感监测技术规范（征求意见稿）》，该技术规范从卫星影像选择及处理、样地调查、样地总地上生物量计算、升尺度聚合、区域地上生物量遥感估算等方面，规定了基于遥感的森林生态系统地上生物量调查技术规范。

本方法选择目标卫星影像并进行预处理工作；基于待估算区域的卫星影像，将该区域森林类型划分为针叶林、阔叶林和针阔混交林，针对每种森林类型至少设置一个典型样地；随后，在各样地内设置代表性样方，通过每木调查获得样方内树种组成及其胸径和树高信息，并根据异速生长方程计算样方内森林地上生物量；利用样方内森林地上生物量信息以及样方范围机载点云数据，建立样方-样地的森林地上生物量估算模型，对样地森林地上生物量进行估算，得到样地森林地上生物量空间分布图；将样地森林地上生物量空间分布图进行升尺度聚合，使其与目标卫星影像的空间分辨率一致，利用聚合后的样地森林地上生物量和卫星多光谱遥感指数，建立区域尺度的森林地上生物量估算模型；最后，结合森林类型分类结果，估算区域范围各森林类型的森林地上生物量，得到区域范围不同森林类型的地上生物量空间分布图。本方法技术流程见图 3。

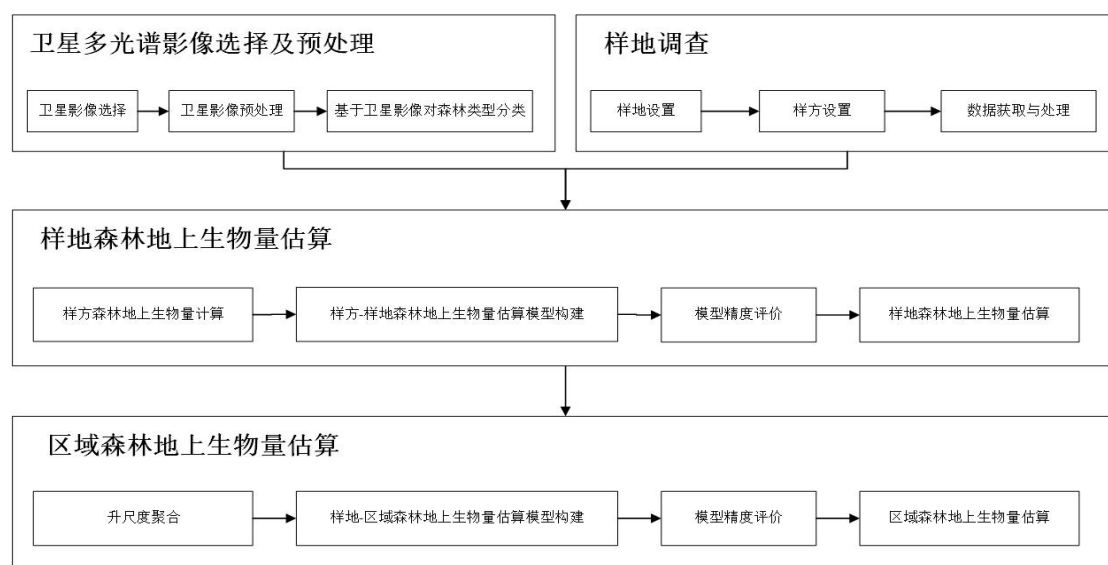


图3 遥感-地面同步观测方法工作原理

本方法的选取理由主要是机载激光雷达和地面激光雷达在森林生物量测定方面的技术发展现状和成功应用案例。

近十年，机载激光雷达技术朝着多源数据融合与大范围动态监测发展。结合无人机、星载遥感数据，构建了从单木到全国尺度的森林资源信息提取体系。例如北京大学团队结合机载激光雷达与人工智能技术，首次系统性揭示中国森林树木总数及分布特征，将地面森林资源信息获取效率提升十倍以上。同时，该技术还用于分析森林对气候变化的响应，如监测高大树种因气温升高产生的水分胁迫效应，让生物量监测不仅限于数量估算，更延伸到生态功能评估。十年来，基于地面激光雷达的胸径提取精度和自动化程度持续提升。Hackenberg 利用扫描数据构建的模型可检测直径小于 1cm 的树枝，间接提升了胸径测算的连带精度；Huang 通过迭代算法拼接矩阵，结合滤波方法分离地面与植被，提取的胸径平均误差仅 0.76cm。此外，该技术与 AI、大数据融合，实现了生物量的无损、动态监测。例如通过多站扫描拼接，解决复杂林况下的遮挡问题，配合算法自动生成生物量数据，广泛应用于森林经营管理、碳汇核算等场景，成为地面森林生物量精准监测的核心技术之一。

本方法的核心逻辑是卫星遥感大范围覆盖+样地调查精准校准，是森林生物量估算的经典技术路径。其中，多光谱影像的植被指数（如 NDVI、EVI）可有效关联森林生物量，这一理论源于 Tucker（1979）提出的植被指数-生物量相关关系，后续研究也进一步证实多光谱遥感可支撑区域尺度生物量估算。样地实测（或激光雷达精细参数）是提升遥感估算精度的关键，这一方法被许多研究证实——通过地面激光雷达样地获取树高、胸径等参数，可显著降低卫星遥感的估算误差。

激光雷达技术是连接卫星大范围覆盖与样地精准校准的核心纽带，它的作用是替代/补充传统人工实测，获取样地内单木的树高、胸径、树冠体积等精细三维参数，为样地生物量估算提供基准级数据。技术规范《森林生态系统碳储量计量指南》（LY/T 2253-2014）明确地面激光雷达可用于样地单木参数的高精度测量，其树高、胸径提取精度可达 95%以上。

Lefsky 等人（2002）的研究证实，激光雷达获取的树高数据与实测值的决定系数（ R^2 ）超 0.9，远高于传统样地调查的人工测量精度。以激光雷达获取的样地精准生物量为真值，校准卫星多光谱遥感的植被指数-生物量关联模型，可以有效降低遥感估算的系统误差，如 Du 等人（2023）通过地面激光雷达样地数据和卫星多光谱影像构建的生物量模型，决定系数（ R^2 ）比单纯依赖人工样地的模型提升 20% 以上。此外，《陆地生态系统碳汇核算指南》（GB/T 46105-2025）要求遥感模型需通过高精度样地数据验证，激光雷达样地数据是当前最权威的验证数据源之一。

激光雷达可覆盖样地-小区域尺度，其获取的冠层高度、生物量数据，可作为卫星遥感与地面样地之间的过渡层，解决卫星像元与地面样地的尺度不匹配问题。河北木兰林管局 5000 公顷林区的生物量制图中，机载激光雷达数据既补充了卫星遥感的冠层细节，又衔接了地面激光雷达的单木参数，使区域估算误差控制在 10% 以内（中国林科院资源所，2025）。加入激光雷达后的样地数据从人工粗测升级为三维精测，激光雷达替代人工实测树高、胸径，不仅降低了野外工作强度，更使样地生物量的测算误差从传统的 15%~20% 降至 5% 以内，为后续模型构建提供了更高质量的校准基准。与此同时，遥感模型从经验关联升级为结构驱动，传统卫星遥感模型依赖植被指数-生物量的经验关系，而激光雷达提供的森林三维结构参数（如冠层高度、体积），可让模型更贴合生物量的物理形成机制，提升模型在不同林分类型、地形条件下的通用性。

5.8 模型法及选择依据和可操作性

本标准选择模型法评估植被固碳功能主要考虑以下两方面原因。

（1）模型法具有公认的科学性

模型法多以光合作用关键生理过程为核心构建。例如光能利用率模型以 Monteith 提出的光能利用率理论为基础，该理论通过农作物实验证实植被净初级生产力（NPP）与吸收的光合有效辐射（APAR）呈线性正相关，植被累积生物量就是太阳辐射被植冠截获、吸收和转化的结果。像 VPM 模型还进一步细化，将植被冠层吸收的光合有效辐射拆分给叶绿素和非光合物质，仅聚焦叶绿素吸收的光能这一对光合作用有效的部分，贴合植物光合作用的生物化学本质。模型通过设置调节系数或模块，量化温度、水分等环境因子对光合作用的调控作用。如 VPM 模型中的 T_{scalar} （温度）、 W_{scalar} （水分）调节系数，可动态反映环境条件对最大光能利用率的影响；改进的 BEPS 模型整合了水分平衡模块，能同步模拟辐射传输、碳同化与水分胁迫的关联，契合干旱区水分限制光合作用、低温区温度制约酶活性等生态规律。因此，模型法从叶片到生态系统的尺度转换中，衔接了总初级生产力（GPP）、NPP、生态系统呼吸等关键碳通量，实现多尺度碳循环过程耦合。比如 C-FIX 模型能同时估算 GPP、NPP 和净生态系统生产力，清晰呈现光合作用固碳、呼吸作用释碳的完整过程，为生态系统固碳服务评估提供连贯的量化逻辑，这是传统观测难以实现的系统性量化。

（2）模型法评估固碳功能已具备一定成熟度

多款核心模型经过数十年发展，已在全球不同生态系统中验证适配。如 CASA 模型作

为光能利用率模型代表,被广泛应用于城市、草原等不同区域的 NPP 估算;VPM 模型自 2004 年验证后,陆续在森林、农田、高寒草甸等十余种生态系统中开展研究,可精准模拟不同植被的生产力季节动态。生物地球化学模型中的 BIOME-BGC、CENTURY 等,也能适配森林、草原等多种生态系统,描述光合作用、营养循环等复杂过程。当前模型可高效整合卫星遥感数据(MODIS 的植被指数、FPAR 等)、气象再分析数据和通量塔观测数据。例如,彭思源等搭建的光能利用率集成模型,结合遥感与气象数据,与 FLUXCOM 的 GPP 数据相比皮尔逊相关系数达 0.97;BEPS 模型更是实现 30 米分辨率的高精度 GPP 模拟,解决了传统模型空间分辨率不足的问题,满足精细尺度固碳评估需求。主流模型的核心算法和参数体系已形成行业共识。如 C-FIX 模型中光合有效辐射占太阳入射总量的比例固定为 0.48,VPM 模型可通过通量塔数据计算不同植被类型的最大光能利用率;BIOME-BGC 模型被用于欧洲山地森林、温带森林等不同区域的碳储量模拟,其标准化的参数校准方法让不同研究的结果具备横向对比可能。

本标准同时提供光能利用率模型和光合作用生化机理模型,主要原因是两个模型对应不同评估目标和应用场景——

光能利用率模型更适用于大尺度、快速化、宏观评估。这类模型(如 CASA)以光能吸收-转化的整体关联为核心,无需深入光合生化过程,依赖遥感和气象数据即可实现区域/全国尺度的 NPP/GPP 快速估算。适合研究宏观固碳格局分析、长时序变化监测、多区域对比,比如评估全国生态系统固碳总量、分析近 30 年土地利用变化对碳汇的影响等等。

生化机理模型更适用于精细化、机理化、深度解析。这类模型聚焦 RuBP 羧化-氧化等核心生化过程,能量化 Rubisco 酶活性、电子传递速率等生理参数,适合研究目标是“揭示固碳机制、分析逆境影响、精准参数校准”的场景,比如探究干旱如何通过抑制光合酶活性降低固碳能力、筛选高光效作物品种。

5.9 光能利用率模型及选择依据和可操作性

光能利用率模型是估算植被生产力的核心方法,它以光合作用能量转化为核心,认为植被净初级生产力(NPP)或总初级生产力(GPP),取决于植被实际吸收的光合有效辐射(APAR)和光能转化效率(光能利用率 ϵ)。光合有效辐射(APAR)是植被从太阳辐射中捕获的、可用于光合作用的能量,通常通过植被指数(如 NDVI、EVI)反演的植被覆盖度/吸收比例(FPAR)结合太阳总辐射计算。光能利用率是植被将吸收的光能转化为有机物质的效率,存在物种特异性的理论最大值,实际值会被温度、水分、养分等环境因子调控,模型通过调节系数量化这些约束。

光能利用率模型的优势在于:第一,生理机制明确,直接贴合光合作用光能吸收-转化-物质累积的核心过程,科学性强。第二,数据易获取,核心依赖遥感植被指数和气象数据,无需复杂的野外实测参数,适配大尺度研究。第三,运算逻辑简洁,避免过多复杂参数,平衡了模拟精度与计算效率,便于长时序、大范围推广。第四,动态响应环境变化,通过环境调节系数实时反映气候波动对光合作用的影响,贴合自然实际。

CASA 模型是光能利用率模型的典型代表和核心分支，完全遵循光能利用率模型的核心原理 ($NPP=APAR \times \varepsilon$)，是估算植被生产力与生态系统固碳的经典工具。CASA 模型进一步细化了光能利用率模型的实操逻辑：明确了 APAR 的计算方法（结合太阳总辐射、FPAR 及光合有效辐射占比），并标准化了温度、水分两大环境调节系数的量化公式，让模型更具可操作性。CASA 模型是光能利用率模型中发展最成熟、应用最广泛的模型方法，其框架为后续光能利用率模型的优化提供了基础范式。

经过三十余年的发展，CASA 模型在科学性和公认性方面都具有明显优势。以 Monteith 提出的光能利用率理论为核心，该方法已通过大量农作物、自然植被的观测实验验证，明确了 NPP 与 APAR 的线性关联，符合光合作用能量转化的基本生理规律。CASA 模型量化环境调控机制，通过温度系数、水分系数分别反映酶活性受温度影响、气孔导度受水分限制的生理过程，不脱离植被光合作用的生态约束本质。通过衔接遥感数据与地面过程，利用卫星遥感植被指数（如 NDVI）反演植被覆盖和光合有效辐射截获能力，该模型实现从站点观测到区域/全球尺度的合理推演。自 1993 年提出后，CASA 模型已被国际生态学广泛接纳，成为全球 NPP 估算的基准模型之一，相关理论与方法被《Nature》《Global Change Biology》等顶级期刊的研究引用，并纳入多个全球碳循环评估项目，如国际地圈-生物圈计划 (IGBP)、全球碳计划 (GCP) 的相关研究中，常以 CASA 模型结果作为重要参考。其核心参数（如不同植被类型的最大光能利用率）经过全球多个通量塔站点、生态系统类型的验证与校准，形成相对统一的参数体系，获得国际学界共识。

5.10 光合作用生化机理模型及选择依据和可操作性

基于光合作用生化机理模型是以 1,5-二磷酸核酮糖 (RuBP) 羧化-氧化作用动力学为基础的光合作用生化机理模型的典型代表。该模型 1980 年就被提出了，当时 Farquhar、von Caemmerer 和 Berry 共同提出 FvCB 模型，首次将 RuBP 羧化-氧化的动力学过程作为核心，明确了 C_3 植物光合速率的核心控制机制，为该类模型奠定了基础框架。2000 年 von Caemmerer 深化模型相关理论，后续研究者发现叶肉导度对 CO_2 从细胞间隙到羧化位点的传输影响显著，将其纳入模型修正，解决了早期忽视 CO_2 胞内传输阻力导致的参数估算偏差问题。近 20 年随着计算机技术发展，模型拟合方法不断升级，从传统主观分段拟合升级为客观分段整体拟合，迭代算法的应用大幅提升了参数估算的精准度，同时模型逐步与气孔导度模型等耦合，适配更多环境场景研究。

该模型核心契合光合作用碳反应的卡尔文循环，RuBP 在 Rubisco 酶催化下与 CO_2 结合完成羧化，生成 3-磷酸甘油酸，再经还原和 RuBP 再生形成循环，这一过程是植物固定 CO_2 合成有机物的核心路径，是模型的核心理论支撑。植物光合速率受 Rubisco 支持的羧化速率、电子传递支持的 RuBP 再生速率等多个过程的最低值限制，这一规律经大量叶片光合实验验证，成为模型判断光合速率主导限制因素的依据。温度会影响 Rubisco 酶活性，水分胁迫会影响气孔开放进而改变 CO_2 供应，这些环境因子与光合生化参数的定量关系，为模型量化环境对光合过程的调控提供了科学支撑。因此，该模型以 RuBP 羧化-氧化动力学为核心，确定光合速率由羧化、RuBP 再生、磷酸丙糖利用三个过程中的最低速率决定，以此构建模型的核心计算框架，通过输入叶片 CO_2 响应曲线数据及环境因子数据，通过拟合曲线估算

最大羧化速率、最大电子传递速率等关键生化参数，同时结合叶肉导度等修正参数，提升模拟准确性。为拓展应用场景，该模型常与气孔导度模型等耦合，既通过 FvCB 模型模拟光合固碳过程，又借助气孔导度模型反映植物水分消耗，实现对植物光合-蒸腾耦合过程的综合模拟。

该模型的优势在于：第一，机理严谨贴合实际。基于光合作用核心生化过程构建，能精准反映植物光合系统的内在变化，相比经验模型，对环境变化的响应模拟更具科学性，可揭示光合速率变化的深层原因。第二，参数意义明确且可验证。模型参数如最大羧化速率等均对应具体的生理过程，可通过实验直接测定验证，参数的变化能直观体现植物光合生理状态的改变，便于分析胁迫因子的影响机制。第三，适配多场景研究。可灵活适配不同环境条件，既能用于正常环境下植物光合特性研究，也能模拟盐胁迫、臭氧污染等逆境下的光合响应，同时适用于叶片到生态系统尺度的光合速率估算。第四，学术认可度高，研究基础成熟。作为光合作用生化机理模型的经典代表，该模型已被全球学界广泛接纳，国内中科院系统、重点高校等机构均有成熟的应用案例和技术积累。其参数体系、拟合方法、耦合框架已形成标准化流程，研究成果易被同行认可，且相关参考文献丰富，能为研究提供扎实的方法支撑和对比依据，降低研究门槛与不确定性。

6 与国内外同类标准水平对比和分析

与国际同类标准或技术规范相比。IPCC 指南侧重全球通用框架，覆盖碳库全类型，但本土化适配性弱，对特定区域（如中国复杂地形植被）的细化指标不足；ISO14064-2 聚焦项目级碳汇量化，流程严谨但方法选择较固定，灵活度低。本标准兼顾国际规范的系统性，同时通过分层设计解决其本土化适配不足的问题，可根据区域植被特性调整指标与方法，达到通用框架+定制化适配的进阶水平。

与国内同类标准或技术规范相比。国标多聚焦单一植被类型（如森林），指标和方法绑定紧密，跨生态系统（如森林与草原、湿地）适配性差；团体标准如 T/CCPEF 087 虽结合国产卫星数据，但侧重森林碳汇监测，对草本、湿地等植被的覆盖不足，且未明确区分指标与方法的独立调整空间。本标准突破单一生态系统类型限制，指标层与方法层的分离设计可适配多生态系统，弥补国内规范场景覆盖局限，处于多场景兼容、本土化精准化的优化水平。

因此，本标准与国内外同类标准或技术规范相比具有明显优势：

第一，结构清晰灵活，打破传统规范指标与方法严格绑定的规律。现有规范多将评估指标与对应方法固化在同一模块中，例如 GB/T29345-2013 中森林生物量计量指标直接绑定特定样地测量方法，若需更换更高效的遥感反演方法，需整体调整流程，本标准通过两层分离设计实现灵活调整，具体包括：

指标层可按需增减：针对不同生态系统（森林、草原、湿地等），灵活选取碳库指标（如乔木层生物量、土壤有机碳、枯落物碳等），也可新增特色指标；

方法层可自主匹配：同一指标可对应多种方法，如地上生物量指标，数据充足时选样地实测法，大范围评估时选 CASA 模型法，数据精度要求高时选生化机理模型法，无需调整整体规范框架。

第二，适配多场景评估，弥补传统规范场景覆盖局限的缺陷。国际的 IPCC 指南难适配中国复杂地形的植被评估，国内的多数规范又聚焦森林等单一植被，本标准能轻松应对多场景需求，具体包括：

宏观场景：指标层选取基于 NDVI、区域太阳辐射等的宏观指标，方法层搭配模型法，适配全国和省域尺度植被固碳功能评估；

微观场景：指标层细化到 Rubisco 酶活性、叶片光合速率等生理指标，方法层选用生化机理模型，适配农田高光效管理、濒危植物光合适应性等精细化研究；

跨界场景：评估区域包含林地、绿化灌丛带、湿地时，可混合选取不同类型指标，搭配遥感与实测结合的方法，突破传统规范的场景边界限制。

第三，降低应用门槛，适配不同数据与技术条件，降低应用成本。传统规范对数据和技术的要求往往较苛刻，如生化机理模型类规范需大量叶片实测数据，普通研究机构难以满足；而部分遥感类规范又对技术软件操作要求高，本标准可适配不同用户的条件，如不同省份可根据本省技术水平和工作条件开展评估工作经济分析方面，兼顾了成本可控与效益最大化。本标准的分层设计可适配不同数据与技术条件，基层单位无需投入高额设备即可开展基础评估，评估成本较传统规范预计可降低 30%~40%，降低评估门槛，具体包括：

数据匮乏时：指标层选取基于气象站、卫星遥感等易获取的基础数据的指标，方法层选用光能利用率模型，确保评估能顺利推进；

技术有限时：可选取实测法，用传统方式完成评估，或直接沿用方法层中成熟的标准化流程，仅调整指标层参数，也可以完成评估工作；

资源充足时：可选取遥感-地面观测的实测方法或开展模型优化研究，或在指标层增加高精度实测指标，方法层引入耦合模型，逐步提升评估精度，实现由简到繁的灵活调整。

综上所述，本标准相比国内外现有标准规范，在结构灵活性、场景适配性和结果严谨性上均展现出独特价值，整体处于贴合本土化实践、弥补传统规范短板的进阶水平。

7 标准实施建议

结合本标准特点，参考《生态系统碳汇能力巩固提升实施方案》的要求和现有标准实施经验，提出以下建议：

（1）拟定标准实施需配套的管理措施、实施方案建议。建议推动自然资源、林草、生态环境、科研院所等单位在相关工作中以本标准为具体的方法依据。建议制定配套制度与流程规范，如建立数据管理制度，规范遥感数据、气象数据、实测数据的采集、存储、共享标准，要求评估单位留存指标计算依据和方法参数设置记录，确保可追溯。建议将本标准执行

情况纳入相关生态保护修复监督工作考核。建议加强本标准推广，如开展规范宣传培训，面向评估单位和基层技术人员开展实操教学，提升规范执行的统一性。

(2) 与拟定标准实施相关的科研建议。建议进一步构建标准化技术支撑体系，如开发统一的评估工具包，集成遥感数据预处理、指标计算、模型运行、结果可视化等功能，降低基层单位的技术门槛，避免人为操作误差。建议强化数据保障，如对接国家生态监测网络、卫星遥感数据平台（如国产高分卫星数据）、气象站点网络，整合多源数据资源，为规范实施提供稳定的数据来源。建议建立规范动态更新机制，每 2~3 年结合技术进展（如新型遥感传感器应用、模型优化成果）和试点反馈，修订指标体系和方法适配规则，优化模型参数，衔接减排量核算等工作要求，保持规范的先进性。

(3) 其他建议。建议尽快发布本标准，并在全国范围内全面推行，将其作为生态系统固碳服务功能评估、生态保护修复成效评价、碳汇交易计量的核心依据。建议建立和完善数据共享平台和结果验证体系，定期发布全国生态系统植被固碳评估报告。

8 参考文献

- [1] IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Vol. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use).
- [2] Brown, S., & Lugo, A. E. (1982). Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science*, 215 (4538), 1345-1349.
- [3] Monteith, J. L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9 (3), 747-766.
- [4] Schlesinger, W. H. (1997). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change* (2nd ed.). Academic Press.
- [5] Baldocchi, D. D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 9 (4), 479-492.
- [6] FLUXNET. (2024). FLUXNET Global Network of Eddy Covariance Towers [数据库].
- [7] IUFRO. (2012). *Guidelines for Forest Carbon Inventory and Monitoring* (International Union of Forest Research Organizations).
- [8] Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8 (2), 127-150.
- [9] Potter, C. S., et al. (1993). Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7 (4), 811-841.
- [10] Farquhar, G. D., von Caemmerer, S., & Berry, J. A. (1980). A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149 (1), 78-90.
- [11] Webb, E. K., Pearman, G. I., & Leuning, R. R. (1980). Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal*

- Meteorological Society, 106 (447), 85-100.
- [12] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国森林生态系统碳储量与碳循环[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [13] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.
- [14] Lu D, et al. Quantifying forest structural characteristics using LiDAR remote sensing[J]. Journal of Forestry Research, 2004, 15(3): 241-246.
- [15] Næsset E. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(3): 441-451.
- [16] Lefsky M A, et al. Laser altimetry for detection of forest structural change[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(3): 435-445.
- [17] Du L, et al. Lidar biomass index: A novel solution for tree-level biomass estimation using 3D crown information[J]. Remote Sensing of Environment, 2023.
- [18] 彭思源, 付博, 赖雨亲, 等. 基于光能利用率集成模型的 GPP 估算不确定性研究[J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2022.
- [19] Xiao X, Hollinger D Y, Aber J D, et al. Modeling gross primary production of evergreen needleleaf forests with a new vegetation photosynthesis model[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2004.
- [20] Veroustraete F, Sabbe K, Eerens H, et al. C-FIX: a terrestrial biosphere model to estimate carbon fluxes in the European landscape[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002.
- [21] Xu R, Zhang J, Chen F, et al. Quantitative assessment of spatiotemporal variations and drivers of gross primary productivity in tropical ecosystems at higher resolution[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024.
- [22] Ostrogović Sever M Z, Barcza Z, Hidy D, et al. Evaluation of the terrestrial ecosystem model BIOME-BGC muso for modelling soil organic carbon under different land uses[J]. Land, 2021, 10(9):968.
- [23] 刘文静, 李晓婷, 童莉, 等. 基于 MODIS 和 CASA 模型的伊春市森林 NPP 时空变化及驱动因素[J]. 生态学杂志, 2022, 41 (1): 150-158.
- [24] 唐星林, 曹永慧, 顾连宏, 等. 基于 FvCB 模型的叶片光合生理对环境因子的响应研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37 (19):6633-6645.
- [25] 林晓凤, 陈报章. DLM-FvCB 模型光合能力关键参数季节性参数化方案及模拟效果评估[J]. 地理科学, 2022, 42 (7):1260-1271.
- [26] Farquhar G D, Caemmerer S V, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. Planta, 1980, 149 (1):78-90.
- [27] Huang M, et al. Sensitivity analysis and estimation using a hierarchical Bayesian method for the parameters of the FvCB biochemical photosynthetic model.
- [28] Ichii K, Yang F, White M A, et al. Developing a continental - scale measure of gross primary

production by combining MODIS and AmeriFlux data through Support Vector Machine approach. Remote Sensing of Environment, 2007, 110 (1):109-122.

[29] 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2018.