

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.04.08

引用格式: 李海奎. 碳中和愿景下森林碳汇评估方法和固碳潜力预估研究进展[J]. 中国地质调查, 2021, 8(4): 79–86. (Li H K. Research advance of forest carbon sink assessment methods and carbon sequestration potential estimation under carbon neutral vision[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(4): 79–86.)

碳中和愿景下森林碳汇评估方法和固碳潜力预估研究进展

李海奎

(中国林业科学研究院资源信息研究所 国家林业和草原局森林经营与生长模拟重点实验室, 北京 100091)

摘要: 碳中和愿景下, 加强森林的固碳增汇功能是抵消和吸纳碳排放最经济和最有效的途径。精准评估森林碳汇和预估森林固碳潜力, 有助于量化森林在应对气候变化和实现碳中和愿景中的贡献。然而, 森林分布的广泛性、森林生态系统结构的复杂性以及评估数据的代表性不够和方法学的差异性, 造成森林碳汇评估的结果普遍存在精度低、不确定性高的问题。在界定森林碳储量、碳汇和固碳潜力等基本概念后, 从森林定义、评估时空尺度、碳库选择及其基本方法等方面阐述了森林碳汇评估的方法, 分析各类方法的主要特征、主要问题、优势和不足; 基于面积和生长假设情景, 回顾了森林固碳潜力预估方法, 重点分析了近 10 a 中国森林固碳潜力研究成果, 预估到 2030 年和 2060 年, 中国森林植被的年固碳潜力分别可达 1.69 亿 t/a 和 1.48 亿 t/a 左右的水平。最后, 探讨了森林碳汇评估方法和固碳潜力预估的未来发展趋势, 为不同时空尺度下森林碳汇评估和固碳潜力预估提供参考。

关键词: 森林碳汇; 固碳潜力; 评估方法; 储量变化法; 碳中和

中图分类号: P595; S718.5

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2021)04–0079–08

0 引言

以全球变暖、极端天气现象频现为代表的气候变化, 深刻影响着人类生存和发展, 是各国共同面临的重大挑战。《联合国气候变化框架公约》明确规定, 各缔约方应在公平的基础上, 根据共同但有区别的责任和各自的能力, 走绿色低碳发展道路, 实现人与自然和谐。气候变化既是环境问题, 也是发展问题, 但归根结底是发展问题, 最终要靠可持续发展加以解决。中国从自身基本国情和发展阶段的特征出发, 不断提高国家自主贡献力度: 2020 年第七十五届联合国大会上, 中国政府承诺采用更加有力的政策和措施, 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; 同

年 12 月的气候雄心峰会上, 提出了 2030 年森林蓄积量将比 2005 年增加 60 亿 m^3 的具体指标; 2021 年 3 月, 明确把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设的整体布局, 有效发挥森林和草原等固碳作用, 提升生态系统碳汇增量。

实现碳中和有两条途径, 一是减少碳排放, 二是增加碳封存, 在自然界主要通过陆地生态系统和海洋生态系统中形成的碳库“收集”大气层中的碳。森林是陆地生态系统的主体, 全球陆地约 80% 的地上碳储量和 40% 的地下碳储量发生在森林生态系统。Fang 等的研究表明, 2001—2010 年间我国陆地生态系统年均固碳 2.01 亿 t, 可抵消同期化石燃料碳排放的 14.1%, 其中森林的贡献约为 80%^[1]; 而根据全国第 7—9 次森林资料连续清查报告, 近 10 a 平均碳汇量为 1.37 亿 t/a ^[2–3]; Wang 等研究

收稿日期: 2021–06–21; 修订日期: 2021–07–15。

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(编号: CAFYBB2018ZB006)和国家自然科学基金项目(编号: 31770676)共同资助。

作者简介: 李海奎(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事林业碳汇计量和生物量模型等方面的研究。Email: lihk@ifrit.ac.cn。

认为,2010—2016年我国陆地生态系统年均吸收碳约11.1亿t,吸收了同时期人为碳排放的45%^[4]。不同研究者的研究结果相差数倍之多。总体来讲,森林分布的广泛性、森林生态系统结构的复杂性以及评估数据的代表性不够和方法学的差异性,造成森林碳汇评估的结果普遍存在精度低、不确定性高的问题,对未来固碳潜力的预测结果相差几倍甚至达一个数量级。因此,对森林碳汇的精准评估和未来固碳潜力的准确预测,必须有一套科学有效的计量方法和评估体系。

国内外发展了大量森林碳汇评估方法^[5-9],主要有基于多期调查数据的森林碳储量变化法和基于模型的模拟方法两大类,每类中又有许多具体的评估方法。例如:碳储量变化法中对碳储量的估算有基于连清样地的方法^[5]和基于二类调查的蓄积量扩展因子法等^[6];基于模型的模拟包括生长收获模型、遥感模型和以植物生理生态学为基础的过程模型^[7]。对森林固碳潜力的预估则通常采用设置森林面积变化或不变,林分生长环境因子和干扰因子变化或不变等的不同情景,使用生长模型来预测^[8-9]。各种方法的尺度和应用范围不一,所需的基础数据(调查的林分数据和观测的气候、生理数据)不同,使用的模型种类(经验模型和机理模型)不同,同一区域森林碳汇的评估结果差异很大。

本文在界定森林碳储量、碳汇和固碳潜力等基本概念后,从森林定义、评估时空尺度、碳库选择和基本方法等方面阐述了森林碳汇评估的方法,分析各类方法的主要特征、主要问题、优势和不足。基于面积和生长假设情景,回顾了森林固碳潜力预估方法,分析了近10a中国森林固碳潜力研究成果,预估2030年和2060年中国森林植被的年固碳潜力。最后,探讨森林碳汇评估方法和固碳潜力预估未来的发展趋势,为不同时空尺度下森林碳汇评估和固碳潜力预估提供参考。

1 森林碳储量和碳汇

森林碳储量是指某个时间点森林生态系统各碳库中碳元素的储备量(或质量),是森林生态系统多年累积的结果,属于存量。森林的碳储存库包括地上和地下生物量、凋落物和枯死木等死有机质以及土壤有机碳库5大碳库。森林碳汇是指森林通

过植物光合作用吸收大气中的CO₂,并将其固定在生物体和土壤中的活动、过程或机制。森林碳汇量可以用一定时间内上述所有碳库碳储量的变化量之和来表示,属于流量。根据政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)《2006年国家温室气体清单指南》^[10],生态系统碳汇(源)相当于生态系统净生物群系生产力(Net Biome Productivity, NBP),即光合作用形成的光合产物扣除自养呼吸、异养呼吸以及自然或人为干扰排放后剩余的储碳量净变化量,如果储碳量净变化量为正,则表现为碳汇功能,否则为碳源。森林在采伐收获后形成的木质林产品,是森林生态系统碳储存库的转移,常作为一个单独碳库进行评估。

2 森林固碳潜力

森林固碳潜力是指在特定立地条件下,一定面积森林达到生长阶段中的某一时间点时可以积累的最大碳汇量,不考虑造林或森林经营过程中的碳排放,以非林地造林为基线情景时,就是森林碳储量。所有的固碳行为都是森林在自然条件下通过自身的生长来完成的,即使实施了人为的经营措施,也只是通过促进了森林的生长来完成增汇的功能。所以,预估森林固碳潜力,须考虑非生物环境因子(气候因子、土壤因子和地形因子等)、林分特征和人为干扰等因素。

一般情况下,环境因子中地形因子长时间保持不变,土壤因子变化缓慢,气候因子每年都有所变化,这些因子和植被类型一起,在最佳的状态下达到的固碳量,可以称为理论固碳潜力,它决定着生态系统碳蓄积饱和水平。然而,在现实科学技术和管理水平下可能达到的生态系统碳储量水平必然会与理论固碳潜力水平有较大的差距。通常定义由管理技术水平及其可行性限制的潜在固碳水平为技术可行的固碳潜力水平,同样,将采用可行的技术和效益-成本权衡条件下可以实现的固碳潜力水平作为现实的固碳潜力水平^[11]。例如刘迎春等^[12]在估算中国森林生物量固碳潜力时,以森林的林龄达到过熟林上限时的森林生物量碳储量为森林生物量碳容量,将森林生物量碳容量与当前(或某一年)森林生物量碳储量之差称为森林生物量固碳潜力。

3 森林碳汇评估方法

不同国家对森林的定义并不相同,所以森林碳汇的内涵也不统一。根据中国森林的定义和阈值,中国森林包括乔木林、竹林和国家特别规定的灌木林^[13]。不符合森林定义的普通灌木林、疏林、散生木(竹)和四旁树等植被虽然也储存了大量的碳,但在森林碳汇评估时并不计量。

3.1 评估尺度与碳库选择

森林碳汇评估时,首先要明确评估的时间和空间尺度,它涉及到评估方法和碳库的选择。例如:虽然森林土壤有机碳库的储量较大,但其在20 a内的变化量不大(IPCC默认20 a不变),所以评估时间跨度小于20 a时,可以不计;用于碳汇交易的项目级碳汇一般只考虑地上和地下生物质碳库,基本方法为储量变化法,但区域(省级)或全国性的碳汇评估在时间跨度大于20 a时,需要考虑5大碳库。

根据森林碳汇评估的时空尺度、评估目的和现有的数据资料进行碳库选择。目前,有关中国森林碳储量及其变化量的研究,多数是针对乔木林生物量碳库进行的评估,很少涉及竹林、灌木林以及其他生物质,也很少涉及死有机质碳库、土壤有机碳库和木产品碳库。

3.2 基本方法

3.2.1 储量变化法

储量变化法评估的是一段时期内碳储量的年变化量^[10]。该方法通过大量的地面调查(如全国森林资源清查)来获得基础数据,主要是森林蓄积量;然后利用已建立的生物量模型和碳计量参数(林业行业标准或相关文献),或相关方程、生物量碳密度和土壤有机碳密度等来估算生态系统各碳库的碳储量;最后,分析一段时期内碳储量的年变化量。碳储量年变化量为正值则视作为“碳汇”,反之则视作为“碳源”。计算式为

$$\Delta Q_c = (Q_{t_2} - Q_{t_1}) / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中: Q_{t_1} 和 Q_{t_2} 分别代表以年为单位的 t_1 和 t_2 时的碳储量, t ; ΔQ_c 为碳储量的年变化量, t/a 。

在估算某一时间的碳储量时,通常是用材积源法,即以森林蓄积为基础,采用生物量转扩因子换算成生物量,再乘以含碳系数获得碳储量。有研究表明,扩展因子并不是常数, Brown 等利用干材扩展

因子、蓄积以及木材密度得到干材生物量,再根据扩展因子得到总生物量^[14]。Fang 等根据中国境内758个林分的生物量与蓄积研究,发现生物多样性与生态系统功能(Biodiversity and Ecosystem Functioning, BEF)与林分蓄积之间是呈倒数的非线性关系,当林分蓄积到达一定程度时,趋于常数^[15]。常用的生物量转扩因子方法有 IPCC 法、生物量连续函数转换法和加权回归模型法^[3],分别对应于 IPCC 报告的第一、第二和第三层次的方法。

本质上,只要在评估时间和空间尺度上采用相同的方法获得多期森林碳储量,均可利用储量变化法获得森林碳汇量。但在区域或全国尺度上,采用储量变化法进行森林碳汇评估时存在一个共性的问题,即无法区分土地利用变化的影响。土地利用变化(如农地转化为森林、森林转化为建设用地等)往往会使式(1)中 t_1 和 t_2 时间森林的空间位置和总面积均发生变化。IPCC^[10] 指南为了避免不同土地碳储量评估时出现重复或者遗漏,根据一定时间间隔期(通常为20 a)内土地利用变化的具体形式,将每一类土地划分为“一直保持不变的陆地”和“转化而来的陆地”。对森林而言,根据评估的年份,划分为过去20 a里“一直为森林的土地”和“转化为森林的土地”,分别评估这两类土地上的碳储量变化;而这期间森林转化为其他类型土地,则在其他类型中考虑。

应用储量变化法的关键在于大量且重复进行的地面样地调查。一方面需要满足抽样精度以保证评估结果的可靠性;另一方面也需要重复调查以实现不同时间碳储量变化的评估。截至2018年,我国以5 a的间隔期进行了9次森林资源连续清查,不少省份的地区也进行了10 a期的森林资源二类调查,这些调查数据和统计资料,为全国或区域森林碳汇评估提供了良好的基础。

3.2.2 损益法

损益法是通过研究一定时期内生态系统碳收支状况,利用碳吸收与碳排放的平衡结果来评估生态系统碳汇功能。目前大多数基于模型的研究都采用了损益法。计算式为

$$\Delta Q_c = Q_{\text{gain}} - Q_{\text{loss}} \quad (2)$$

式中: Q_{gain} 和 Q_{loss} 分别代表一定时期内生态系统的碳吸收与碳排放量。当 $Q_{\text{gain}} > Q_{\text{loss}}$ 时,生态系统表现为“碳汇”,反之则表现为“碳源”。

模型模拟是在大尺度生态系统碳循环研究中常常采用的数学模型方法,主要包括基于统计的经验模型和基于生态系统过程的模型。经验模型通常用于生物量的评估,以野外实测生物量为依据,建立以胸径、树高、蓄积、林龄等为变量的回归关系模型来描述生长速率,还可以用于评估和预测气候等环境要素对生长及碳累积的影响^[16-17]。经验模型包括生物量模型和全碳库模型。常用的生物量模型有 FVS^[18-19]、CACTOS^[20]、ORGANON^[21] 和 TreeGross^[22] 等;全碳库模型主要有 CO2FIX^[23]、TreeGroSS - C^[24]、FORCARB^[25] 和 CBM - CFS3^[26-27]。

过程模型理论基础雄厚、层次丰富、结构严谨,分为单株、林分和生态系统尺度上的森林生态系统过程模型。其中,基于生态系统的过程模型通过描述生态系统的光合、呼吸、生物量分配与周转、土壤呼吸等过程与温度、降水、光照等环境要素之间的关系,模拟生态系统内碳的输入与输出及分配过程,从而用于生态系统碳收支的评估研究^[28-29],在大尺度上应用广泛。生态系统过程模型可分为静态植被模型和动态植被模型。静态植被模型假设在整个模拟期内,植被类型和结构组成不发生变化,主要模型有 CENTURY^[30-31]、TEM^[32-33]、INTEC^[34] 和 Biome - BGC^[35-36];动态植被模型根据气候和土壤条件决定植被的分布,并且可以模拟全球变化对生态系统结构和组成的影响^[7],主要模型有 BIOME3、IBIS^[37-38] 和 LPJ - DGVM^[39] 等。

模型模拟法相对于样地清查法更具灵活性,基于气候等环境因子的变化和干扰活动水平数据即可以模拟生态系统的碳收支,不仅可以用于对历史和现状的评估,也可以用于未来情景的预测。不足之处在于:一种模型的应用范围多存在局限性,往往需要多种模型的融合;在缺乏基础研究数据的区域,模型参数难以获得,模型结果也难以得到验证。此外,大多数生态系统过程模型常利用定位观测研究的净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)或生态系统净生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP)等数据进行验证和校正,但由于人为或自然干扰往往不具有规律性,难以对 NEP 进行模拟和评估。因而,一些研究将 NPP 或 NEP 的研究结果视为生态系统碳汇,容易高估生态系统的碳汇功能。

4 森林固碳潜力预估

由于理论固碳潜力在现实条件下很难达到,固碳潜力预估主要是针对现实固碳潜力。不同于森林碳汇评价的对象是已经存在的森林资源,森林固碳潜力预估针对的是未来没有发生的过程,所以需要考虑未来人为活动和气候变化的影响。我国连续多年人工林面积位居全球第一^[2],所以未来固碳潜力预估必须考虑新造林面积的作用。受限于基础资料的缺乏和森林生物与非生物环境的复杂性,森林固碳潜力预估的研究多数只对乔木林生物量碳储量及其变化进行了模拟预测。在进行未来森林固碳潜力预测时,需要对森林面积和生长状态进行情景假设。

4.1 面积假设

(1)相对于基准年度,现有森林面积在未来不发生变化,不存在毁林和林地征占等活动,也没有新造林、天然更新成林等活动发生。

(2)现有森林面积在未来不发生变化,未来新增森林面积,通过设定未来森林覆盖率目标和造林成活率进行预测,不考虑新增森林树种结构等因素。

4.2 生长假设

(1)对现有森林,不考虑生长过程中枯损、死亡等自然现象,也不考虑采伐、更新等森林经营活动,假定未来森林生长只与林龄有关,采用 Logistic 等生长方程来模拟单位面积蓄积量(或碳密度、生物量密度)与林龄的相关关系^[8-9]。计算式为

$$\rho_c = \frac{w}{1 + k \exp(aT)} \quad (3)$$

式中: ρ_c 为森林碳密度, t/hm^2 ; T 为森林年龄, a ; w , k 和 a 为参数。

(2)对现有森林,以过去间隔期的单位面积生长量或生长率(考虑了生长过程中枯损、死亡等自然现象和采伐、更新等森林经营活动),外推未来森林的生长量或单位面积蓄积量(生物量或碳储量)。计算式为

$$\rho_t = \rho_a (1 + p_c)^t \quad (4)$$

式中: ρ_t 为未来 t 年时碳密度, t/hm^2 ; ρ_a 为现在的碳密度, t/hm^2 ; p_c 为林分碳密度增长率, %。

现在的碳密度 ρ_a 可以通过调查获得;林分碳密度增长率 p_c 可通过过去的调查数据获得。

(3) 新增森林面积, 基于模型按年龄估算碳密度, 从而获得碳储量和固碳潜力^[40]。计算式为

$$C_p = A \Delta v \alpha \quad (5)$$

式中: C_p 为固碳潜力, t; A 为新造林面积, hm^2 ; Δv 为林木碳积累速率, $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; α 为修正因子, %。

新造林面积 A 可以按造林规划获得; 碳积累速率 v 根据森林分类经营的林型差异分别估算; 修正因子 α 根据造林成活率计算。

生长假设主要是在区域尺度上, 分优势树种或森林类型进行的。只考虑林龄, 植被类型和结构组成不发生变化的假设(式(3))对已知年龄的人工林有较好的预测效果; 但到成、过熟林时可能预测结果偏大, 对天然林由于年龄未知, 仅以龄组中值替代, 可能产生较大的不确定性; 通过增长率来外推未来的固碳潜力(式(4)), 在 5~10 a 的短期内可能效果较好, 长期对成、过熟林时可能预测结果偏大; 新增森林的固碳潜力(式(5))不确定性主要来自造林面积和造林成活率, 特别是在我国可造林面积越来越小、造林难度越来越大的情况下。

4.3 过程模型

林分和生态系统过程模型能够模拟植物的生命历程及生物地球化学循环过程。通过模型模拟, 阐明植物碳循环与环境因子相互作用的机理^[7], 可以用于未来情景固碳潜力预测。对于森林生态系统而言, 森林年龄是其碳库和通量长期变化的主要决定因子, 而气候要素会导致碳通量的年际波动, 所以, 考虑森林年龄、气候、森林类型、土壤属性和氮沉降的过程模型不仅可以预估森林生物质碳库的固碳潜力, 而且可以预估土壤有机碳库和细分森林植被碳库^[34]。但过程模型多是国外开发的, 在应用时, 对涉及森林类型和植被生理生态等模型参数要经过验证才可以使用, 气候和土壤等非生物环境因子也需要本地化, 否则, 模拟结果的不确定性会很大。

4.4 中国森林固碳潜力预估

近 20 a 来, 我国学者对中国森林固碳潜力进行了诸多研究^[9, 12, 41-45]。基于森林面积不变, 方精云等^[5]评估 1981—2000 年中国森林生物质碳储量由 43 亿 t 增加到 59 亿 t, 年均碳汇为 0.75 亿 t/a , 并预期到 2050 年森林生物质碳储量可以达到 80.5 亿~96.5 亿 t; 刘迎春等^[12]对 2001—2200 年的中国森

林生物量变化和森林生物量固碳潜力进行了估算, 相对于 2001 年碳储量, 2200 年中国森林生物量固碳潜力为 65.2 亿 t; Tang 等^[41]基于 2011—2015 年所开展的野外实测数据, 认为中国森林生物量碳储量到 2020 年和 2030 年将分别增加 11.9 亿 t 和 29.7 亿 t, 如果不进行任何砍伐, 中国森林在未来 10~20 a 内具有 19 亿~34 亿 t 碳的生物量碳固存的巨大潜力。综合不同研究的结果, 在现有森林面积保持不变的前提下, 中国乔木林生物质碳储量将有可能在 2030 年达到 (90.8 ± 3.1) 亿 t, 2050 年达到 (115.6 ± 20.4) 亿 t; 2030 年现有乔木林的生物质固碳潜力为 (0.99 ± 0.32) 亿 t/a , 2050 年将达到 (0.89 ± 0.60) 亿 t/a 。

考虑未来新增森林面积对森林碳储量的影响, 徐冰等^[42]认为中国森林生物量碳储量将从 1999—2003 年的 58.6 亿 t 增加到 2050 年的 102.3 亿 t, 其中新造林将在生物量中累计 28.6 亿 t, 2050 年中国森林生物质总碳储量将为 130.9 亿 t; 李奇等^[9]预测到 2050 年我国乔木林和新造林的总碳储量将达到 111.26 亿 t, 与 2010 年相比增加 81%; Zhang 等^[43]的研究表明: 由于森林面积和生物量碳密度的增加, 中国森林生物量碳汇量将从 2010 年的 1.31 亿 t/a 增加到 2050 年的 1.60 亿 t/a , 2030 年左右将达到最大值 2.30 亿 t/a ; 国家林业和草原局调查规划设计院的研究认为^[44], 到 2030 年, 乔木林总碳储量为 103.64 亿 t, 到 2050 年为 134.62 亿 t; Jin 等^[45]研究表明, 2020 年中国森林碳储量的规模将达到 128.7 亿 t, 其中 57.3 亿 t 将来自造林和再造林。除乔木林外, 中国森林还包括经济林、竹林和特殊灌木林, 保守估计, 2030 年和 2060 年中国森林植被的年固碳潜力分别可达 1.69 亿 t/a 和 1.48 亿 t/a 左右的水平。

5 问题和展望

(1) 评估方法体系亟待完善和集成。不同的森林碳汇评估和固碳潜力预估方法均有各自的优势与不足。储量变化法要求两期调查数据使用相同的方法获得, 使用相同的生物量模型和参数, 基于连清样地的数据是最精准和最可靠的, 但工作量大, 且只能在抽样总体的尺度上保证精度; 损益法通过经验统计模型和过程模型获得森林碳汇, 但地域性强, 在其他地区应用时, 需要重新确

定经验参数值或本地化过程模型参数,而过程模型的参数通常不易获取,这限制了模型的使用。未来需要完善不同的方法体系,在实际的森林碳汇评估和固碳潜力预估时,根据时空尺度、森林类型和数据获取情况,采用多种不同的方法,并倾向于多方法的综合集成。

(2)评估尺度需要兼容和整合。森林分布的广泛性、森林生态系统结构的复杂性、评估数据的代表性、评估时空尺度的差异性和评估方法的多样性,可能造成森林碳汇评估和固碳潜力预估的结果不确定性高的问题。如何整合单木、林分、区域和国家尺度上的多源基础数据,如何兼容单木、林分和生态系统尺度上的模型方法,实现从小到大的尺度扩展和从大到小的降尺度,是森林碳汇评估和固碳潜力预估中亟待解决的问题。

(3)数据方法有望有机融合。从国家森林资源清查、遥感估测、模型模拟,到多方位、多尺度观测的生态系统网络的建立,我国的森林监测技术有了长足的进步,积累了大量的森林生态系统气候、植被与土壤的生态参数和观测数据,这些观测和调查数据为陆地生态系统过程模型提供了必要的数据库。然而,不同森林碳汇评估和固碳潜力预估方法所需的基础数据差异很多,数据获取方式和方法不同,时间和空间尺度不一,在模型中主次作用不同,所以只有和具体的方法进行有机融合,才能保证评估和预估的结果相对准确。

(4)不确定性分析需要加强。森林碳汇评估和固碳潜力预估的不确定性来源于很多方面,从观测数据的获取、评估和预测方法的选择到对森林生态系统碳循环机理的认识以及模型模拟过程和结果等。实际调查数据和仪器观测数据的观测误差、抽样调查时样地的典型性和代表性、经验统计模型的拟合优度、过程模型参数的时空异质性以及尺度扩展和降尺度的误差传导都会通过相乘或相加等误差传递方式影响最终的评估和预测结果。所以,森林碳汇评估和固碳潜力预估的结果在给出明确、可验证的量化指标基础上,要同时进行不确定性分析并给出相应的结果。例如可以从使用的基础数据的全面性、代表性和完整性,采用模型的拟合优度、适用性和参数稳定性等方面,使用一般性描述的分析方法、误差传播方程或蒙特卡罗数值方法分析不确定性。

参考文献(References):

- [1] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2018, 115(16): 4015–4020.
- [2] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告 2014—2018[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019: 2.
National Forestry and Grassland Administration. China Forest Resources Report 2014–2018[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019: 2.
- [3] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010: 21–25.
Li H K, Lei Y C. Estimation and Evaluation of Forest Biomass Carbon Storage in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010: 21–25.
- [4] Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. Nature, 2020, 586(7831): 720–723.
- [5] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804–812.
Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981—2000[J]. Sci China Ser D: Earth Sci, 2007, 37(6): 804–812.
- [6] 王光华, 刘琪璟. 基于TM影像和森林资源二类调查数据的北京森林碳汇估算[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(2): 224–235.
Wang G H, Liu Q J. Estimating carbon sequestration of Beijing's forests based on TM images and forest inventory data[J]. J Basic Sci Eng, 2013, 21(2): 224–235.
- [7] 赵苗苗, 赵娜, 刘羽, 等. 森林碳计量方法研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3797–3807.
Zhao M M, Zhao N, Liu Y, et al. An overview of forest carbon measurement methods[J]. Acta Ecol Sin, 2019, 39(11): 3797–3807.
- [8] Xu L, Wen D, Zhu J X, et al. Regional variation in carbon sequestration potential of forest ecosystems in China[J]. Chin Geogr Sci, 2017, 27(3): 337–350.
- [9] 李奇, 朱建华, 冯源, 等. 中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力预测[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(3): 287–294.
Li Q, Zhu J H, Feng Y, et al. Carbon storage and carbon sequestration potential of the forest in China[J]. Climate Change Res, 2018, 14(3): 287–294.
- [10] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Paris: IPCC, 2006.
- [11] 于贵瑞, 王秋凤, 刘迎春, 等. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 771–787.
Yu G R, Wang Q F, Liu Y C, et al. Conceptual framework of carbon sequestration rate and potential increment of carbon sink of regional terrestrial ecosystem and scientific basis for quantitative carbon authentication[J]. Prog Geogr, 2011, 30(7): 771–787.

- [12] 刘迎春,高显连,付超,等. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力[J]. 生态学报,2019,39(11):4002-4010.
- Liu Y C,Gao X L,Fu C,et al. Estimation of carbon sequestration potential of forest biomass in China based on National Forest Resources Inventory [J]. Acta Ecol Sin,2019,39(11):4002-4010.
- [13] 中国人大网. 中华人民共和国森林法[EB/OL]. (2020-01-02). <http://www.npc.gov.cn/npc/c30834/201912/cdb75f0436604da58ddad953f6fb14c2.shtml>. Website of the People's Congress of China. Forest Law of the People's Republic of China[EB/OL]. (2020-01-02). <http://www.npc.gov.cn/npc/c30834/201912/cdb75f0436604da58ddad953f6fb14c2.shtml>.
- [14] Brown S L,Schroeder P,Kern J S. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA[J]. Forest Ecol Manag,1999,123(1):81-90.
- [15] Fang J Y,Wang G G,Liu G H,et al. Forest biomass of China: An estimate based on the biomass - volume relationship[J]. Ecol Appl,1998,8(4):1084-1091.
- [16] He N P,Wen D,Zhu J X,et al. Vegetation carbon sequestration in Chinese forests from 2010 to 2050[J]. Global Change Biol,2017,23(4):1575-1584;doi:10.1111/gcb.13479.
- [17] Yao Y T,Piao S L,Wang T. Future biomass carbon sequestration capacity of Chinese forests[J]. Sci Bull,2018,63(17):1108-1117.
- [18] Wykoff W R,Crookston N L,Stage A R. User's Guide to the Stand Prognosis Model;1982,INT-133[R]. Ogden,UT;U.S. Department of Agriculture,Forest Service,Intermountain Forest and Range Experiment Station,1982:112.
- [19] Crookston N L,Dixon G E. The forest vegetation simulator; A review of its structure,content,and applications[J]. Comput Electron Agric,2005,49(1):60-80.
- [20] Wensel L C,Daugerthy P J. CACTOS User's Guide;The California Conifer Timber Output Simulator[M]. Berkeley;University of California,1984.
- [21] Hester A S,Hann D W,Larsen D R. ORGANON;Southwest Oregon Growth and Yield Model User Manual;Version 2.0[R]. Corvallis;Forestry Publications Office,Oregon State University,Forest Research Laboratory,1989.
- [22] Nagel J,Alert M,Schmidt M. Das waldbauliche Prognose - und Entscheidungsmodell BWINPro 6.1[J]. Forst und Holz,2002,57(15/16):486-493.
- [23] Schelhaas M J,Van Esch P W,Groen T A,et al. CO2FIX V 3.1: A Modelling Framework for Quantifying Carbon Sequestration in Forest ecosystems[R]. Wageningen,Netherlands;Alterra,2004.
- [24] Wutzler T. Projecting the Carbon Sink of Managed Forests Based on Standard Forestry Data[D]. Jena;Friedrich - Schiller - University,2007.
- [25] Heath L S,Nichols M C,Smith J E,et al. FORCARB2: An Updated Version of the U.S. Forest Carbon Budget Model;General Technical Report NRS-67[R]. Newtown Square,PA;U.S. Department of Agriculture Forest Service,Northern Research Station,2010:52-52.
- [26] Kull S J. Operational - scale Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector Training Workshops Across Canada (POSTER) [R]. Edmonton,Alberta;Natural Resources Canada,Canadian Forest Service,Northern Forestry Centre,2006.
- [27] Kurz W A,Apps M J. Developing Canada's national forest carbon monitoring,accounting and reporting system to meet the reporting requirements of the Kyoto protocol[J]. Mitig Adapt Strat Glob Change,2006,11(1):33-43.
- [28] Tian H Q,Melillo J,Lu C Q,et al. China's terrestrial carbon balance;Contributions from multiple global change factors[J]. Glob Biogeochem Cycl,2011,25(1):GB1007.
- [29] Zhang L,Zhou G S, Ji Y H,et al. Spatiotemporal dynamic simulation of grassland carbon storage in China[J]. Sci China Earth Sci,2016,59(10):1946-1958.
- [30] Parton W J,Rasmussen P E. Long - term effects of crop management in wheat - fallow: II. CENTURY model simulations[J]. Soil Sci Soc Am J,1994,58(2):530-536.
- [31] Molina J A E,Crocker G J,Grace P R,et al. Simulating trends in soil organic carbon in long - term experiments using the NCSOIL and NCSWAP models[J]. Geoderma,1997,81(1/2):91-107.
- [32] Raich J W,Rastetter E B,Melillo J M,et al. Potential net primary productivity in South America: Application of a global model[J]. Ecol Appl,1991,1(4):399-429.
- [33] McGuire A D,Joyce L A,Kicklighter D W,et al. Productivity response of climax temperate forests to elevated temperature and carbon dioxide: A North American comparison between two global models[J]. Climatic Change,1993,24(4):287-310.
- [34] Chen J,Chen W J,Liu J E,et al. Annual carbon balance of Canada's forests during 1895 - 1996 [J]. Glob Biogeochem Cycl,2000,14(3):839-849.
- [35] Running S W. Documentation and preliminary validation of H2OTRANS and DAYTRANS,two models for predicting transpiration and water stress in western coniferous forests[J]. Am Mineral,1984,69(8):833-840.
- [36] Thornton P E,Law B E,Gholz H L,et al. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests[J]. Agric Forest Meteorol,2002,113(1/2/3/4):185-222.
- [37] Foley J A,Prentice I C,Ramankutty N,et al. An integrated biosphere model of land surface processes,terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics [J]. Glob Biogeochem Cycl,1996,10(4):603-628.
- [38] Kucharik C J,Foley J A,Delire C,et al. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model; Water balance,carbon balance,and vegetation structure[J]. Glob Biogeochem Cycl,2000,14(3):795-825.
- [39] Sitch S,Smith B,Prentice I C,et al. Evaluation of ecosystem dynamics,plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model[J]. Glob Change Biol,2003,9

(2):161 - 185.

[40] 吴庆标,王效科,段晓男,等. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力[J]. 生态学报,2008,28(2):517 - 524.

Wu Q B,Wang X K,Duan X N, et al. Carbon sequestration and its potential by forest ecosystems in China [J]. Acta Ecol Sin, 2008,28(2):517 - 524.

[41] Tang X L,Zhao X,Bai Y F,et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems;New estimates based on an intensive field survey[J]. Proc Natl Acad Sci USA,2018,115(16):4021 - 4026.

[42] 徐冰,郭兆迪,朴世龙,等. 2000—2050年中国森林生物量碳库:基于生物量密度与林龄关系的预测[J]. 中国科学:生命科学,2010,40(7):587 - 594.

Xu B,Guo Z D,Piao S L,et al. Biomass carbon stocks in China's forests between 2000 and 2050;A prediction based on forest biomass - age relationships [J]. Sci China Life Sci,2010,40(7):

587 - 594.

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

[44] 国家林业和草原局调查规划设计院. 林业应对气候变化中长期目标和对策研究[R]. 北京:国家林业和草原局调查规划设计院,2020:49.

Academy of Forest Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration. Research on Medium - and Long - Term Goals and Countermeasures of Forestry to Deal with Climate Change [R]. Beijing: Academy of Forest Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration,2020:49.

[45] Jin L, Yi Y Y, Xu J T. Forest carbon sequestration and China's potential;The rise of a nature - based solution for climate change mitigation [J]. China Econom J,2020,13(2):200 - 222.

Research advance of forest carbon sink assessment methods and carbon sequestration potential estimation under carbon neutral vision

LI Haikui

(Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Management and Growth Modelling of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: Under the carbon neutral vision, strengthening the carbon sequestration function of forests is the most economical and effective way to offset and absorb carbon emissions. Accurate assessment of forest carbon sink and prediction of the forest carbon sequestration potential can help to quantify the contribution of forests in tackling climate change and achieving carbon neutral vision. However, the lower accuracy and higher uncertainty always exist in the forest carbon sequestration assessment, because of the universality of forest distribution, the complexity of forest ecosystem structure, the under representation of survey data and the difference of methodology. After defining the basic concepts of forest carbon storage, carbon sink and carbon sequestration potential, the forest carbon sequestration assessment methods have been introduced from the perspectives of forest definition, spatial and temporal scale, carbon pool selection and its basic methods. Besides, the main characteristics, problems, advantages and disadvantages of various methods were also analyzed. The forest carbon sequestration potential methods have been reviewed based on the area and growth scenarios. The research results about the forest carbon sequestration potential in recent 10 years have been analyzed emphatically, and the annual carbon sequestration potential of China's forest vegetation will reach about 169 million tons and 148 million tons in 2030 and 2060, respectively. Finally, the future development trend of forest carbon sink assessment methods and carbon sequestration potential prediction was discussed, and it may provide some reference for forest carbon sink assessment and carbon sequestration potential prediction under different spatial and temporal scales.

Keywords: forest carbon sink; carbon sequestration potential; assessment method; stock - difference method; carbon neutrality

(责任编辑:刁淑娟)