Operations Research and Fuzziology 运筹与模糊学, 2025, 15(2), 668-676
Published Online April 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/orf
https://doi.org/10.12677/orf.2025.152115

Hans汉斯

复杂网络视角下的陆地生态系统碳汇监测核算与评价体系的方案设计

杨　杰，高广阔，赵　康

上海理工大学管理学院，上海

收稿日期：2025年3月16日；录用日期：2025年4月11日；发布日期：2025年4月18日

摘　要

基于2030年达到碳排放峰值，2060年达到碳中和的大背景，考虑到陆地生态系统的复杂性，将碳汇研究与复杂网络相结合，提供了一个全新的视角。通过对陆地生态系统碳汇的监测核算，生态碳汇系统复杂网络的构建，最终形成可预测、优化、评价的“遥感 + 卫星账户 + 大数据 + 智能”为支撑的平台。本文从陆地生态碳汇测量及分类、碳汇复杂网络的构建方式以及总体架构，系统地阐释了复杂网络视角下陆地生态系统碳汇的研究方法，为陆地生态碳汇研究提供了又一理论支撑。

关键词

复杂网络，陆地生态系统，碳汇，智能平台

Scheme Design of Monitoring, Accounting and Evaluation System of Terrestrial Ecosystem Carbon Sink from the Perspective of Complex Network

Jie Yang, Guangkuo Gao, Kang Zhao

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 16th, 2025; accepted: Apr. 11th, 2025; published: Apr. 18th, 2025

Abstract

Based on the background of carbon emissions peaking in 2030 and carbon neutrality in 2060, taking into account the complexity of terrestrial ecosystems, the combination of carbon sink research and

文章引用: 杨杰, 高广阔, 赵康. 复杂网络视角下的陆地生态系统碳汇监测核算与评价体系的方案设计[J]. 运筹与模糊学, 2025, 15(2): 668-676. DOI: 10.12677/orf.2025.152115

complex networks provides a new perspective. Through the monitoring and accounting of carbon sinks in terrestrial ecosystems and the construction of a complex network of ecological carbon sinks, a platform supported by "remote sensing + satellite account + big data + intelligence" that can be predicted, optimized and evaluated will eventually be formed. This paper systematically elucidates the research methods of terrestrial ecosystem carbon sinks from the perspective of complex networks, covering aspects such as the measurement and classification of terrestrial ecological carbon sinks, the construction methods of carbon sink complex networks, and the overall architecture. It provides another theoretical support for the study of terrestrial ecological carbon sinks.

Keywords

Complex Network, Terrestrial Ecosystem, Carbon Sink, Intelligent Platform

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 介绍

温室气体引起的气候变化是人类面临的最大挑战之一[1] [2]，作为全球最大的碳排放国之一，中国承诺到 2023 年达到碳排放峰值[3]-[6]，到 2060 年达到碳中和，努力为应对气候危机的全球行动作出重大贡献[7]。加大碳减排力度同时着力实施生态系统碳汇建设成为必然途径[8]。碳汇的概念源自《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)及其相关议定书，指的是通过特定过程、活动或机制从大气中吸收并储存二氧化碳的行为[9]。在陆地生态系统中，森林、草原和湿地是主要的碳汇载体，它们通过生物量、以及土壤中的碳固定作用，有效地将二氧化碳转化为稳定的碳储存形式。在中央财经委员会第九次会议上[10]，生态系统碳汇的概念被正式提出。随后，国内学者[11]对这一概念进行了进一步拓展和创新，将其定义为通过植树造林、植被恢复等生态修复手段，主动吸收并固定大气中二氧化碳的过程。这一概念不仅保留了传统碳汇的核心意义，还突出了人类活动在提升碳汇能力中的重要作用。同时，它将草原、湿地、海洋等生态系统的碳吸收功能纳入其中，并强调了土壤、冻土等对碳储存和固定的关键作用。此外，这一概念还关注了各类生态系统之间的相互联系及其对全球碳循环平衡的整体贡献，进一步丰富了碳汇的内涵。

中国陆地生态系统大体分为 4 个一级系统以及八个二级系统，森林碳汇在生态系统中占据核心地位，贡献了约 80%的碳吸收量。相比之下，农田和灌丛生态系统的碳汇贡献分别为 12%和 8%，而草地生态系统则大致处于碳平衡状态，甚至可能略微释放碳[12]。学术界对不同种类的生态系统碳汇进行了监测核算与评价研究，对推进碳汇监测技术开发与利用以精准监测碳汇实物量变化，并利用监测数据提高价值量核算与评估碳汇能力已经达成共识。但是由于生态系统的多样性和复杂性，碳汇的监测、估算计量工作面临着各种困难和挑战，核算方法也无统一标准。全局性、一致性国际化标准的监测核算方法与体系，这成为一个关键而复杂的问题。在如何科学监测、核算与评价生态系统碳汇的方法上分歧很大(参见表 1) [13]-[26]。

国内外在生态系统碳汇监测与核算方面的研究成果较多，多数是基于本学科专业理论与方法，研究局部子系统碳汇，缺乏国际化、大格局视野。本文把生态系统碳汇视为复杂网络(谱)结构，子生态系统碳汇为节点，分层次、多维度的动力学模型可推演人类碳汇行为并予以量化，进而实现物理量的价值转换与定价的核算。综上，本文旨在提供一种思路，将复杂网络引入陆地生态系统碳汇研究，基于复杂网络理论，科学开发集“遥感 + 卫星账户 + 大数据 + 智能”技术于一体的数据分析和算法系统，构建陆地生态系统碳汇监测核算体系，并进行碳汇能力的评价、预测与优化。

Table 1. Review of literature on monitoring, accounting and evaluation methods of ecosystem carbon sinks
表 1. 生态系统碳汇监测核算和评价方法的文献梳理

	方法	内容及贡献	不足
生态系统碳汇监测	综合监测法 (续珊珊，2014) [13]	综合运用样地清查法、微气象学法、箱式法、遥感估算法等研究大尺度的森林生态系统碳汇储量，契合了国际流行的监测方法、监测数据比较可靠。	仅针对森林生态系统碳汇，没有全系统的碳汇监测。
	基于过程模型和 IPCC 第二层次方法的监测法 (徐明，2017) [14]	对四川省森林生态系统谭继亮进行应用研究，综合利用多源、多尺度数据。三种计量方法相互印证，可以满足不同区域、不同对象碳计量的需要，直接服务于温室气体清单的编制，在保证计量精度的前提下可有效降低计量成本。	仅针对森林生态系统碳汇，没有全系统的碳汇监测。
	遥感定量估算法 (周国模等，2017) [15]	从竹林分布遥感信息提取、碳储量遥感估算模型，基于多源遥感大尺度竹林碳储量估算以及碳储量时空动态等方面进行分析，效果良好。	仅针对竹林生态系统碳汇，且大尺度监测精准度较低。
	综合模型监测法 (DeVries T. *et al*., 2019) [16]	基于全球海洋生物化学板型(GOBMs)、海洋环游反演模型(OCIM)以及基于 pCO_2 通量制图模型，推断了海洋碳汇对大气碳积累代际变化的贡献，探讨了这种变化的控制，并阐明了碳汇的代际变化。	仅针对海洋生态系统碳汇，且大尺度监测精准度较低。
生态系统碳汇核算	生态服务价值法 (D. M. Camn, *et al*., 2015) [17]	海洋和海洋生态系统为人类提供了一些列有价值的服务，包括碳封存等好处。其经济价值至今仍鲜为人知，提出了对地中海海洋生态系统碳封存服务评估的新贡献。	功能核算技术难度大，数据可获得性较低。
	“低碳+”考核评价体系法 (朱启贵，2016) [18]	借鉴国际能源统计核算的最新发展，设置能源实物流量账户，能源货币流量账户、能源实物资产账户和能源使用账户等，建立中国能源一环境一经济综合核算体系为节能减排碳计量、监测预警与考核评价奠定基础，具有宏观参考价值。	未涉及微观层面碳汇监测核算与评价。
	国民账户体系法 (张颖等，2016) [19]	对我国 2008~2011 年森林碳汇经济账户进行核算和标志了资产负债表，表明：森林碳汇的实物总量是不断增加的。在碳汇价值量核算上，森林碳汇资产也表现为净流出。森林碳汇价值的大小，除与碳汇实物量大小有关外，也受到国内外碳汇市场价格变化的影响。	研究对象单一、抽象，测算与实际结果比往往较大。
	省域碳排放核算准则 (吕洁化和张泽野，2020) [20]	提出的“利益与效率兼顾原则”下，制定科学合理的“激励补偿消费者责任”准则，具有一定的科学合理性。	未涉及微观层面碳汇监测核算与评价。
生态系统碳汇评价	碳足迹法 (成功和张阿凤，2016) [21]	用生态承载力衡量生态盈余，直观明了标准化体现了人类消费的增加及其后果。	静态分析人类活动对碳汇的影响，评估结果差距大。
	碳税法 (康晓明等，2016) [22]	对辽宁双台河口芦苇湿地的固碳价值进行了定量评价，其巨大的碳汇功能及其大气调节能够对区域的气候变暖和干旱化具有一定的调节和缓解作用。	方法单一，对区域生态系统碳汇差异不具普适性。
	实物期权定价法 (贺晓波等，2017) [23]	以湖南省资兴市碳汇造林项目为例。求解投资项目的最大化市场价值，实现对附碳汇收益的林业投资项目复合实物期权的定价，发展碳汇价格和林水价格的变动与林业投资项目复合实物期权的定价，发现碳汇价格和林木价格的变动与林业项目价值呈正相关性，投资费用越高则期权的价值就会越小。	投资者预期下的碳汇定价具有不确定性与主观性的评价不足。
	采用空间计量模型估算法 (徐敬俊，2020 [24]；杜之利等，2021 [25])	1) 沿海各省市(自治区)海水养殖渔业碳汇量并探讨其空间相关性特征，对海洋碳汇渔业绿色发展空间外溢效应进行评价，建议应当考虑省城区位因素，合理制定兼具差异化和协调性的海洋碳汇渔业发展政策。 2) 根据 1990~2015 年全球 129 个国家的面板数据。在分析森林碳汇影响因素的基础上，谈论了跨国间的森林碳汇溢出效应。	方法单一，对区域生态系统碳汇差异性不具普适性。
	相关统计分析法 (A. Gogoi. *et al*, 2022) [26]	用皮尔逊相关分析法估算印度六种主要森林类型的生态系统水平碳储量和影响碳储量的因素，发现不同森林类型之间存在显著差异。	方法单一，对区域生态系统碳汇差异不具普适性。

2. 陆地生态系统碳汇分布以及核算方法

2.1. 陆地生态系统碳汇主要分类

精确评估森林碳汇的规模及其变化，不仅是全球气候变化研究的核心议题，也为我国实现碳中和目标提供了重要的科学依据和数据支撑。在过去的 70 年里，我国森林生态系统经历了从碳汇向碳源的转变。Fang 等[27]估算了 2001~2010 年我国森林生态系统碳汇总量为 163 Tgc yr^{-1}。Chu 等[28]使用 InVEST 模型评估了三北防护林的森林碳汇水平，研究结果表明，三北防护林(TNSP)地区森林具有较强的固碳能力。当前，我国森林生态系统已成为一个重要的碳汇，且其碳吸收能力呈现逐步增强的趋势[29]。

草地生态系统也受到了越来越多学者的关注。我国草地面积约为 2.9 亿公顷，占我国国土面积的 30%左右，因为碳汇核算方法不一，所测量得出的结果也不尽相同，较多的学者认为草地生态系统是碳中性或者是一个弱碳汇。我国草地面积占比较大，草地生态系统的碳汇功能的探索也需要我们进一步的研究。

我国灌丛生态系统碳储量在 10.0~32.5 Pg C 之间。我国灌丛面积约为 0.7 亿公顷，约占全国陆地总面积的 7% [30]。我国灌丛生态系统整体表现为碳汇，根据不同学者的测算，我国灌丛生态系统呈现增强的趋势，研究表明 1961 年至 2005 年间，我国东南地区的灌丛生态系统净固碳量位居全国首位(Tian 等，2019) [31]。此外，Chuai 等学者(2020)的研究表明，在 2003 年至 2013 年期间，中国灌丛生态系统的碳汇强度平均每年增长 0.01 MgC ha^{-1} yr^{-1} [32]。灌丛生态系统碳汇在陆地生态系统碳汇中的作用越来越重要，在碳汇研究方面也有着非常重要的位置。

湿地生态系统是区域生态系统最重要的碳汇之一。由于复杂的水文生态过程和快速变化的生物量碳储量，草本湿地植被固碳建模仍然存在问题。我国湿地碳源汇的空间分布存在显著差异，从区域来看，辽河和长江三角洲的滨海湿地表现出较强的碳汇能力(4.6 MgC ha^{-1} yr^{-1})，而松嫩平原和三江平原湿地也呈现碳汇特征(分别为 1.1 和 0.6 MgC ha^{-1} yr^{-1})。此外，不同类型湿地的固碳效果也有所不同，其中滨海湿地的碳汇速率最高，其次是河流和湖泊湿地，而内陆沼泽的固碳能力相对较弱。

上述为我国主要的陆地生态系统碳汇分类，杨元合等[12]较为详尽地列举了我国陆地生态系统的碳汇分类，为以下七大类：森林生态系统、湿地生态系统、灌丛生态系统、草地生态系统、荒漠生态系统、城市生态系统和农田生态系统。

2.2. 陆地生态系统碳汇核算方法

碳汇测量与估算的方法较多，不同的测量方法所得出的结果也不尽相同，目前，还没有一个较为普适的方法。朴世龙等[33]通过“自下而上”以及“自上而下”的方式，系统梳理并归纳了四大主要方法，包括生态系统过程模型模拟法、清查法、涡度相关法以及大气反演法。令狐大智等[34]以生物量储碳测算和碳通量监测为基础，总结了生物量法以及碳通量法用以测算森林碳汇量。下面我们介绍三种较为主流的碳汇测量方法。

生物量法是森林碳汇测算的早期方法，其核心是通过生物量数据估算碳汇能力。生物量是指植物个体或群落在特定时间内积累的有机物质总量，通常以单位时间内积累的干物质重量或能量来衡量[35]。通过遥感技术计算出目标区域生物量综合之后乘以含碳系数就可以得出区域碳汇量。为方便计算，含碳系数取值通常在 0.44~0.55 之间[36]。其他生物量测量方法，可参考令狐大智等的论文[35]。同时，生物量法也有着投入成本高，技术限制等问题。

大气反演法：通过观测生态系统对应大气中二氧化碳浓度数据估算陆地碳汇量。尽管大气反演法可以评估全球尺度的碳汇量，但是数据空间分辨率较低、观测站点的局限性等仍然使得大气反演法测得的

碳汇量的准确性受到怀疑。Wang 等[37]衡量了中国陆地生态系统碳汇总量的变化程度，根据这些数据，其估计在 2010 年至 2016 年期间，中国陆地生物圈平均每年吸收−1.11 ± 0.38 PgC yr^{-1}，相当于同期中国每年人为排放的 45%左右。其结果远高于其他测量结果，也说明了这种方法的不确定性。

InVEST 模型：生态系统服务与权衡的综合价值评估模型，对土地利用及覆盖变化导致的碳储量变化进行了量化和评估。InVEST 是一个地理空间建模框架工具，用于评估土地利用变化对生态系统服务的影响[38]。对于每一种土地覆盖类型，该模型都需要估算四个基本碳库中的碳储量：地上和地下生物量、凋落物层和土壤有机质。然后，该模型将这些估计值应用于土地利用和土地覆盖地图，以生成每个网格单元和整个研究区域的碳储量地图。测得目标区域碳储量后，计算碳储量的变化量就是碳汇量。

综上，陆地生态分类较多，同时，不同区域可能会有多种生态系统共存的情况，那么，各个生态系统之间一定会互相影响，从而在区域内形成生态系统网络，而生态系统网络之间的复杂性，更适用于复杂网络方法对其进行研究。

3. 复杂网络视角下的陆地生态碳汇研究

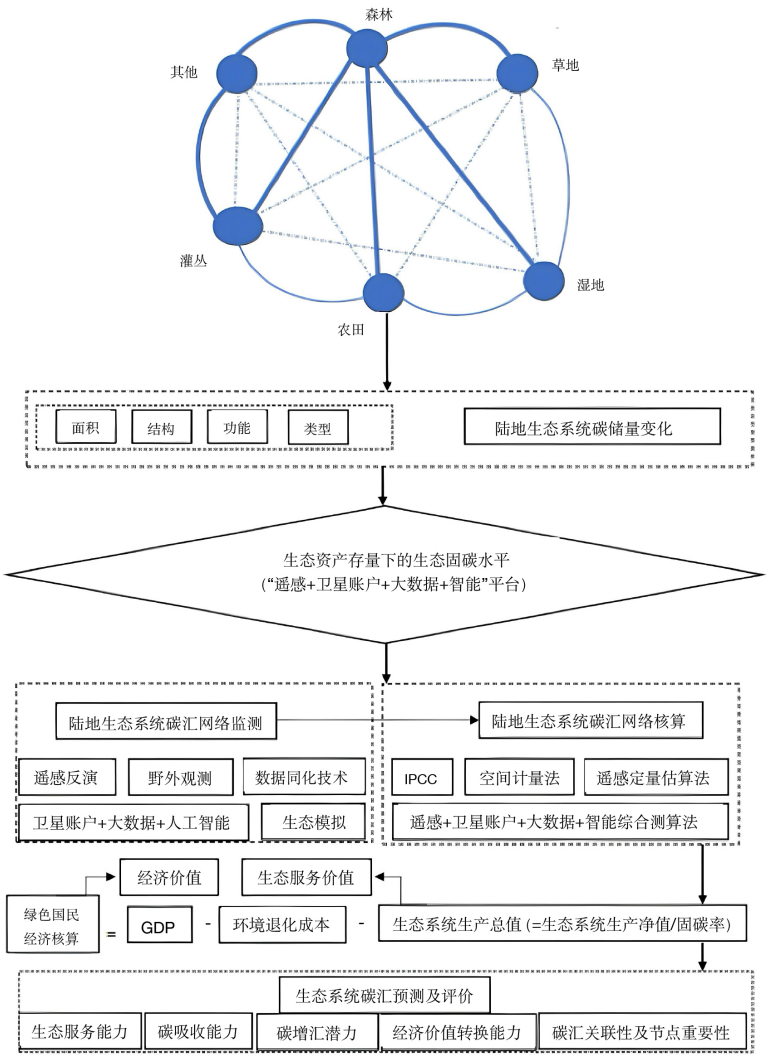

Figure 1. Framework of ecosystem carbon sink monitoring, accounting and evaluation system based on complex network
图 1. 基于复杂网络的生态系统碳汇监测核算与评价体系框架

复杂网络理论，保留复杂系统元素和过程之间关系细节，又提供了有效的研究工具从这些结构和过程细节中提取微观、中观到宏观尺度的结构和过程，对其定量分析。因此复杂网络是建立微观结构到宏观结构之间关系的天然工具，是在大量微观或局部数据基础上实现大视野下全局性和一致性的监测核算方法与体系的有效解决方案。

从国内外的理论及实践经验来看，全球生态系统呈现出网络结构、不断演化、节点的多样性及关联性、多重融合等高度复杂性特征，是一个复杂网络[39]。例如，土地生态系统具有显著的复杂性特征，包括多层次结构、高维度特性、子系统间的复杂关联、结构与功能的不确定性、开放性、动态变化、自适应性以及自组织能力等；而土地生态系统碳汇同样呈现出网络结构、不断演化、节点的多样性及关联性、多重融合等高度复杂性特征[40]。再譬如：森林碳汇量的提升会利于下游土壤、湿地碳汇的生态服务功能实现；而从整个陆地生态系统碳汇角度，也呈现出自组织、自相似、小世界、无标度中部分或全部性质的特性。土地利用变化会引起碳的转移[41]，土地转移矩阵与碳储量的变化相结合，就可以构建形成碳储量转移矩阵，完成碳汇网络的构建。通过“遥感 + 卫星账户 + 大数据 + 智能”平台搜集生态系统碳汇监测的相关数据，围绕构建国际化标准的生态系统碳汇监测核算体系与评价展开；并辅以中国森林、草原、湿地、农田、等子生态系统、区域生态系统作为案例分析的对象，进行碳汇实物量及价值量监测核算和碳汇能力的评价。

先建立区域一体化生态系统碳汇建设效率评估指标体系，该指标体系为后续碳汇能力评估提供量化依据；其次，引入复杂网络分析方法，结合碳汇价值贡献相似度，评估各生态节点的碳汇能力，综合考虑节点的拓扑特征和功能特征，构建动态加权评估模型，计算各节点的碳汇能力评价值并进行排序；最后依据评价结果对指标体系存在问题提出解决方案并进行优化，通过制定标准化核算规范、搭建碳汇数据共享平台、完善市场化生态补偿机制等措施，从而实现生态系统碳汇价值核算体系的可重复、可复制、可推广，如图 1 所示。

基于此，本文提出通过碳储量转移矩阵，将复杂网络应用于碳汇研究中，提供复杂网络下碳汇研究思路。首先建立研究区域土地利用转移矩阵。土地利用转移矩阵是基于同一区域不同时间阶段土地覆被现状变化关系的二维矩阵。它描述了不同时间阶段下不同土地利用类型面积之间的相互转换关系，可反映不同时期不同类型土地的转入和转出情况，如公式(1)所示：

$$S_{ij}=\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12}\cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22}\cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2}\cdots & S_{nn} \end{pmatrix},\quad i,j=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

其中，S_{ij} 是土地利用类型 i 向土地利用类型 j 转移的面积，n 是土地利用类型的类型数，i 和 j 分别是转移前和转移后的土地利用类型。

根据土地利用类型转移矩阵，对应土地利用类型转移矩阵中的转移面积，求出转移所对应的碳储量，其中，当土地类型从高碳密度转变为低碳密度时，表现为碳储量的流失，用负值表示，反之则表现为碳储量流入，用正值表示，如公式(2)所示：

$$CS_{ij}=\begin{pmatrix} CS_{11} & CS_{12}\cdots & CS_{1n} \\ CS_{21} & CS_{22}\cdots & CS_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ CS_{n1} & CS_{n2}\cdots & CS_{nn} \end{pmatrix},\quad i,j=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

其中，CS_{ij} 是土地利用类型 i 向土地利用类型 j 转移的碳储量，n 是土地利用类型的类型数，i 和 j 分别是转移前和转移后的土地利用类型。

立足于复杂网络理论，聚焦于生态系统碳汇的实物量监测、价值核算以及业务化体系的构建，在系统梳理国内外相关标准机构和专家关于碳汇服务的分类、评估规范和技术导则的基础上，深入分析并整合现有研究成果，结合我国区域特点和功能定位，构建符合中国标准的生态系统碳汇监测与价值核算体系框架。其次，以计算机科学、信息学、统计学、生态学、系统科学分析理论为指导，综合应用大数据、人工智能、云计算与系统科学等分析方法，提出综合测算法；设计分析和算法系统。再次，以生态系统碳汇服务的实物量、价值量和物质当量为基础，探索建立基于行业部门例行监测与调查数据的生态系统价值核算业务化体系，同时构建碳汇能力评价指标体系。随后，运用复杂网络中的节点重要性评估方法对体系进行评价，并根据评价结果识别问题，提出优化方案以完善指标体系，如图 2 所示。

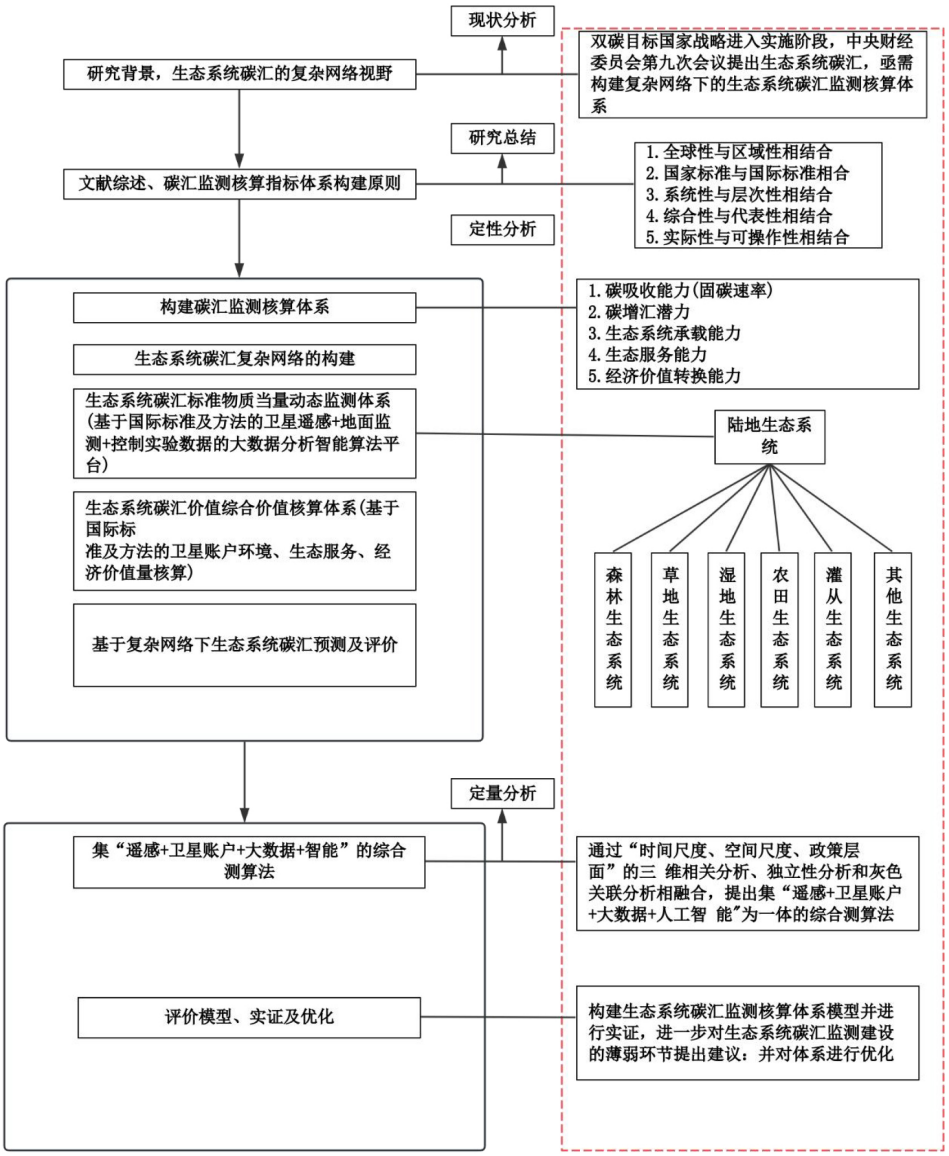

Figure 2. Technology roadmap
图 2. 技术路线图

陆地生态系统是一个复杂网络系统，各个子系统有着密切的联系，将复杂网络应用于碳汇监测、核算、预测、评价是一个全新视角。通过对陆地生态系统类别分类，划分节点种类以及个数，同时，运用相关碳汇监测、核算方法，对目标区域进行碳汇量的核算。利用土地转移矩阵，通过子节点变化，得出碳汇、碳储量转移矩阵，通过转移矩阵对目标区域碳汇进行优化管理以及预测，最终形成集“遥感 + 卫星账户 + 大数据 + 智能”技术于一体的数据分析和算法系统，构建陆地生态系统碳汇监测核算体系。其中，遥感技术用于获取大尺度的生态系统信息，如森林覆盖率、草地面积、湿地分布等，为碳汇监测提供基础数据；卫星账户用于记录生态系统碳汇的实物量和价值量变化，为碳汇核算提供数据支持；大数据技术用于处理和分析海量的生态系统数据，挖掘数据中的潜在信息，为碳汇评价提供科学依据；智能算法用于模拟生态系统碳汇网络的动态演化过程，预测碳汇变化趋势，为碳汇管理提供决策支持。

4. 总结

本文通过对于生态系统碳汇研究梳理，总结了部分陆地生态推算测量方法并对其进行了分类。基于陆地生态系统是一个复杂系统，引入复杂网络的全新研究视角对陆地碳汇的研究方法展开了讨论。以碳汇监测核算为前提，以碳储量、碳汇转移构建复杂网络为连接，以对碳汇量及其价值量的预测、优化、评价为结果，形成以“遥感 + 卫星账户 + 大数据 + 智能”为支撑的平台，建立生态系统碳汇监测核算与评价问题数据库管理，大数据价值链挖掘；开发软件，构建生态系统碳汇监测核算与评价问题的数据分析和智能算法系统，为 2060 年碳中和的目标提供支撑。

参考文献

[1] Zhou, X., Niu, A. and Lin, C. (2023) Optimizing Carbon Emission Forecast for Modelling China’s 2030 Provincial Carbon Emission Quota Allocation. *Journal of Environmental Management*, **325**, Article 116523. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116523

[2] Wang, L. (2022) Research on the Dynamic Relationship between China’s Renewable Energy Consumption and Carbon Emissions Based on ARDL Model. *Resources Policy*, **77**, Article 102764. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102764

[3] Chen, J., Gao, M., Cheng, S., Hou, W., Song, M., Liu, X., *et al*. (2020) County-Level CO_2 Emissions and Sequestration in China during 1997-2017. *Scientific Data*, **7**, Article No. 391. https://doi.org/10.1038/s41597-020-00736-3

[4] Pearson, P.N. and Palmer, M.R. (2000) Atmospheric Carbon Dioxide Concentrations over the Past 60 Million Years. *Nature*, **406**, 695-699. https://doi.org/10.1038/35021000

[5] Clark, P.U., Shakun, J.D., Marcott, S.A., Mix, A.C., Eby, M., Kulp, S., *et al*. (2016) Consequences of Twenty-First-Century Policy for Multi-Millennial Climate and Sea-Level Change. *Nature Climate Change*, **6**, 360-369. https://doi.org/10.1038/nclimate2923

[6] Liu, Y., Meng, B., Hubacek, K., Xue, J., Feng, K. and Gao, Y. (2016) ‘Made in China’: A Reevaluation of Embodied CO_2 Emissions in Chinese Exports Using Firm Heterogeneity Information. *Applied Energy*, **184**, 1106-1113. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.088

[7] Xu, T., Kang, C. and Zhang, H. (2022) China’s Efforts Towards Carbon Neutrality: Does Energy-Saving and Emission-Reduction Policy Mitigate Carbon Emissions? *Journal of Environmental Management*, **316**, Article 115286. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115286

[8] 杜之利, 苏彤, 葛佳敏, 等. 碳中和背景下的森林碳汇及其空间溢出效应[J]. 经济研究, 2021, 56(12): 39-48.

[9] 联合国环境与发展大会. 联合国气候变化框架公约(UNFCCC) [EB/OL]. http://www.acca21.org.cn/trs/gjhz/lhgqhbh/, 1992-05-09.

[10] 新华社. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议[EB/OL]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm, 2021-03-15.

[11] 张守攻. 提升生态碳汇能力[J]. 上海企业, 2021(7): 64..

[12] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学(生命科学), 2022, 52(4): 534-574.

[13] 续珊珊. 森林碳储量估算方法综述[J]. 林业调查规划, 2014, 39(6): 28-33.

[14] 徐明. 森林生态系统碳计量方法与应用[M]. 北京: 中国林业出版社, 2017.

[15] 周国模, 等. 竹林生态系统碳汇计测与增汇技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.

[16] DeVries, T., Le Quéré, C., Andrews, O., Berthet, S., Hauck, J., Ilyina, T., *et al.* (2019) Decadal Trends in the Ocean Carbon Sink. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **116**, 11646-11651. https://doi.org/10.1073/pnas.1900371116

[17] Melaku Canu, D., Ghermandi, A., Nunes, P.A.L.D., Lazzari, P., Cossarini, G. and Solidoro, C. (2015) Estimating the Value of Carbon Sequestration Ecosystem Services in the Mediterranean Sea: An Ecological Economics Approach. *Global Environmental Change*, **32**, 87-95. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.02.008

[18] 朱启贵. 构建国民经济"低碳+"发展系统[J]. 经济研究参考, 2016(2): 8-13.

[19] 张颖, 潘静. 森林碳汇经济核算及资产负债表编制研究[J]. 统计研究, 2016, 33(11): 71-76.

[20] 吕洁华, 张泽野. 中国省域碳排放核算准则与实证检验[J]. 统计与决策, 2020, 36(3): 46-51.

[21] 成功, 张阿凤. 运用"碳足迹"的方法评估小麦秸秆及其生物质炭添加对农田生态系统净碳汇的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 604-612.

[22] 康晓明, 崔丽娟, 等. 辽宁双台河口芦苇湿地固碳价值评价研究[J]. 湿地科学与管理, 2016, 12(2): 15-18.

[23] 贺晓波, 王冬梅, 曾诗鸿. 附碳汇收益的林业投资项目价值评估[J]. 中国管理科学, 2017, 25(3): 39-48.

[24] 徐敬俊. 海洋碳汇渔业绿色发展空间外溢效应评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(2): 99-110.

[25] 杜之利, 苏彤, 葛佳敏, 等. 碳中和背景下的森林碳汇及其空间溢出效应[J]. 经济研究, 2021, 56(12): 39-48.

[26] Gogoi, A., Ahirwal, J. and Sahoo, U.K. (2022) Evaluation of Ecosystem Carbon Storage in Major Forest Types of Eastern Himalaya: Implications for Carbon Sink Management. *Journal of Environmental Management*, **302**, Article 113972. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113972

[27] Fang, J., Geng, X., Zhao, X., Shen, H. and Hu, H. (2018) How Many Areas of Grasslands Are There in China? *Chinese Science Bulletin*, **63**, 1731-1739. https://doi.org/10.1360/n972018-00032

[28] Chu, X., Zhan, J., Li, Z., Zhang, F. and Qi, W. (2019) Assessment on Forest Carbon Sequestration in the Three-North Shelterbelt Program Region, China. *Journal of Cleaner Production*, **215**, 382-389. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.296

[29] Yu, G.R., Li, X.R., Wang, Q.F., *et al.* (2010) Carbon Storage and Its Spatial Pattern of Terrestrial Ecosystem in China. *Journal of Research in Ecology*, **1**, 97-109.

[30] 中国土地覆被图集编委会. 中华人民共和国土地覆被地图集 1:1,000,000 [M]. 北京: 中国地图出版社, 2017: 73-80.

[31] Tian, H., Melillo, J., Lu, C., Kicklighter, D., Liu, M., Ren, W., *et al.* (2011) China's Terrestrial Carbon Balance: Contributions from Multiple Global Change Factors. *Global Biogeochemical Cycles*, **25**, 1-16. https://doi.org/10.1029/2010gb003838

[32] Chuai, X., Qi, X., Zhang, X., Li, J., Yuan, Y., Guo, X., *et al.* (2018) Land Degradation Monitoring Using Terrestrial Ecosystem Carbon Sinks/Sources and Their Response to Climate Change in China. *Land Degradation & Development*, **29**, 3489-3502. https://doi.org/10.1002/ldr.3117

[33] 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 陈发虎. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(6): 1010-1020.

[34] 令狐大智, 罗溪, 朱帮助. 森林碳汇测算及固碳影响因素研究进展[J]. 广西大学学报(哲学社会科学版), 2022, 44(3): 142-155.

[35] Ebermater, E. (1876) Die Gesamte Lehre Der Waldstreu Mit RuCksicht Auf Die Chemische Statik Des Waldbaues. Springer.

[36] Brown, S. and Lugo, A.E. (1984) Biomass of Tropical Forests: A New Estimate Based on Forest Volumes. *Science*, **223**, 1290-1293. https://doi.org/10.1126/science.223.4642.1290

[37] Wang, J., Feng, L., Palmer, P.I., Liu, Y., Fang, S., Bösch, H., *et al.* (2020) Large Chinese Land Carbon Sink Estimated from Atmospheric Carbon Dioxide Data. *Nature*, **586**, 720-723. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2849-9

[38] Polasky, S., Nelson, E., Pennington, D. and Johnson, K.A. (2010) The Impact of Land-Use Change on Ecosystem Services, Biodiversity and Returns to Landowners: A Case Study in the State of Minnesota. *Environmental and Resource Economics*, **48**, 219-242. https://doi.org/10.1007/s10640-010-9407-0

[39] Fath, B.D. and Grant, W.E. (2007) Ecosystems as Evolutionary Complex Systems: Network Analysis of Fitness Models. *Environmental Modelling & Software*, **22**, 693-700. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.023

[40] 吴次芳, 陈美球. 土地生态系统的复杂性研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 753-756.

[41] 杨旭, 刘贤赵. 长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测[J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5850-5860.