

# 碳汇领域研究内容及方法概览

贾国蕊

广西大学工商管理学院

DOI:10.12238/eep.v7i11.2345

**[摘要]** 在全球变暖与气候问题日益显著的今天,碳汇作为碳中和实现的重要手段之一,具有广阔的研究前景。本文从当前碳汇领域下碳汇量测定、碳汇效率评价及碳汇影响因素探究三大研究内容出发,首先基于生态系统以及碳载体的细分视角,系统梳理了碳汇测定方法;之后对碳汇效率研究的随机前沿分析法、数据包络分析法以及碳汇影响因素探究的地理探测器、空间回归分析方法与指数分解方法进行了简要阐述。本文对于厘清碳汇领域研究现状、开展碳中和研究、促进可持续发展具有一定理论意义。

**[关键词]** 碳汇量; 效率; 影响因素; 生态系统

中图分类号: Q148 文献标识码: A

## Overview of Research Content and Methods in Carbon Sequestration Field

Guorui Jia

School of Business, Guangxi University

**[Abstract]** In today's increasingly significant global warming and climate issues, carbon sinks, as one of the important means to achieve carbon neutrality, have broad research prospects. This article starts from three major research contents in the current carbon sink field: carbon sink measurement, carbon sink efficiency evaluation, and exploration of carbon sink influencing factors. Firstly, based on the subdivision perspectives of ecosystems and carbon carriers, the carbon sink measurement methods are systematically sorted out; Afterwards, a brief explanation was given on the stochastic frontier analysis method, data envelopment analysis method, spatial regression analysis method, and exponential decomposition method for exploring carbon sink efficiency factors. This overview has certain theoretical significance for clarifying the current research status in the field of carbon sequestration, conducting carbon neutrality research, and promoting sustainable development.

**[Key words]** Carbon Sequestration; Efficiency; Influencing Factors; Ecosystem

### 引言

21世纪以来,由二氧化碳排放为主引发的温室效应及极端天气问题愈演愈烈,业已构成亟待国际社会合作解决的非传统安全威胁。作为人类命运共同体理念的主要倡导者与坚定践行者,我国政府在2015年巴黎气候峰会上正式承诺到2030年实现碳达峰、2050年实现碳中和的双碳目标。作为世界上最大的发展中国家,我国目前面临的碳减排问题任重道远。

碳汇,可理解为碳的“汇集”,是同碳源相对的概念,主要指森林、土壤、水体、岩石等载体从大气中吸收并储存二氧化碳的过程、活动和机制。通过生物固碳方式推进碳中和,具有环境友好、技术可行、长期回报显著等独特优势,因此推进碳汇增长、提高碳汇生产率、构建碳汇提升机制势在必行。

当前,关于碳汇领域的研究内容集中在碳汇测量及方法拓展、碳汇生产率的测量与碳汇及其效率影响因素探究等方面。

梳理上述内容,对开展碳汇领域相关研究、促进可持续发展、实现“双碳”目标具有重要的现实意义与理论价值。

### 1 碳汇量测算方法

明确碳汇量是碳汇领域研究展开的基础。当前碳汇量测定方式大体可分为实验调查法以及先验模型法两类,前者主要应用于存在精确测定需求的情境下,主要包括微气象学法、生态系统过程模型模拟法、大气反演法等生态系统模拟测定方式;后者则适用于已有实验数据支撑的情境中,如森林蓄积量法、农作物净初级生产力模型、海洋渔业碳收支模型等,往往配合其他计量模型进行经济社会领域研究。

#### 1.1 生态系统测算

在生态系统内部,通过测算局部碳汇量进而推演至整体的方式,是测定区域碳储量的基本方法之一。碳汇生态系统主要包括陆地生态系统与海洋生态系统<sup>[1]</sup>,其测算方法大体一致<sup>[2]</sup>,主

要包括以箱式法、涡旋相关法、涡度协方差法和弛豫涡旋积累法等为代表的微气象学方法,以及生态系统过程模型模拟法和大气反演法等。

### 1.1.1 微气象学法

按照箱式法的基本思想,将生态系统的指定部分,如植被、土壤等,套装在一个密闭的测定室内,形成一个封闭的系统,便可根据该系统内部二氧化碳浓度随时间的变化测定碳通量。箱式法操作方便简单,但在由区域局部推及区域整体的过程中易产生误差。

大气中包括二氧化碳在内的各种物质,通常是由空气涡旋状流动来进行垂直方向的交换,因而通过估测划定范围内大气向上与向下通过某一参考面的差值,便可推出该生态系统释放的碳通量<sup>[3]</sup>,即一定时间内,通过一定面积的二氧化碳的量。涡旋相关法、涡度协方差法和弛豫涡旋积累法等都是利用该基本原理进行碳汇量测算的方法,其中涡旋相关法是基本方法,可测得月度碳储量;涡度协方差法则在前者基础上,使用三维超声波风速仪测定能量、闭路或红外气体分析仪测定水分、二氧化碳,进行协方差计算后代入公式计算。精密科学仪器的引入使该方法在推算大范围生态系统碳贮存量时具备良好的精度,但缺点是成本高昂。弛豫涡旋积累法则需要定时采集两组气体样本进行测定,可得到更微观范围内碳通量,但同涡度协方差法类似,都需要通过精密仪器完成,操作难度大、资金投入高。

以上四种方法各有优缺点,但由于区域尺度上人为影响普遍存在且对碳汇有明显影响,空气涡旋系列的方法一般很少用于直接估算区域尺度上的碳储量,而是用于理解生态系统尺度上碳循环对气候变化的响应过程,相较之下更多使用箱式法进行区域生态系统碳通量的间接估算。

### 1.1.2 生态系统过程模型模拟法

通过模拟陆地生态系统碳循环的过程机制构建模型,可对网格化的区域和全球陆地碳源汇进行估算。该方法的优势在于可定量区分不同因素对陆地生态系统碳汇变化的影响程度,并可预测未来陆地碳汇量变化。但模型构建的结构、参数以及驱动因子等尚未形成明确的标准,且对诸如人类生态系统管理或非二氧化碳形式的碳排放考虑并不全面,在实际操作中还具有较大进步空间。

### 1.1.3 大气反演法

大气反演法主要基于大气二氧化碳浓度观测数据和大气传输模型,并结合人为碳源清单资料,反演至陆地或海洋净碳汇<sup>[4]</sup>,是一种“自上而下”的估算方法。大气反演法对于全球范围内生态系统碳汇能力及其对气候变化的响应的评估具有较高的即时性。但其结果的精准度受限于大气二氧化碳观测站点的分布格局与数量级别,且观测数据的空间分辨率较低,无法准确区分不同类型生态系统的碳通量。

### 1.2 碳汇载体分类测算

从碳汇途径来看,在生物固碳方面当前学界主要研究领域包括森林、农业以及碳汇渔业等生物质载体,此外还包括大气、

土壤、水体等非生物的碳汇途径。从碳汇估算方法来看,当前学界大多采用实测数据进行转换系数模型构建,并进行局域到全域的推广计算。

### 1.2.1 生物质载体

(1) 森林。森林是相当重要的碳载体,国内外学者对于森林碳汇及相关市场的研究开始较早,也有了相对较为成熟的体系。当前学界对森林碳汇量的计量,大多采用对典型样地进行大规模实验调查的方法,通过获取地中森林生态系统中的植被、土壤或枯落物等碳库的碳储量和碳通量的实测数据,建立一套标准的测量参数和数据库,随后将该样点或网格的微观尺度数据模拟结果推广至区域等宏观尺度,是一种“自下而上”<sup>[4]</sup>的方法。在实际操作中,又可根据估测对象的不同,将该方法分为生物量法、蓄积量法以及对前二者进行结合运算的生物量清单法<sup>[5]</sup>。

生物量法以森林生物量数据为基础,使用实地调研所构建出的生物量转换方程,推导出每一种森林植被的平均碳密度,然后将其与面积相乘,估算出森林生态系统的碳储量。这种估算结果仅因树种而异,然而树木生物量的积累不可避免会受到其他因素如天气条件、土壤质量、生长年龄等的影响,即使是相同树种,往往也含有不同的生物量。因此该方式虽操作简单、实用性强、结果明确,但测量误差较大,通常应用于森林资源的普查。

森林蓄积量法是生物量法的延伸,基于森林主要树种的抽样实测数据,计算出平均容重与总蓄积量,并据其求出生物总量,再根据生物量与碳量的转换模型求出相应的主要树种固碳量。这种方式的优缺点同生物量法类似,虽简便直接,但误差性高,在规模较大、树种繁多且主要树种突出的森林中适用性更强。

生物量清单法<sup>[6]</sup>则将森林生态系统中的生物量与蓄积量同时纳入考量,在保持了操作简便性的基础上大大增强了估测结果的精度。该方法主要根据各林种乔木层的碳密度以及乔木层生物量与总生物量之间的比例关系建立测算模型,推算出各森林生态系统的单位面积总生物质碳储量。使用生物量清单法估算碳汇量需要投入大量劳动力进行林木碳贮存量的间歇性监测,因此仅适用于不需反映碳汇量连续动态变化的情境。此外生物量清单法仅关注地上生物量,忽略了对地表下生物量以及土壤微生物分解有机碳时所生成碳源量的计量,这也是样地清查法目前存在的通病。

(2) 农业作物。在农业方面,当前学界大多采用王修兰<sup>[7]</sup>通过作物的净初级生产力而确定的碳汇系数模型,将农作物产量转化为干重后,依据不同作物种类的固碳速率及经济系数进行估算。由于农作物种类繁多,国内研究通常专注于14种主要的经济作物小麦,玉米,豆类,薯类,稻谷,高粱,花生,油菜籽,棉花,麻类,甜菜,烟草,蔬菜及瓜类等。

(3) 渔业养殖产物。碳汇渔业专指不投饵的贝类及藻类养殖。其测算方式同农作物固碳量类似,主要依据贝藻类产量干重、贝藻体内碳元素的含量及其能量收支模型进行。

值得注意的是,上述农业渔业碳汇测算模型仅适用于国内,其模型参数应随国别、区域变化而变化。

### 1.2.2 非生物载体

(1) 土壤。土壤的碳储量是大气与植被的3至4倍,是仅次于海洋和地质库的碳库<sup>[8]</sup>。对土壤碳储量的测定主要包括4种方法,可用于估测包括湿地在内的多种土壤类型碳储量。

首先是土壤类型法。根据各不同层次土壤的纵向剖面实测数据,分别计算出各单位土壤的含碳量,再按照地域标准土壤图上的面积依次推算得到土壤整体的碳储量。

GIS估算法由于操作简便,即时性强,在测定土壤碳含量方面较为常用。根据土壤有机质的属性创建数据库,结合使用GIS地理信息系统中卫星监测面积数据,可计算出土壤的碳储量。

此外,还可以利用碳循环模型来测算不同土壤的含碳量,或使用生命地带法,依据土壤的碳密度与生态系统类型的面积大小来推算相应区域土壤碳汇量。

(2) 水体。水体在陆地及海洋生态系统的碳循环中都扮演着极为重要的中介者与固定者,在碳汇量测定时主要使用生态系统碳汇量估算中的三种方法进行。

## 2 碳汇生产效率

碳汇生产效率,指碳汇,尤其生物载体碳汇在生产过程中投入产出之比,大多数研究使用全要素生产率方式对其进行综合测定。目前主流的测量方法为随机前沿分析方法(SFA)<sup>[9]</sup>与数据包络分析方法(DEA)<sup>[10]</sup>两种。

### 2.1 随机前沿分析法

在全要素生产率的评价中,随机前沿分析法作为一种客观评价法,出现较早,但其需要在假定统计误差和技术无效率误差的分布形式前提下,通过设定具体生产函数来计算多投入多产出模式下决策单元间的绝对效率值,具有一定主观性。相比之下,随机前沿分析法的最主要优势为可排除多种环境噪音影响,减少随机误差,因此在样本数据测量误差较大或测算结果易受随机扰动因素影响时可优先予以选用。

### 2.2 数据包络分析法

在针对碳汇生产效率的实证研究中,数据包络分析法的使用更为常见。数据包络分析法以相对效率概念为基础,运用数学线性规划,对多投入多产出模式下相同类型决策单元间的相对有效性进行评价。相比于随机前沿分析,数据包络分析作为一种非参数的分析方法,不需要设置生产函数,简洁易行,应用广泛,但无法排除随机误差的影响,多用于样本数据缺乏价格信息或者测算结果受随机扰动因素的影响较小的情境中。

数据包络分析法从上世纪80年代发展至今,历经众多模型的演化,其适用性及精确度逐步提高。基础的CCR与BCC模型<sup>[10]</sup>可以经过互相对比区分出决策单元的技术有效性及规模有效性;后续SBM模型的发明又可将诸如环境污染、碳排放等生产活动的非期望产出纳入考量;超效率模型的创新又可将原本效率值为1的有效单元进行进一步划分。

然而,上述数据包络分析模型<sup>[11]</sup>始终只能进行静态效率的评价,分析效率的时间变化只能通过多组横截面数据所得结果进行横向比较的方式进行。而后学者们在其基础上引入了如

Malmquist、Luenberger等生产率指数,可直接对面板数据进行分析,其计算结果本身即包含了对前期效率结果的比较,能够更直观地反映出各主体的动态效率,且能将变化更为细致地分解为纯技术变化、技术效率变化以及规模技术进步等,便于定位效率变动的关键肇因。

## 3 碳汇及效率影响因素

对碳汇储量及碳汇效率影响因素的定位,是探究碳汇生产方式提升机制的重要手段,也是支撑碳汇领域政策的关键基础。当前,地理探测器、空间回归分析及分解方法皆可对碳汇及碳汇效率的影响因素进行探究,但地理探测器主要应用于单一碳汇量分析,而空间回归分析及分解方法在自然科学与社会科学的交叉研究中适用性广泛,因此多用于碳汇效率的影响因素分析。

### 3.1 地理探测器

随着空间统计学的发展及空间观测技术的普及,空间分层异质性问题在大范围或大数据的研究下日益凸显,主要表现为层内方差小于层间方差<sup>[12]</sup>。基于此,地理探测器假定若某个自变量对某个因变量有重要影响,那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性,并据此构建概率分布模型,分析类型量间的潜在关系。地理探测器尤其以考察两因子对某因变量的隐性交互作用见长,在自然科学、环境科学及社会科学等多种领域皆可应用。

### 3.2 空间回归分析

经济学领域实证研究中对某一变量的影响作用往往通过回归分析来进行,该方法在碳汇领域研究中同样适用。此外碳汇生产效率的影响因素往往带有地域属性,在其研究中往往还可通过加入空间定位数据,进行空间统计回归<sup>[6]</sup>,探究邻近地区对本地区的间接影响。常用的模型包括空间杜宾模型、空间滞后模型与空间误差模型等。各因素在空间上呈现的溢出性,往往证明碳汇量及效率的提升需要通过多地区间协同解决。

### 3.3 分解方法

指数分解方法(IDA)和结构分解方法(SDA)<sup>[13]</sup>常用于能源环境领域,以辨别能源问题的诱因。以往的SDA对数据要求比较高,需要投入产出数据。而IDA中的迪氏分解法(LMDI)<sup>[14]</sup>没有残差,能够有效避开伪回归问题,是一种比较完全的分解方法,可以保持各个分解指标之间的高度一致性,数据要求低,操作性高,适应性强,因此近年来也被广泛应用于碳汇领域影响因素的分解研究方面。

## 4 小结

碳汇领域的研究对于实现碳中和目标和促进可持续发展具有重要意义。碳汇量的估测是碳汇效率与影响因素评价的基础,碳汇效率与影响因素辨析是识别碳汇生产现状的重要途径。当前,我国碳汇领域研究应从以下几点着手加强:①精准估测各地生物载体碳汇储量。完善对不同地区碳汇数据动态监测与合理预测,为碳汇研究深入开展提供数据基础。②持续拓宽增汇潜力驱动机制研究。掌握不同管理条件下碳汇增量的驱动机制与分异规律,系统探究生态系统内各载体同环境的耦合驱动机制。③

交叉创新工业固碳增汇技术。仅通过生物质载体进行降碳处理的方式虽然环境友好,但受自然环境影响过大,开发工业固碳方式,将有利于提高碳中和实现进程的可控性。

#### [参考文献]

- [1]蒋增杰,方建光,韩婷婷,等.大型藻类规模化养殖水域海-气界面CO<sub>2</sub>交换通量估算[J].渔业科学进展,2013,34(01):50-56.
- [2]刘锴,卞扬,王一尧,等.海岛地区海洋碳汇量核算及碳排放影响因素研究——以辽宁省长海县为例[J].资源开发与市场,2019,35(05):632-637.
- [3]Battle,M.(2000).GlobalCarbonSinksandTheirVariabilityInferredfromAtmosphericCO<sub>2</sub>and<sup>13</sup>C.Science,287(5462),2467-2470.
- [4]朴世龙,何悦,王旭辉,等.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(06):1010-1020.
- [5]张琪,秦会艳,黄颖利.森林碳汇计量方法综述——基于黑龙江省的选择[J].资源开发与市场,2013,29(9):982-984.
- [6]Dixon,R.K.;Solomon,A.M.;Brown,S.;Houghton,R.A.;Trexler,M.C.;Wisniewski,J.(1994).CarbonPoolsandFluxofGlobalForestEcosystems.Science,263(5144):185-190.
- [7]王修兰.全球农作物对大气CO<sub>2</sub>及其倍增的吸收量估算[J].气象学报,1996,(4):466-473.
- [8]IPCC.Landuse,landusechange,andforestry[M].Cambridge:CambridgeUniversityPress,2000:1-51.
- [9]陈新华,王厚俊.基于生态效率评价视角的广东省农业生产效率研究[J].农业技术经济,2016(04):94-104.
- [10]BoqiangLin,JiaminGe,Carbon sinks and output of China's forestry sector: An ecological economic development perspective,Science of The Total Environment, Volume 655,2019,Pages 1169-1180.
- [11]李波,王春好,张俊飏.中国农业净碳汇效率动态演进与空间溢出效应[J].中国人口·资源与环境,2019,29(12):68-76.
- [12]王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(01):116-134.
- [13]YantaoLing, Senmao Xia, Mengqiu Cao, Kerun He, Ming K.Lim, Arun Sukumar, Huiyong Yi, Xiaoduo Qian,Carbon emissions in China's thermal electricity and heating industry: An input-output structural decomposition analysis,Journal of Cleaner Production,Volume329,2021,129608.
- [14]孙康,崔茜茜,苏子晓,等.中国海水养殖碳汇经济价值时空演化及影响因素分析[J].地理研究,2020,39(11):2508-2520.

#### 作者简介:

贾国蕊(1998--),女,汉族,河北衡水人,硕士研究生,研究方向:技术经济及管理。