

IPCC 驱动下的林地碳汇估算方法进展

杨 茜 孙 耀*

(农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 碳汇渔业实验室, 青岛 266071)

摘 要 目前最新颁布的《2006 IPCC 国家温室气体清单》中, 主要包括林地、农田、草地、湿地、人类聚居地和其他土地的碳汇功能及其估算方法, 其中水产养殖水域被列入湿地的重要组成部分, 但碳汇功能及其估算方法尚未给出。因林地碳汇研究起步最早, 也最成熟, 且农田、草地、湿地和人类聚居地是在林地研究的基础上发展起来的, 所以本研究在《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》框架下详细介绍了林地碳汇估算方法的进展情况, 希望从中找到对水产养殖碳汇研究的启示。

关键词 IPCC 森林固碳 碳汇 碳源 水产养殖

中图分类号 S718.43 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2013)01-0038-06

Progress of statistic method for forest carbon sink under IPCC

YANG Qian SUN Yao*

(Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Carbon-Sink Fisheries Laboratory, Qingdao 266071)

ABSTRACT The background, function and progress of research on the estimation of carbon sink under “2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories” were introduced in this review. The carbon sink function and measurements newly published in the 2006 IPCC guidelines are for forest, cropland, grassland, wetland, human settlements and other land forms. However, the carbon sequestration function of aquaculture, which is categorized as wetland, has not been given in the guidelines, neither its calculation methods. The carbon storage of forest land was first investigated, and the measurement of carbon storage in cropland, grassland, wetland, human settlement and other land biomass were being built up based on the more matured measures of the forest land. Hopefully some useful message could be drawn from the development of research on forest land carbon sink for that of aquaculture.

KEY WORDS IPCC Forest carbon sink Carbon stocks Carbon source
Aquaculture

20 世纪 80 年代晚期, 随着公众对环境问题的关注, 气候变化也被相应地提到政客们的议事日程上来。

国家自然科学基金面上项目(40876088)、国家重点基础研究发展计划(2010CB428900)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(20603022013003)共同资助

* 通讯作者。E-mail: sunyao@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2012-10-08; 接受日期: 2012-12-19

作者简介: 杨 茜(1984-), 女, 博士, 主要从事环境化学方面的研究。E-mail: yangqian@ysfri.ac.cn

1988 年,在世界气象组织(World Meteorological Organization)与联合国环境规划署(United Nation Environment Program)共同促成下,组建了政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)。自成立以来,IPCC 一直是促进各国决策者合作解决全球变暖的主要驱动力,迄今已发表 4 次评估报告,其中 1990 年 IPCC 发布的第一次评估报告对《联合国气候变化框架公约》的形成起到了重要推动作用,该公约已于 1994 年生效;1995 年发布的第二次评估报告为各国气候谈判提供了关键的数据基础,并促成了《京都议定书》的诞生(韩昭庆 2002)。在京都议定书框架下,发达国家与发展中国家的唯一合作项目被称为“清洁发展机制(CDM)”。根据 CDM 规定,发展中国家通过发达国家提供的投资和技术来促进本国的可持续发展,进行温室气体减排,而发达国家则可得到二氧化碳减排量,来满足其减排承诺。CDM 机制属于《京都议定书》框架下的强制减排交易,从全球森林碳汇市场发展的特征来看,1998~2007 年碳交易市场交易量从接近于零增长到总值超过 600 万欧元(Ingo 2009),说明全球森林碳汇市场规模呈迸发性增长的态势,碳交易市场潜力巨大。

温室气体排放数据集是国际上开展温室气体排放评价与减排责任谈判的数据基础,国际上开展全球范围温室气体排放数据收集、分析、计算、评价、建档、信息发布工作的主要机构有 EIA、WRI、UNFCCC、IEA、CDIAC 和 Eurostat,各机构的成立时间、功能简介及统计方法如表 1 所示。

表 1 温室气体评价机构及统计方法(曲建升等 2008)

Table 1 Institutes for greenhouse gases evaluation and their statistical methods(Qu *et al.* 2008)

机构名称 Institute	成立时间 Time of establishment	功能简介 Brief introduction of function	统计方法 Statistical method
美国能源信息管理局 EIA	1977	由美国国会批准建立,是美国能源部(DOE)的独立联邦统计机构。	IPCC 基准方法
世界资源研究所 WRI	1982	由 100 多名科学家、经济学家、商业分析家、统计学家等组成,是一个独立的非赢利机构。	气候分析指标软件(CAIT)和 IPCC 基准方法
《联合国气候变化框架公约》 UNFCCC	1992	是国际社会在对付全球气候变化问题上进行国际合作的一个基本框架。	IPCC 指南的基准方法和部门方法
国际能源署 IEA	1974	在经济合作与发展组织(OECD)框架下建立的自治机构。	IPCC 指南的基准方法和部门方法
美国橡树岭国家实验室 CO ₂ 信息分析中心 CDIAC	1982	是美国能源部(DOE)重要的全球变化数据和信息分析中心。	以公开发表的成熟方法为基础,进行温室气体排放量计算
欧盟统计局 Eurostat	1997	涉及的统计对象涵盖欧盟经济社会活动的主要方面,是欧盟统计工作的最高行政机构。	欧洲统计系统

从表 1 可以看出,全球温室气体的评价机构多数采用 IPCC 指南中的基准方法(即 IPCC 负责编制的《国家温室气体清单》)对温室气体进行统计。自 1996 年起,IPCC 先后组织编写了《1996 IPCC 国家温室气体清单指南》(《1996 年指南》)、《IPCC 优良做法指南和不确定性管理》、《IPCC 土地利用、土地利用变化和林业优良做法指南》(《优良作法指南》)和《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》(《2006 年指南》)。其中《2006 年指南》是应 IPCC《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)邀请编制的,旨在更新《1996 年指南修订本》和《优良作法指南》,它们提供了国际认可的方法学,可供各国用来估算温室气体清单,以向《联合国气候变化框架公约》报告。

根据《2006 年指南》,将陆地生态系统按照农业、林业和其他土地利用方式(AFOLU)的年度固碳功能估算如下:

$$\Delta C_{AFOLU} = \Delta C_{FL} + \Delta C_{CL} + \Delta C_{GL} + \Delta C_{WZ} + \Delta C_{SL} + \Delta C_{OL} \quad (1)$$

式中, ΔC 为碳库变化,AFOLU 为农业、林业和其他土地利用方式,FL 为林地,CL 为农田,GL 为草地,WL 为湿地,SL 为人类聚居地,OL 为其他土地。

湿地(WL)从广义上被定义为包括沼泽、滩涂、低潮时水深不超过 6m 的浅海区、河流、湖泊、水库、稻田等

全年或者1年中部分时间被水覆盖或渗透的区域。根据拉姆萨尔关于人造湿地的分类,将水产养殖区域纳入湿地的范畴,该范畴属于IPCC术语中湿地的亚类——水淹池,目前该领域固碳的方法学指南尚未建立。

林地是陆地生态系统固碳功能的主体,该领域的研究起步最早也最为成熟,是各种土地利用方式中唯一进入碳交易市场的部分。从农田、草地、湿地、人类聚居地和其他土地的碳库估算方法的建立过程可以看出,其均是以林地的固碳方法作为参照,逐步建立起来的,所以为建立水产养殖海域的固碳方法,应当详细了解“森林碳汇”的发展过程。

1 森林碳汇功能及其估算方法的进展

IPCC认为完整的、破坏较少的森林可以看作是二氧化碳的汇,碳汇的量主要来自于生物量、死有机质和土壤碳的固碳量(表2)。

表2 各种土地利用类别中使用的碳汇定义(IPCC,2006)

Table 2 Definitions for carbon pools used in AFOLU for each land-based category(IPCC,2006)

碳库 Carbon pool	说明 Description	
生物量 Biomass	地上部生物量 Above-ground biomass	土壤以上的所有草木活体植物和木本活体植物生物量,包括茎、树桩、枝、树皮、籽实和叶。
	地下部生物量 Under-ground biomass	活根的全部生物量。直径不足(建议的)2 mm的细根有时不计在内,因为往往不能凭经验将它们与土壤有机质或枯枝落叶相区分。
死有机质 Dead organic matter	死木 Dead wood	包括不含在枯枝落叶中的所有非活性的木材生物量,无论是直立的、横躺在地面上的、或者在土壤中的。死木包括横躺在地表的木材、死根和直径大于或等于10 cm(或者国内特定的直径)的树桩。
	枯枝落叶 Litter	包括直径大于对土壤有机质的限定(建议2mm)而小于国家选定的最小直径(例如10 cm)、躺在矿质土或有机质土上或内已经死亡的、腐朽状况各不相同的所有非活生物量。包括通常在定义在土壤类型中的枯枝落叶层。在凭经验不能加以区分时,矿质土或有机质土上的活细根(小于建议的地下部生物量直径限度)包括在枯枝落叶中。
土壤 Soil	土壤有机质 Soil organic matter	包括达到国家选择的规定深度的矿质土中的有机碳,并在时间序列中统一使用。在凭经验不能加以区分时,土壤中的活细根、死细根和死有机物质,小于针对根和死有机物质的最小直径限度(建议2mm),包括在土壤有机质中。

森林固碳的评估方法通常分为样地清查法和微气象学法(殷鸣放等 2010;何英 2005),其中样地清查法中的“生物量转换因子连续函数法”和“遥感估算法”是《2006年指南》中统计生物量、计算温室气体采用的主要方法。本研究将以森林固碳量的发展过程为序,对林地碳汇估算方法进行介绍。

1.1 样地清查法

样地清查法指的是:在典型样地中,通过准确测量一定时期内森林生态系统中总碳库储量及其变化情况进而对样地含碳量进行的推算方法,计算公式如下:

$$C=G \times S \times CF \quad (2)$$

式中, C 为总碳量(吨), G 为生物量(吨干物质/公顷), S 为林分面积(公顷), CF 为干物质的碳含量。

根据生物量的获取方法可进一步将样地清查法分为平均生物量法、生物量转换因子法、生物量转换因子连续函数法和遥感估算法4种方法。

1.1.1 平均生物量法

早在20世纪60~70年代进行的国际生物学计划(IBP)之前,平均生物量法已经被广泛应用。该方法主要基于野外实测数据,通过样地面积、森林类型和平均生物量来获取 G 值。随着平均生物量法的发展,又将其分为皆伐法、标准木法以及相关曲线法。

皆伐法:将单位面积中挺立的树木伐倒后测其鲜重,通过换算得到干重,即为单株树木的生物量,平均生物

量为单株树木生物量的总和与株数的商。

标准木法:根据样地中标准木来推算林分平均生物量的方法,平均生物量为标准木各组分的生物量之和与样地树木株数的乘积。

相关曲线法:在样地中选取样木,伐倒后按器官称重,将各器官生物量与样木指标进行回归分析,建立方程,通常以实测的胸径、树高来推算林分的平均生物量。目前使用的主要回归方程如下:

$$G = a \times d \times b \quad (3)$$

$$\text{或: } G = a \times (d^2 \times h) \times b \quad (4)$$

式中, G 为各林分平均生物量(吨干物质/公顷), d 为胸径(cm), h 为树高(m), a 、 b 为待估参数。

平均生物量法的优势是成本低廉、操作简便、直观明确,缺点在于研究结果的可靠性和可比性较差;一般会对实地生物产生破坏,且工作量巨大;采用生长较好的林分作为样地估算固碳量将导致固碳量估算正误差;将地下部分、死有机质及土壤碳列为缺省值将导致固碳量估算误差。

1.1.2 生物量转换因子法

生物量转换因子法是继平均生物量法之后,在国际生物学计划(IBP)期间被逐渐纳入使用的。定义式如下:

$$C = BEF \times V \times CF \quad (5)$$

$$BEF = G/V' \quad (6)$$

式中, C 为总碳量(吨), BEF 为生物量转换因子, V 为总蓄积量(所有胸径超过 x cm 活的树的带皮材积,单位是(吨干物质/公顷)), CF 为干物质的碳含量(通常采用 0.45~0.55 吨碳/吨干物质), G 为生物量(吨干物质/公顷), V' 为材积量(吨干物质/公顷)^①。

生物量转换因子法较平均生物量法的进步之处在于,有效降低了对实地生物产生的破坏,也降低了工作量,但是在进行大尺度森林生物量的推算中 BEF 值及森林清查资料所提供的森林总面积和蓄积量等数据大多使用平均值,因此在估算森林生物量时几乎无法十分准确地得到结论。

1.1.3 生物量转换因子连续函数法

Fang 等(2002)提出的生物量转换因子连续函数法在《Science》上得到了发表,该法是目前包括《2006 年指南》在内的国际普遍接受的一种估算森林碳汇量的方法。该法综合考虑了立地、林龄、个体密度以及林分状况等变化因素,具体推断过程如下:

$$BEF = a + b/V' \quad (7)$$

式中, a 和 b 均为常数,生物量换算因子(BEF)与林分材积呈倒数关系。林分生物量(y)为林分的面积(A)、蓄积量(V)和所对应的换算因子(BEF)3 项的乘积:

$$y = A \times V \times BEF \quad (8)$$

由于 BEF 为变量,故理论上为了区分年龄、立地质量、密度级等可以将总生物量表示为:

$$Y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k A_{ijl} \times BEF_{ijl} \times x_{ijl} \quad (9)$$

式中, Y 为某一森林类型的总生物量, i 、 j 、 l 分别表示省区、地位级和龄级, A_{ijl} 、 x_{ijl} 、 BEF_{ijl} 分别表示 i 省区、 j 地位级和 l 龄级林分的面积、平均蓄积量以及换算因子, m 、 n 和 k 分别表示省区、地位级以及龄级的数量。

将(7) 带入(9) 化简:

$$\begin{aligned} Y &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k A_{ijl} \times (a + b/V_{ijl}) \times V_{ijl} \\ &= \sum_{i=1}^m A_i \times V_i \times BEF_i \end{aligned} \quad (10)$$

式中, Y 、 A 、 V 和 BEF 分别是各省总生物量、总面积、平均蓄积量和所对应的换算因子;同理该方法在全国

① 总蓄积量(V) = 林地中活立木材积量(V')之和

也适用。

生物量转换因子连续函数法较之前的进步之处在于该方法将现场测定的变量考虑其中,适用性广泛,适合长时期、大面积的森林碳储量监测。

1.1.4 遥感估算法

20世纪70年代开始随着遥感技术(RS)和地理信息系统(GIS)的快速发展,遥感估算法也开始被采用,尤其是90年代以后,遥感技术已经成为研究森林地上生物量的重要工具,该方法也是《2006年指南》选用的数据收集方法之一。该方法通过RS和GIS等技术获取各种植被状态参数,与地面调查相结合以完成植被的空间分类和时间序列的分析。

利用该法测定森林生物量、计算大面积森林生态系统的碳储量的优势在于相对快速,能够准确地获取森林生物量信息;不会对实地生物产生破坏;可以长期、动态、连续地估算森林地上生物量。该方法的缺点在于遥感应用不能为图像分析提供较准确的三维空间数据,给生物量估算结果带来了许多不确定性;另一方面,由于树木的生长受光照、温度及水分等限制因子的作用,在不同时期树枝、树干及树冠与生物量之间关系会有所不同,因此该方法不适用于短期、小尺度森林地上生物量的估算,目前该方法被广泛用以辅助测定大面积森林地上生物量。

1.1.5 小结

以上方法的共同特点是技术简单,获得的成果直接、明确。适用于大时间尺度和大面积尺度的森林碳储量监测,是目前普遍采用的估算生物量进而计算森林碳汇的方法。

1.2 微气象学法

微气象学是研究小范围地区内的、靠近地面的、薄层空气的气象特点的学科。在林地固碳中利用微气象学的概念,通过仪器设备直接测量林地固碳量,不会干扰环境,能够提供一个紧密的、长期的网络,以监测区域CO₂的平衡状况,能为其他模型的建立和校准提供基础数据。主要包括涡旋相关法、驰豫涡旋积累法、箱式法等。微气象学法的思想产生得较早,但是因为涉及到的仪器设备昂贵,所以这一技术直到1989年才被应用于森林碳通量的研究,但是迄今尚未推广,因此仅对该法做简要介绍。

1.2.1 涡旋相关法

该法通过仪器设备直接测定林冠上方CO₂的涡流传递速率,通过公式:

$$F_c = \overline{\rho'W'} \quad (11)$$

计算出森林生态系统吸收固定CO₂量的方法。式中, F_c 为CO₂通量, ρ 为CO₂浓度, W 为垂直方向上的风速。字母的右上标“'”代表涡旋波动,横“—”代表平均值。目前,在全球范围的若干区域已建立了欧洲网(EuroFlux)、美洲网(AmeriFlux)、加拿大北方森林的Boreas、中海网(MedeFlu)和亚洲网(AsiaFlux)等CO₂通量网络系统。

1.2.2 驰豫涡旋积累法

根据垂直风速的大小和方向,采集一段时间内上风向和下风向两组气袋中气体的样本进行测量:

$$F_{CO_2} = \beta \times \sigma_w \times \rho_{air} \times (C_{up} - C_{down}) \quad (12)$$

式中, F_{CO_2} 为CO₂通量, β 为半经验常数(0.56), σ_w 为垂直风速的标准差, ρ_{air} 为空气浓度, $C_{up} - C_{down}$ 为一段时间内CO₂浓度平均值之差。

1.2.3 箱式法

该方法的基本思想是:将植被的一部分密闭在独立的系统内,测定CO₂浓度随时间的变化。

$$FV = \frac{\Delta C}{\Delta t} \quad (13)$$

式中, F 为CO₂浓度随时间的变化, V 为独立系统的体积, $\frac{\Delta C}{\Delta t}$ 为CO₂的变化速率。

对森林生态系统中碳平衡的研究是一项长期的发展过程,随着研究的深入,目前对碳通量的研究一般采用

多种方法结合的手段进行分析,以获取最准确的估算结果。

2 林业碳汇对渔业碳汇发展的启示

根据其他类型碳库建立的经验,认为渔业碳库的发展需要借鉴林业碳库的发展模式和 IPCC 的基本方法进行摸索。从以上分析得到的启示如下:

1)目前森林碳汇的计算大都是通过生物量估算的。在渔业碳汇中,利用本国水产养殖年鉴记录,结合地理信息系统和遥感技术,确定水产养殖碳库固碳量,是一条可行的方法。

2)IPCC 提供的参数的缺省值和保守性假设,可以应用于渔业碳库的估算,以解决渔业碳库影响因素复杂的问题。

3)应参照 IPCC 中“各种土地利用类别中使用的碳汇定义”(表 2),将养殖渔业碳库分为生物量、死有机质和沉积物有机质计算,以确保养殖渔业碳库计算的完整性和可比性。

4)应当参照生物量转换因子连续函数法的理念,充分考虑水产养殖生态系统碳源汇的各种变化因素,根据水产养殖生态系统自身的特性寻找适合该领域的计算方法。

参 考 文 献

- 曲建升,曾静静,张志强. 2008. 国际主要温室气体排放数据集比较分析研究. 地球科学进展, 23(1):47-54
- 何 英. 2005. 森林固碳估算方法综述. 世界林业研究, 18(1):22-27
- 杨 茜. 2012. 东、黄海泥质区沉积断面中古生产力的长期记录,见:中国海洋大学博士研究生学位论文
- 韩昭庆. 2002. 京都议定书的背景及其相关问题分析. 复旦学报(社会科学版), 2:100-104
- 殷鸣放,杨 琳,殷炜达,毕刚蕊,张艳会,李智伟,谭希斌. 2010. 森林固碳领域的研究方法及其最新进展. 浙江林业科技, 30(6):78-86
- Fang JY, Chen AP, Peng CH and 2 others. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science* 292:2320-2322
- IPCC IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Green house Gas Inventories, Chapter 2: Energy. Kanagawa
- IPCC, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; Reference Manual
- IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006; in press
- Ingo P. 2009. The Future of International Carbon Markets and its relevance for Project Developers in Thailand, TTSA, July
- Jiao NZ, Tang K, Cai HY, Mao YJ. 2011. Increasing the microbial carbon sink in the sea by reducing chemical fertilization on the land. *Nature Reviews Microbiology* 9(1):75