

区域尺度陆地生态系统固碳速率和潜力定量 认证方法及其不确定性分析

任 伟^{1,2}, 王秋凤¹, 刘颖慧³, 何念鹏¹, 刘迎春^{1,2}, 付 超^{1,2}, 于贵瑞¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, CERN 综合研究中心, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 北京师范大学, 北京 100875)

摘 要:区域尺度陆地生态系统固碳速率和潜力定量认证的方法及其不确定性分析是国家应对气候变化的重要基础工作。目前国内外对于陆地生态系统碳汇以及增汇潜力计量方法已经开展了大量的研究, 提出了温室气体排放清单的计量方法, CDM(清洁发展机制)造林再造林项目碳汇的计量方法, 以及土地利用变化碳汇计量等方法, 国家温室气体清单的方法仅适用于国家范围的碳汇计量, 对于区域碳汇计量却十分粗略。CDM造林再造林项目仅局限于森林管理等项目, 而未涵盖将来可能列入碳汇目标的其它生态系统增汇管理措施。目前, 关于森林、草地、农田等区域尺度生态系统碳汇计量还没有形成统一的、标准化的方法体系。本文对IPCC国家尺度的碳排放和陆地增汇技术评估方法体系、土地利用对陆地碳源汇影响的评价方法、以及人为管理措施下陆地生态系统增汇效应计量方法进行了详细的阐述, 并对每种计量方法的不确定性进行分析, 期望为中国陆地生态系统固碳速率、增汇潜力的计量、报告、认证和核查方法论和技术体系的建立提供依据。

关 键 词:区域尺度; 陆地生态系统; 增汇潜力和速率; 增汇计量方法; 不确定性分析

1 引言

自工业革命以来人类向大气排放大量的温室气体, 导致大气CO₂等温室气体浓度升高, 全球温度升高, 带来较为严重的生态后果^[1]。因此减少温室气体排放、增加陆地生态系统固碳量、增强其固碳能力是减缓气候变暖的有力措施。

中国面临着温室气体减排的严峻挑战, 在哥本哈根大会上中国政府已经向世界庄严承诺: 将采取自主行动使得2020年的单位GDP碳排放比2005年减少40%~45%, 非化石能源的比例达到15%, 新增加森林面积4000万hm², 增加木材蓄积量30亿m³。兑现这一承诺迫切地需要建立和研究中国陆地生态系统碳循环、固碳速率、增汇潜力及其定量认证研究的方法体系。

目前国内外对陆地生态系统碳汇功能以及增汇潜力的计量方法研究较多^[1-9], 提出了国家温室气体清单计量方法、CDM(清洁发展机制)造林与再

造林项目严格的碳汇计量方法、土地利用及土地覆被变化中碳源汇等计量方法, 多数的计量方法均是针对IPCC的方法体系与本国的实际情况结合的方法体系^[5]。然而IPCC提出的国家温室气体清单的方法仅适用于国家尺度的温室气体计量, 而CDM造林与再造林项目中碳汇的计量虽然适用于区域尺度的碳汇计量, 但却仅针对固碳稳定性较高的造林与再造林项目, 而未涉及草地、农田管理等将来可能纳入可认证范围的陆地生态系统碳汇的计量方法, 而区域尺度上森林、草地、农田等区域尺度人为增汇管理措施下生态系统固碳潜力和固碳速率的计量目前还没有统一的、标准化的方法体系。为探讨这一问题, 本文将从目前陆地生态系统采用的碳汇计量方法出发, 包括国家温室气体碳汇计量方法、CDM造林与再造林项目、土地利用与土地覆被变化碳汇计量三种碳汇计量方法的原理、对象、适用范围、碳汇计量的关键公式以及不确定性等几方面进行综合分析和比较, 从而探讨适宜区域尺度上

收稿日期: 2011-01; 修订日期: 2011-04.

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050602); 国家基础研究发展计划项目(2010CB833504); 中国科学院知识创新工程重要方向项目群(KZCX2-YW-Q1-05)。

作者简介: 任伟(1985-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为气候变化与全球碳循环。

通讯作者: 于贵瑞, 研究员, 主要研究方向为生态系统碳循环与全球变化。E-mail: yugr@igsrr.ac.cn

森林、草地、农田生态系统固碳潜力、速率的计量方法。为我国陆地生态系统固碳速率、增汇潜力的计量、报告、认证和核查提供方法论基础。

2 IPCC 的国家温室气体排放计量方法及其不确定性分析

2.1 IPCC 国家温室气体排放计量方法

2.1.1 国家温室气体排放的计量对象与方法

《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)要求所有缔约方国家或地区都要提供国家或区域的各种温室气体排放源和吸收汇清单。1996年IPCC要求提供二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)三种温室气体的排放清单,其评估方法的技术路线是:按照能源活动、工业生产过程、农业活动、土地利用变化和林业、城市废弃物处理等5个部门来统计,再对每一部门按照活动类别、技术类型等分解为若干亚类的活动(水平)数据(AD)与排放因子(EF),采用算数相乘后,加总得到各种气体的排放量,即:

$$\text{某种温室气体排放量} = \sum AD \cdot EF \quad (1)$$

式中:AD反映部门导致温室气体排放发生的活动水平(幅度);EF表示单位活动排放量的系数^[8]。2006年IPCC国家温室气体排放清单报告中含温室气体除CO₂、CH₄和N₂O,还包括氢氟烃(HFCs)、全氟碳(PFCs)、六氟化硫(SF₆)、三氟化氮(NF₃)、五氟化硫三氟化碳(SF₅CF₃)、卤化醚(如C₄F₉OC₂H₅、CHF₂OCF₂OC₂F₄OCHF₂、CHF₂OCF₂OCHF₂)、以及《蒙特利尔议定书》未涵盖的其他卤烃物质^[3](CF₃I、CH₂Br₂、CHCl₃、CH₃Cl、CH₂Cl₂)。同时还将温室气体排放量和清除量的部门调整为:能源活动、工业过程和产品使用(IPPU)、农业活动、林业和其他土地利用、废弃物处理与其他5个部门,在每一部门之下又进一步包括了各个类别和亚类。其排放总量仍是采用式(1)的基本方程统计。

为推动编制高质量的国家温室气体清单,《2006年IPCC国家温室气体清单指南》运用了一些重要的概念,还特在以前的指南中界定了一组方法学特征、行动和程序,被统称为“优良作法”。《2006年IPCC国家温室气体清单指南》将评估各个部门温室气体排放的方法分为3个层级。第1层是基本

方法,其排放因子可采用缺省值(默认的世界平均值),活动水平可利用简单的统计结果。第2层是中级方法,可以采用特定的排放因子和更详尽的活动水平数据。第3层要求最高,可采用过程模型,排放因子可以是模型参数,以及具有基于地理信息的活动水平数据。《2006年IPCC国家温室气体清单指南》还提出关键类别和决策树的概念。关键类别是指对一个国家的温室气体总量有重要影响的类别,这些类别对排放量和清除量的绝对水平、排放量和清除量的走势或排放量和清除量的不确定性有重要影响。决策树是帮助清单编制者浏览指导,并根据其对关键类别的评估,选择适合本国具体情况的方法层级^[3]。

2.1.2 农林和其他土地利用部门的年度碳库变化

依据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》的方法定义,整个农林和其它土地利用部门的年度碳库变化是所有土地利用类别碳库变化的总和^[3],即

$$\Delta C_{AFOLU} = \Delta C_{FL} + \Delta C_{CL} + \Delta C_{GL} + \Delta C_{WL} + \Delta C_{SL} + \Delta C_{OL} \quad (2)$$

式中:ΔC为碳库变化;下标AFOLU代表农业、林业和其他土地利用;FL为林地;CL为农田;GL为草地;WL为湿地;SL为聚居地;OL为其他土地利用类型。

一种土地利用类别的年度碳库变化则是类别内各层次变化的总和,即:

$$\Delta C_{LU} = \sum_i \Delta C_{LU_i} \quad (3)$$

式中:ΔC_{LU}为一种土地利用(LU)类别的碳库变化;i表示土地利用类别内的一种特定层或亚类(按照种类、气候带、生态型、管理制度等任意组合)。

某种土地利用类别中一个层的年度碳库变化,ΔC_{LUi}为:

$$\Delta C_{LU_i} = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} + \Delta C_{LI} + \Delta C_{SO} + \Delta C_{HWP} \quad (4)$$

式中:下标AB表示地上部生物量;BB为地下部生物量;DW为枯死木;LI为凋落物;SO为土壤;HWP为采伐的木材产品。

给定库中的年度碳库变化是一个增加和损失的函数(增加-损失方法):

$$\Delta C = \Delta C_G - \Delta C_L \quad (5)$$

式中:ΔC为库中的年度碳库变化(tC/a);ΔC_G为碳库的年增加(tC/a);ΔC_L为碳库的年损失(tC/a),这种方法称之为碳通量法。也可以采用IPCC(2006)

推荐的精度更高的碳贮存量法,即采用2个时点间年均变化量表示一个给定碳库中的变化(库-差别方法)。

$$\Delta C = \frac{(C_{t_2} - C_{t_1})}{(t_2 - t_1)} \quad (6)$$

式中: ΔC 为年度碳库变化(tC/a); C_{t_1} 为时间 t_1 的碳库量(tC); C_{t_2} 为时间 t_2 的碳库量(tC)。

如上所述,可以通过对各个类别,以及每个类别下每种层次的地上生物量、地下生物量、枯死木、凋落物、土壤碳、采伐木产品的碳增加量或碳损失量分别采用式(2)-(5)计算,可得到给定库中的年度碳库变化。另外我们还可以利用式(6)直接评估碳库储存量的变化速率。

2.2 温室气体排放计量的不确定性分析

《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)要求所有缔约方提供各种温室气体排放源和吸收汇的国家清单,因此如何最大限度地减低各国清单的不确定性就成为科技界的重要任务。

当采用IPCC给出的缺省因子编制温室气体清单时,因为其缺省因子是在全球有限的实验中获得的经验常数,这是按气候、地区不同植被类型分类得到的参数,所以清单的结果不可能代表各国的真实状况,也只能是接近真实值的一个估计值。

当采用高级别的方法估算时,理论上所使用的是本国的实测值或实验参数、过程模型模拟方法使其估计结果更符合当地实际状况。但采用方法的层次越高,需要的数据也越多,精度越高,实际调查时间、经济、人力成本升高。

式(1)中的 AD 是反映部门活动导致排放发生的水平(幅度), EF 则是量化单位活动排放量的系数。 AD 主要是来源于国家统计与监管机构的统计数据、联合国统计资料、国际行业协会技术报告等国内和国际文献,以及国家统计机构或其他部门专门的调查与普查信息。 EF 主要来源专门的文献、以及利用测量技术得到的数据与数据集。 EF 的获取难度与不确定性更大。它虽然通过了多轮的学术讨论和广泛的科学研究,但是因为各种排放因子的空间变异性极大,要获得不同区域的精确参数还十分困难。

由此可见, AD 和 EF 的数据不完整或缺乏代表性,统计随机取样误差、测量误差以及错误报告或错误分类等原因都会导致特定活动类别的活动数

据与排放因子或参数的不确定性,从而导致清单估算结果的不确定性。

3 土地利用变化对陆地碳收支影响的评价方法及其不确定性分析

3.1 土地利用变化对陆地碳收支影响计量评价方法

土地利用/覆盖类型是决定陆地生态系统碳存储的关键因素,土地利用/土地覆盖形式由一种类型转换为另一种类型会伴随着大量的植被和土壤碳存储的变化^[10-11]。全球土地利用变化引起的陆地与大气间的碳交换量是根据土地类型的历史数据和半经验排放常数估算得到的,“簿记模型(Book-keeping model)”^[6]是目前被最为广泛应用的统计方法。簿记模型的主要原理是:按照 Whittaker 和 Lik-en 的分类系统划分了69种生态系统类型^[12],模型给出每种植被类型和土壤碳储量在森林采伐和更新、自然生态系统转化为草地、人工造林、耕地草场撂荒和毁林等几项人为干扰下的响应曲线^[13]。尽管每一种响应曲线的形式相似,但幅度和方向有所差异^[14]。统计每种生态系统类型的面积以及干扰类型作用的时间,累加植被和土壤的碳储量的年际变化值即可评估生物碳库储量的变化及碳排放量。

IPCC第三次评估报告也采用了这一方法的估算结果,认为20世纪80年代因土地利用方式的改变,全球陆地已向大气中排放1.7 GtC/a。后来,在新的观测资料基础上又更新了80年代的估算值^[15],使其数值提高到了 2.0 ± 0.8 GtC/a,并且进一步估算了90年代的排放量为 2.2 ± 0.8 GtC/a。然而,一些学者^[16-17]也利用“簿记”模型,并借助于遥感资料进行空间尺度推演,所得到的CO₂排放量则低于Houghton的估算。IPCC第四次评估报告将这些研究结果^[16-17]的平均值作为20世纪90年代土地利用方式改变向大气中释放的CO₂量。

3.2 土地利用变化的数据获取及其主要评估方法

3.2.1 时间序列的对比分析方法

时间序列的对比分析是通过同一空间区域内不同时间序列的土地利用状况的差异分析,就可以获得研究区域在这一时间段内的土地利用变化结果^[18]。在卫星遥感数据非常丰富的近几十年,采用这一方法对于从景观到全球尺度的土地利用变化评价结果都具有较高的可信度^[19],但关于20世纪

80年代之前的土地利用变化状况,现在还是更多地依赖于历史的土地利用清查数据及文献记述^[20]。此类信息源不仅缺乏足够的时间连续性,而且在不同区域的可获得性也差异巨大,使得时间序列对比分析方法难以在更长的时间跨度和空间范围内广泛应用。其另一个缺陷是通常忽略了碳源和碳汇功能在很大程度上是取决于土地利用的变化过程,而应用此种方法仅能给出研究时段开始和结束两个时间点的土地利用的差异。

3.2.2 土地利用变化的模型分析方法

模型是研究土地利用变化的主要方法^[21]。这些模型在空间尺度、应用目标以及过程机制方面都有很大差别。为易于应用,此类模型通常简化了驱动土地利用变化因素的复杂性,突出了主要驱动力的作用,但也正由于这种过度的简化,导致模型难以体现出各种驱动因子之间的相互作用关系,使其普适性不足、预测性不强。

3.2.3 土地利用变化的卫星遥感分析方法

目前土地利用数据的主要来源之一是各种卫星和航空遥感数据。对遥感影像数据的解译分类依据于专业人员知识的人工解译方法,通常可以达到80%~90%的定性分类精度^[22],适合于小区域内的土地利用分类判别。而对于区域尺度而言,人工解译的成本较高,更多地是采用基于计算机判别算法的监督分类或非监督分类方法。自动分类算法需要辅助数据,其分类精度往往比人工解译低,而且非监督分类算法获得的结果与土地利用和土地覆盖标准分类系统之间也会存在不一致性。

3.3 土地利用变化对陆地碳收支影响的评估的不确定性分析

应用其评价土地利用变化对陆地碳收支影响的所带来的不确定主要由以下几个因素引起。

3.3.1 土地利用变化面积统计的可靠性

由于现在经常采用的土地利用变化评估方法的局限性,土地利用变化的数据获取方法的确定性程度以及土地利用变化历史数据的匮乏,使得所建立时间序列土地利用变化面积统计资料的可靠性备受质疑。

3.3.2 土地利用变化空间格局分析的真实性

由于气候、土壤和植被分布的空间异质性等因素影响,在不同的地理区域,相同土地利用转换方式对植被和土壤碳收支的影响是不同的,因此客观地评价区域土地利用对陆地碳收支的影响必须要

有客观真实的土地利用变化空间格局为基础数据。虽然卫星遥感技术进步为土地利用变化评价提供了丰富的数据资源,但是由于卫星观测数据的历史不长,及其土地利用分类和观测数据解译技术等方面限制,依然难以获得人们所期待的接近真实的土地利用变化空间格局数据集。

3.3.3 土地利用类型转换对碳库影响评价的区域代表性

土地利用类型转换对碳库影响评价的关键问题是如何获取不同区域、各种土地利用方式转换之间的碳固定或碳排放因子,现在所使用的不考虑碳固定或碳排放因子时空变化的取值方案显然是难以被接受的,解决这一问题就需要有足够空间代表性的观测和试验数据为支撑。其不确定性取决于监测点的代表性和测定频率,监测点越多,监测间隔期越短,工作量越大,成本就越高。利用数学模型评估土地利用变化对陆地碳收支的影响是日趋成熟的一种方法,但模型的有效性、尺度转换、空间化栅格参数的误差等方面都会导致评估结果的不确定性^[23]。

3.3.4 土地利用变化过程对碳收支的影响

利用“薄记模型”评估土地利用变化过程对陆地碳收支影响的一个严重缺憾是没有考虑土地利用转换后的植被变化过程、以及气候和环境因素变化对生态系统碳循环的影响。

4 陆地生态系统的CDM项目碳汇认证方法

CDM项目可进行交易的碳汇计量与认证限定了项目活动的类型,是特指在1990年之后直接由人类引起的土地利用、土地利用变化和林业(Land Use, Land-Use Change and Forestry)活动(限于第三条第3款中的造林、再造林和砍伐森林,以及第三条第4款下选定的由人类引起的任何活动,这些活动可能是:森林管理、植被重建、农田管理和放牧地管理)导致的生态系统碳库增加。

CDM造林与再造林项目碳汇是由于人为措施以及项目实施在项目边界内产生额外碳固定,是指项目实施后边界内碳储量的变化量减去基线情况下碳库变化值、在边界外产生的碳泄露,以及项目边界内增加的排放量。因此对于碳汇项目的计量一般遵循以下的步骤:首先,要有严格和明确的项

目实施的界限;其二,监测地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤碳库、凋落物碳库、枯死木、采伐的木材产品碳库;其三,计算由于该项目的实施导致的边界内温室气体的排放量、碳泄露量以及基线碳储量的变化。以森林项目为例,森林碳汇增加量可用以下公式计算^[4]。

$$C_{proj,t} = \Delta C_{proj,t} - GHG_{E,t} - LK_t - \Delta C_{BSL,t} \quad (7)$$

式中: $C_{proj,t}$ 为第 t 年的项目净碳汇量($\text{tCO}_2\text{-e/a}$); $\Delta C_{proj,t}$ 为第 t 年项目碳储量的变化量($\text{tCO}_2\text{/a}$); $GHG_{E,t}$ 为第 t 年项目边界内增加的温室气体排放量($\text{tCO}_2\text{-e/a}$); $\Delta C_{BSL,t}$ 为第 t 年基线碳储量变化量($\text{tCO}_2\text{-e/a}$); LK_t 为第 t 年项目活动引起的泄漏($\text{tCO}_2\text{-e/a}$); t 为项目开始后的年数(a)。

对于 CDM 碳汇项目计量,其首要任务界定项目的边界,只有给定边界才可以对区域内碳库变化情况,以及增汇技术措施产生的效果进行监测和核查。其次,确定碳库和温室气体排放源和计量方法。第三,分层计量基线碳储量变化,项目碳储量变化,项目边界内温室气体的排放和泄漏。其中的泄漏是指在某块土地上进行的固碳活动无意识地直接或间接引发了其他某些活动,它们有可能部分或全部抵消最初行动的固碳效果^[24]。

5 人为增汇项目碳汇计量

5.1 人为增汇项目碳汇计量方法

人为增汇项目计量是采取人为措施后可能带来的生态系统增汇量,人们主要关注措施实施区域在所有条件最优化下生态系统增汇的最大潜力,以及由于生态工程、政策管理等措施实施导致额外增加的生态系统碳储量。综合 CDM 造林与再造林碳汇计量方法和 IPCC 碳汇计量方法^[1-8],并结合生态系统碳汇计量的方法^[5,9],可得到森林、草地、农田等生态系统人为增汇碳汇的计量方法如下。

当考虑碳泄露和边界内温室气体排放时:

$$PICS_{cj} = CSC_{Pj} - CSC_{Bj} - GHG - LK \quad (8)$$

$$PICS_{Rj} = CSR_{Pj} - CSR_{Bj} - GHG - LK \quad (9)$$

在不考虑边界内碳泄露因素时:

$$PICS_{cj} = CSC_{Pj} - CSC_{Bj} \quad (10)$$

$$PICS_{Rj} = CSR_{Pj} - CSR_{Bj} \quad (11)$$

式中: $PICS_{cj}$ 是 j 种情景下或 j 种驱动因素影响下

增加的固碳量; CSC_{Pj} 和 CSC_{Bj} 分别为对应的 j 种情景下或因素驱动下的潜力固碳量和基准固碳量; $PICS_{Rj}$ 是 j 种情景下或 j 种驱动因素影响下增加的固碳速率; CSR_{Pj} 和 CSR_{Bj} 分别为对应的 j 种情景下或因素驱动下的潜力固碳速率和基准固碳速率; GHG 表示实施的项目边界内温室气体的排放量; LK 表示由于此固碳措施的实施导致的碳泄漏量。

针对于不同的生态系统采用的固碳潜力和速率的计量方法如下:

(1) 森林生态系统

在考虑碳泄露和边界温室气体排放时森林碳汇计量公式为:

$$\begin{aligned} PICS_{cj} &= CSC_{Pj} - CSC_{Bj} - GHG - LK \\ &= \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} + \Delta C_{LI} \\ &\quad + \Delta C_{SO} + \Delta C_{HWP} - GHG - LK \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{或 } PICS_{Rj} = CSR_{Pj} - CSR_{Bj} - GHG - LK \quad (13)$$

在不考虑碳泄露和边界温室气体排放时森林碳汇计量公式为:

$$\begin{aligned} PICS_{cj} &= CSC_{Pj} - CSC_{Bj} = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} \\ &\quad + \Delta C_{LI} + \Delta C_{SO} + \Delta C_{HWP} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: ΔC_{AB} 、 ΔC_{BB} 、 ΔC_{SO} 、 ΔC_{DW} 、 ΔC_{LI} 、 ΔC_{HWP} 分别为地上植物生物量碳库、地下植物生物量碳库、土壤碳库、枯死木碳库、凋落物碳库、采伐木产品的碳库的变化量(tC/a)。

(2) 草地生态系统

在考虑碳泄露和边界温室气体排放时草地碳汇计量公式为:

$$\begin{aligned} PICS_{cj} &= CSC_{Pj} - CSC_{Bj} - GHG - LK \\ &= \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{LI} + \Delta C_{SO} - GHG - LK \end{aligned} \quad (15)$$

$$PICS_{Rj} = CSR_{Pj} - CSR_{Bj} - GHG - LK \quad (16)$$

在不考虑碳泄露和边界温室气体排放时草地碳汇计量公式为:

$$\begin{aligned} PICS_{cj} &= CSC_{Pj} - CSC_{Bj} \\ &= \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{SO} + \Delta C_{LI} \end{aligned} \quad (17)$$

(3) 农田生态系统

在考虑碳泄露和边界温室气体排放时农田碳汇计量公式为:

$$\begin{aligned} PICS_{cj} &= CSC_{Pj} - CSC_{Bj} - GHG - LK \\ &= \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{SO} - GHG - LK \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{或 } PICS_{Rj} = CSR_{Pj} - CSR_{Bj} - GHG - LK \quad (19)$$

在不考虑碳泄露和边界温室气体排放时农田

碳汇计量公式为:

$$\begin{aligned} PICS_{cj} &= CSC_{Pj} - CSC_{Bj} \\ &= \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{SO} \end{aligned} \quad (20)$$

式中涉及的参数上述几个公式均有说明。

5.2 人为增汇项目碳汇计量公式中参数的含义和计算方法

5.2.1 植物活生物质碳库(ΔC_{AB} 、 ΔC_{BB})变化量的计算

(1) 森林活生物质碳库变化量的计量

主要有两种方法。方法之一是碳库变化法,即将两个不同时期的森林清查资料转换成相应的生物量,并除以两次清查的时间间隔。

$$\Delta C_{LB} = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} = (C_{t_2} - C_{t_1}) / (t_2 - t_1) \quad (21)$$

$$C = (V \times D \times BEF) \times (1 + R) \times CF \quad (22)$$

式中: ΔC_{LB} 、 ΔC_{AB} 、 ΔC_{BB} 分别代表活生物质、地上植物生物量、地下植物根系生物量碳库的年度变化量(tC/a); C_{t_2} 、 C_{t_1} 则分别是 t_2 和 t_1 时间的生物质碳库(tC); V 是木材蓄积量(m^3); D 是木材密度(t/m^3); BEF 是蓄积量与林木地上生物量间的转换因子; R 是地下与地上生物量的比例; CF 是干物质的含碳量(tc/t d.m.,一般取值0.5)。

计量活生物质碳库的第二种方法是生长量法。即采用一定时期内森林生物质碳生长量减去生物质碳的损失量:

$$\Delta C_{LB} = \Delta C_G - \Delta C_L \quad (23)$$

式中: ΔC_G 、 ΔC_L 分别是生物质碳的生长量和损失量(tC/a)。生物质生长量碳的估算可用以下方法:

$$C_G = \sum_{ij} (A_{ij} \times G_{T_{ij}} \times CF_{ij}) \quad (24)$$

$$G_T = G_w \times (1 + R) \quad (25)$$

$$G_w = I_V \times D \times BEF \quad (26)$$

式中: A_{ij} 和 $G_{T_{ij}}$ 分别是各类型或气候带的森林面积(hm^2)和年均生长量($t/(hm^2 \cdot a)$); G_T 是年生物质生长量($t/(hm^2 \cdot a)$); G_w 是平均地上生物质生长量($t/(hm^2 \cdot a)$); R 是地下生物质生长量与地上生物质生物量之比; I_V 是平均年蓄积增长量($m^3/(hm^2 \cdot a)$); D 是木材密度(t/m^3); BEF 是年蓄积量与生物生长量之间的转换因子。

生物量碳的损失量包括森林采伐、薪材采集和火灾损失等部分:

$$\Delta C_L = L_a + L_b + L_c \quad (27)$$

式中: L_a 、 L_b 、 L_c 分别代表森林采伐、薪材采集和

其他原因(如火灾、病虫害等)造成的生物碳量损失(tC/a)。

采伐造成的生物量损失量可以用下式计算:

$$L_a = H \times D \times BEF \times (1 - C_{FBL}) \times CF \quad (28)$$

式中: H 是采伐收获量(m^3/a); C_{FBL} 是森林采伐后就地遗留生物量的比例,其他参数含义同上式。

薪材采集造成的生物质碳损失可以采用下式计算:

$$L_b = FG \times D \times BEF \times CF \quad (29)$$

式中: FG 是薪材的采集量(m^3/a),其他参数同上。

同样,其他损失的生物碳量计算公式如下:

$$L_c = A_d \times B_w \times (1 - C_{FBL}) \times CF \quad (30)$$

式中: A_d 是遭受某种损失的森林面积(hm^2); B_w 是平均单位面积的森林生物量(t/hm^2); C_{FBL} 和 CF 同上式。IPCC列表给出了火灾燃烧造成的生物量的损失量 $B_w \times (1 - C_{FBL})$ 的值^[1-2]。

(2) 草地活生物质碳库的计量

对于草地活生物质碳库也可采用上述两种方法进行计量。

$$\Delta C_B = (C_{t_2} - C_{t_1}) / (t_2 - t_1) = \sum \sum \sum \Delta C_{i,j,k} \quad (31)$$

$$\text{或 } \Delta C_B = \Delta C_G - \Delta C_L = \sum \sum \sum \Delta C_{i,j,k} \quad (32)$$

式中: ΔC_B 为草地活生物质碳库的年均变化量(tC/a); C_{t_2} 、 C_{t_1} 分别为 t_1 、 t_2 时刻草地活生物有机碳储量(tC); $\Delta C_{i,j,k}$ 是草地类型 j 、气候类型 i 和管理措施 k 时植物地上生物量和地下生物量的碳库年度变化量(tC/a); ΔC_G 代表单位时间内草地增加碳储量(tC/a); ΔC_L 代表单位时间内草地损失的碳储量(tC/a)。

(3) 农田活生物质碳库的计量

农田生态系统固碳功能评价方法的研究正在引起人们的关注。但由于作物收获的原因,一年生农作物植物碳库的年际变化比较小,所以目前关于农田活生物质碳库主要是关注多年生的植物的年均变化^[5]。

$$\Delta C_B = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} = (C_{t_2} - C_{t_1}) / (t_2 - t_1) \quad (33)$$

$$\text{或者 } \Delta C_B = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} = \Delta C_G - \Delta C_L \quad (34)$$

式中: ΔC_B 为植物有机碳的变化量(tC/a); ΔC_{AB} 和 ΔC_{BB} 分别为农田地上生物量及地下生物量碳库的年变化量(tC/a); C_{t_1} 、 C_{t_2} 分别为 t_1 、 t_2 时刻农田植物碳库的年度变化量(tC); ΔC_G 、 ΔC_L 分别为单位时间内农田植物增加的碳储量以及损失的碳储量(tC/a)。

当农田生态系统的植物碳库的变化主要是针对多年生的植物时:

$$\Delta C_B = \Delta C_{BM} \quad (35)$$

式中: ΔC_{BM} 代表多年生的植物碳库(tC/a)。

5.2.2 死生物质碳库变化量(ΔC_{DW} 、 ΔC_{LT})的估算^[5]

死生物量变化量的估算可采用以下方法:

$$\Delta C_{DOM} = \Delta C_{DW} + \Delta C_{LT} \quad (36)$$

式中: ΔC_{DW} 、 ΔC_{LT} 分别是枯死木和凋落物的生物量年变化(tC/a)。

枯死木年生物量变化用下述两种方法估算:

$$C_{DW} = [A \times (B_{in} - B_{out})] \times CF \quad (37)$$

$$\text{或 } C_{DW} = [A \times (B_{t_2} - B_{t_1}) / (t_2 - t_1)] \times CF \quad (38)$$

式中: A 是森林的面积(hm²); B_{in} 和 B_{out} 分别是年平均输入或移出枯死木的生物量(t/hm²); B_{t_1} 、 B_{t_2} 分别是 t_2 和 t_1 时刻的枯死木生物量(t/hm²)。

凋落物碳库变化量的估算可采用以下方程:

$$C_{LT} = \sum_{i,j} [(C_j - C_i) \times A_{ij}] / T_{ij} \quad (39)$$

$$C_i = L_{ref}(i) \times F_a(i) \times F_b(i) \quad (40)$$

式中: C_i 和 C_j 分别是时期 i 和时期 j 的稳定凋落物碳量(t C/hm²); A_{ij} 是森林面积(hm²/a); T_{ij} 是时期 j 和时期 i 的时间; $L_{ref}(i)$ 、 $F_a(i)$ 、 $F_b(i)$ 分别是时期 i 的自然林参考凋落物量(tC/hm²)、管理措施强度的修正因子和干扰方式的修正因子。

5.2.3 土壤碳库变化量(ΔC_{SO})的计量^[5]

对土壤有机碳变化估算时,通常将土壤分为两类:矿物质土壤和有机土壤两种类型。后者是指土壤厚度大于 10 cm,并且有机质含量不低于 20% 的不淹水土壤或土壤有机质含量不低于 12% 的淹水土壤。

土壤碳库碳量年变化的计算公式为:

$$\Delta C_{so} = \Delta C_m - L_o + \Delta C_i \quad (41)$$

式中: ΔC_{so} 为土壤碳年变化(tC/a); ΔC_m 为矿物质土壤碳年变化量(tC/a); L_o 为有机排水土壤的碳排放量(tC/a); ΔC_i 为无机土壤碳库的年变化(tC/a),无机土壤碳库年变化一般为 0。

矿物土壤的有机碳变化量可以用下式估算:

$$\Delta C_m = \sum_{i,j} [(SOC_j - SOC_i) \times A_{ij}] / P \quad (42)$$

$$SOC_i = SOC_{ref} \times f_a(i) \times f_b(i) \times f_c(i) \quad (43)$$

式中: ΔC_m 是土壤有机碳的变化量; SOC_j 和 SOC_i 分别是时期 j 和时期 i 的土壤碳量(tC/hm²); A_{ij} 是

森林面积(hm²); P 是碳库变化平衡时间(a),即土壤 SOC 值重新达到平衡的缺省时间段,通常是 20 年,其具体数值取决于 f_a 、 f_b 、 f_c 对其的影响,如果 T_{ij} (两次测定土壤 SOC_i 和 SOC_j 值得时间段)超过了 P 值,则用 T_{ij} 值代替 P 值; SOC_{ref} 是参考土壤有机碳(tC/hm²); $f_a(i)$ 、 $f_b(i)$ 、 $f_c(i)$ 分别是土壤森林类型变化、管理措施强度和干扰方式修正因子。

有机土壤的碳库变化可以采用下式估算:

$$L_o = A_d \times EF_d \quad (44)$$

式中: L_o 、 A_d 、 EF_d 分别是土壤有机碳的变化量(tC/a)、有机土壤面积(hm²/a)和有机土壤排水后的 CO₂ 排放系数(tC/(hm²·a))。

5.2.4 碳泄漏(LK)及边界内温室气体排放(GHG)的计量^[4]

在中国绿色碳基金造林项目碳汇评价中,泄漏主要考虑的是施用运输工具所燃烧的化石燃料引起的 CO₂ 的排放。运输工具包括用于运输肥料、苗木、木材和非木质林产品所使用的运输工具,计算碳泄漏时,需要调查各种工具施用过程中的耗油种类、平均运输距离、每公里耗油量等^[4]。

$$LK_{V,t} = \sum_f (EF_{co_2,f} \cdot N_f \cdot M_{f,t}) \quad (45)$$

$$M_{f,t} = \sum_{v=1}^v \sum_{i=1}^I n \cdot (A_{f,v,i,t} / B_{f,v,i}) \cdot AD_{f,v,i} \cdot C_{f,v} \quad (46)$$

式中: $LK_{V,t}$ 为第 t 年项目边界外运输引起的 CO₂ 排放(tCO₂-e/a); $EF_{co_2,f}$ 为 f 类燃油的 CO₂ 排放因子(tCO₂-e/GJ); N_f 为 f 类燃油的热值(GJ/kg); $M_{f,t}$ 为第 t 年 f 类燃油消耗量(kg); n 为车辆回程装载因子(满载时 $n=1$,空驶时 $n=2$); $A_{f,v,i,t}$ 为第 t 年 f 类燃油 V 类车辆运输 i 类物资的总量(m³或 t); $B_{f,v,i}$ 为 f 类燃油 v 类车辆装载 i 类物资的装载量(m³/辆或 t/辆); $AD_{f,v,i}$ 为 f 类燃油 v 类车辆运输 i 类物资的单程运输距离(km); $C_{f,v}$ 为 f 类燃油 v 类车辆的单位耗油量(kg/km); v 为车辆种类; f 为燃油种类; t 为项目开始后的年数(a)。

在中国绿色碳基金造林项目中, GHG 边界内温室气体排放仅考虑因使用含氮肥料引起的 N₂O 排放和营造林过程中使用燃油机械引起的 CO₂ 排放。由于森林火灾引起的温室气体排放无法进行事前计量,但可在项目运行期予以监测和计量。

$$GHG_{E,t} = E_{m,t} + E_{n,t} \quad (47)$$

式中: $GHG_{E,t}$ 指第 t 年项目边界内温室气体排放的

增加量($t\text{ CO}_2\text{-e/a}$); $E_{m,t}$ 指第 t 年项目边界内燃油机械使用化石燃料燃烧引起的温室气体排放的增加量($t\text{ CO}_2\text{-e/a}$); $E_{n,t}$ 指第 t 年项目边界内施用含氮肥引起的 NO_2 排放的增加量($t\text{CO}_2\text{-e/a}$); t 为项目开始后的年数(a)。

6 陆地生态系统增汇效果和潜力计量方法的不确定性分析

陆地生态系统增汇效果和潜力计量方法经过了长期的研究,各种评估方法的科学性和合理性已经有很多的论证工作。如何减低碳评估的不确定性依然是当前需要解决的重大科技问题。分析导致陆地生态系统增汇效果和潜力计量的不确定性原因主要包括以下几个方面。

6.1 科学认识和方法设计带来的不确定性

近年来关于陆地生态系统碳收支的研究工作取得了较大的进展,对陆地生态系统的各个碳库的变化规律的认知有了很大的提高,可是依然可以说,人们对这些碳库的长时间变化规律的理解还不全面。例如由于测定困难,对地下生物量碳库、凋落物碳库在不同生态系统中的动态变化的认知还十分不准确。而土壤碳库受历史和现在的环境因子、管理因子的综合影响,现在还很难有与单一环境因子或者某种管理措施相对应碳库增量的函数关系。另外,由于陆地生态系统的碳汇易受环境因子的影响,火灾、虫害、极端天气等未知的风险因子对生态系统碳汇的稳定性和持久性评价造成挑战。

6.2 增汇活动的规模、基础背景数据和模型参数的不确定性

导致碳汇计量不确定性的普遍原因有:背景数据缺乏完整性,增汇活动规模数据的缺乏,以及增汇效果参数的代表性和准确性不强。缺乏完整性是指现场测量,观察和记录的数据指标以及数据库通常是不完整的。增汇活动规模数据缺乏是指一些增汇活动的边界不清,空间活动数据难于获得^[25]。增汇效果参数或模型参数的代表性不强是指抽样调查结果和所收集参数不能完全代表总体。陆地碳汇计量方法中使用的各种参数(地上生物量和地下生物量贮存量 and 生长率、枯落物、枯死木贮存量、土壤碳密度模型或方程系数等)的准确

度也将最终影响碳汇计量结果的精确度。

6.3 增汇措施的状况和效果监测方案等带来的不确定性

陆地增汇措施的实施状况通常是经过抽样调查和社会统计得到的,对于增汇措施的实际效果也是利用规定的监测方案和实验过程来确定的,可是这方面可能带来的误差也是不容忽视的。这种误差主要包括统计抽样误差、测量误差以及实验室估算误差。

在实地测定中,样本大小受资源和时间等因素限制,抽样方法设计的抽样位置可能不能精确达到。测量误差可能是随机误差或是系统误差,由于设备或测量技术的局限产生的误差在记录和传递信息过程中,放大了误差。由于试剂纯度不够和设备校准低,实验室估计值也可能出现误差^[2]。这些误差均带来了估算结果的不确定性。

7 结语

本文从陆地生态系统固碳的计量方法出发,系统地阐述了 IPCC 国家尺度的碳排放和陆地增汇技术评估方法体系、CDM 造林与再造林项目碳汇计量方法、土地利用对陆地碳源汇的影响的评价方法、以及人为措施下陆地生态系统增汇的碳汇计量等方法。并详细阐述了上述几种计量方法的不确定性及其产生的原因,对各种碳库变化和碳收支评估方法在其理论假设、数据代表性、技术和方法学等方面的局限性进行了评价。

在国家温室气体报告清单、CDM 造林与再造林项目碳汇等计量方法的理论基础上,提出农田、草地、森林等陆地生态系统人为增汇项目碳汇潜力的计量方法。将来更需要通过对区域尺度陆地生态系统固碳速率和潜力定量认证的方法及其不确定性分析的系统性的研究,发展提高精确度、减小不确定性、适合于项目实施目标的碳汇计量方法体系,为我国陆地生态系统固碳速率、增汇潜力的计量、报告、认证和核查提供方法论基础。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis// Solomon S, Qin D, Manning M. eds. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. 2003 Good Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme//Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. (eds). Published: IGES, Japan, 2003.
- [3] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan, 2006.
- [4] 国家林业局应对气候变化和节能减排工作领导小组办公室. 中国绿色碳基金造林项目碳汇计量与监测指南. 北京: 中国林业出版社, 2008: 1-67.
- [5] 陈泮勤, 王效科, 王礼茂. 中国陆地生态系统碳收支与增汇对策. 北京: 科学出版社, 2008: 97-244.
- [6] Houghton R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. *Tellus B*, 1999, 51(2): 298-313.
- [7] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003: 139-303.
- [8] IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Workbook (Volume 2) Land Use Change and Forestry. Paris, 1996: 1-54.
- [9] 于贵瑞, 王秋风, 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. *地理科学进展*, 2011, 30(7): 771-787.
- [10] Foley J A, DeFries R, Asner G P. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [11] Watson R.T, Noble I. R, Bolin B, et al. Land Use, Land Use Change, and Forestry. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 23-51.
- [12] Whittaker R H, Likens G E. Methods of assessing terrestrial productivity//Lieth H, Whittaker R H. eds. Primary productivity of the biosphere. New York, USA: Springer-Verlag, 1975: 305-328.
- [13] Houghton R A. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? *Global Change Biology*, 2003, 9 (4): 500-509.
- [14] 潘娜. 近300年中国部分省区农林土地利用及其对陆地碳储量的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005: 22-31.
- [15] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000, *Tellus B*, 2003, 55(2): 378-390.
- [16] DeFries R, Houghton R A, Hansen M, et al. Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 90s. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001, 99(22): 14256-14261.
- [17] Achard F, Eva H D, Mayaux P, et al. Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18, GB2008, doi:10.1029/2003GB002142.
- [18] Ellis E, Pontius R. Land-use and land-cover change, 2007. http://www.eoearth.org/article/Land-use_and_land-cover_change, [2009-12-04].
- [19] 唐俊梅, 张树文. 基于MODIS数据的宏观土地利用/土地覆盖监测研究. *遥感技术与应用*, 2002, 17(2): 104-107.
- [20] 葛全胜, 戴军虎, 何凡能, 等. 过去300年中国土地利用, 土地覆被变化与碳循环研究. *中国科学: D辑*, 2008, 38 (2): 197-210.
- [21] Heistermann M, Mülle C, Ronneberger K. Land in Sight: Achievements, deficits and potentials of continental to global scale land-use modeling. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 114(2-4): 141-158.
- [22] 冉有华, 李文君, 陈贤章. TM图像土地利用分类精度验证与评估: 以定西县为例. *遥感技术与应用*, 2003, 18 (2): 81-86.
- [23] 黄耀. 地气系统碳氮交换: 从实验到模型. 北京: 气象出版社, 2003: 1-254.
- [24] IPCC. Climate change 2001. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [25] 李怒云, 吕佳. 林业碳汇计量. 北京: 中国林业出版社, 2009: 1-330.

Certified Carbon Inventory Methods of Carbon Sequestration Rate
and Potential in Terrestrial Ecosystem at Region Scale
and Their Uncertainty Analysis

REN Wei^{1,2}, WANG Qiufeng¹, LIU Yinghui³, HE Nianpeng¹,
LIU Yingchun^{1,2}, FU Chao^{1,2}, YU Guirui¹

- (1. Synthesis Research Center of CERN, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling,
Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
- 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
- 3. Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Carbon inventory certified methods of carbon sequestration rate and potential in terrestrial ecosystem at region scale and their uncertainty analysis are the scientific foundational work of taking practices to mitigating the global warming potential. A large number of studies have been carried out on the measuring methods of the terrestrial ecosystem carbon sink and the carbon sequestering potential ,and the national greenhouse gas inventory methods, CDM (Clean Development Mechanism projects) afforestation and reforestation project methods, carbon inventory method in land-use and land-cover change and some other methods were proposed. National greenhouse gas inventory was applicable to state-wide measurement of carbon sequestration, and was not suitable for regional carbon inventory. CDM afforestation and reforestation project focused on the carbon sequestration potential of forest management, and did not take the practices of increasing carbon sinks carried on other ecosystems into account. To date carbon sequestration measurement for forest, grassland, farmland and other regional-scale of ecosystems do not have a uniform and standardized methodology yet. In this paper, we first introduced national greenhouse gas inventory methods, CDM afforestation and reforestation project methods, carbon inventory method in land-use and land-cover change and analysis their uncertainty in detail. Then we proposed a carbon inventory method applicable to farmland, grassland, forests and other terrestrial ecosystems, aiming to provide scientific basis for establishing the methodology for measuring, reporting, and verifying the carbon sequestration rate and potential in regional terrestrial ecosystems.

Key word: regional scale; terrestrial ecosystem; carbon sequestration rate and potential; carbon inventory methods; uncertainty analysis

本文引用格式:
任伟, 王秋凤, 刘颖慧, 等. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和潜力定量认证方法及其不确定性分析. 地理科学进展, 2011, 30 (7): 795-804.