

DOI: 10.5846/stxb201805020984

赵苗苗, 赵娜, 刘羽, 杨吉林, 刘熠, 岳天祥. 森林碳计量方法研究进展. 生态学报, 2019, 39(11): - .

Zhao M M, Zhao N, Liu Y, Yang J L, Liu Y, Yue T X. An overview of forest carbon measurement methods. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): - .

森林碳计量方法研究进展

赵苗苗^{1,3}, 赵娜¹, 刘羽^{1,3}, 杨吉林^{2,3}, 刘熠^{1,3}, 岳天祥^{1,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 森林是陆地生态系统的主体, 不仅是巨大的碳库而且对减缓气候变暖具有积极作用。科学有效的森林碳计量方法, 有助于加深对全球碳循环过程的理解。然而, 由于森林生态系统结构复杂, 对森林碳计量的估算结果普遍存在精度低、不确定性高的问题。近年来, 国内外发展了大量对森林碳计量进行估算的方法, 主要有基于样地清查的森林植被和土壤碳估算、基于生长收获的经验模型估算、基于定量遥感雷达观测的遥感估测、基于多尺度森林生态系统网络的通量观测和陆地生态系统过程模型模拟等方法。在实际的森林碳计量中, 根据不同的森林类型特征和数据获取情况, 往往采取不同的碳计量方法, 甚至不止一种。以生态过程模型模拟、遥感反演和数据同化技术为主要手段, 基于碳通量观测数据、控制实验数据和遥感影像数据, 发展多学科、多过程、多尺度的综合联网观测, 充分认识森林碳循环过程中碳源/汇的时空分布特征, 开展区域、洲际乃至全球尺度碳循环及其对全球变化和人类活动响应的系统性、集成性研究, 以便建立高效、可靠的碳计量体系是未来林业碳计量的发展趋势。随着世界各国温室气体排放清单的编制, 中国迫切需要科学的方法体系计量森林碳源/汇, 提升我国在生态环境问题上的国际发言权和主导权, 同时对我国森林可持续经营、生态环境保护以及美丽中国建设提供建议与支持。分析了各类森林碳计量方法的主要特征、优缺点, 同时探讨了目前的森林碳计量方法存在的问题和未来的发展趋势, 为不同时空尺度下森林碳计量提供参考。

关键词: 森林生态系统; 碳循环; 碳计量; 模型

An overview of forest carbon measurement methods

ZHAO Miaomiao^{1,3}, ZHAO Na¹, LIU Yu^{1,3}, YANG Jilin^{1,2}, LIU Yi^{1,3}, YUE Tianxiang^{1,*}

1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Forests are the main body of terrestrial ecosystems; they are not only huge carbon stocks, but also have a positive effect on mitigating climate warming. Effective scientific forest carbon inventory measurement methods help to elucidate the global carbon cycle. Generally, however, due to the complex structure of forest ecosystems, the estimation of forest carbon measurements has had problems of low accuracy and high uncertainty. In recent years, a large number of methods for estimating forest carbon have been developed domestically and overseas. These methods mainly include forest vegetation and soil carbon estimation methods based on the inventory of sample plots, growth harvesting-based empirical model estimation and remote sensing estimation based on quantitative remote sensing and radar observations data, flux observations based on multi-scale forest ecosystem networks, and numerical simulation based on terrestrial ecosystem process models. In actual

基金项目: 国家自然科学基金创新团体项目(41421001), 国家自然科学基金重大项目课题(41590844), 国家自然科学基金重点项目(91325204), 资源与环境信息系统国家重点实验室自主创新项目(O88RA600YA)

收稿日期: 2018-05-02; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yue@reis.ac.cn

forest carbon measurement, different (or even multiple) carbon measurement methods are often used depending on the characteristics of different forest types and data acquisition. From the main methods of ecological process model simulation, remote sensing inversion, and data assimilation techniques, and based on multi-source data from carbon flux observation, a control experiment and remote sensing, multi-disciplinary, multi-process, and multi-scale integrated network observations have been developed to fully understand the spatial and temporal distribution characteristics of carbon sources and sinks in the cycle process. Systematic and integrated studies on carbon cycles have been carried out at regional, continental, and global scales, and their response to global changes and human activities, in order to establish an efficient and reliable carbon measurement system. These research aspects will be the development trend of forestry carbon measurements in the future. With the preparation of greenhouse gas emission inventories in various countries, China urgently needs a scientific method system to measure forest carbon sources and sinks in order to increase their international voice and dominance in ecological and environmental issues, and provide suggestions and support for sustainable forest management and ecological and environmental protection. This paper analyzes the main characteristics, advantages, and disadvantages of various forest carbon measurement methods, and discusses existing problems and the future development trend in forest carbon measurement methods, providing reference for forest carbon measurements under different spatial and temporal scales.

Key Words: forest ecosystem; carbon cycle; carbon measurement; model

在全球碳循环中,陆地生态系统是结构最为复杂,最易受人类活动影响的一环。森林生态系统作为陆地生态系统重要组成部分,是陆地最大的储碳库,其森林土壤碳占全球土壤碳储量的 39%,而植被碳储量约占全球植被碳储量 77%—85% 的份额^[1]。森林具有长期持续的增汇作用,在减缓和应对全球气候变暖中起到重要的作用^[2]。

森林固碳增汇效益的发挥具有很强的经济可行性和现实可操作性。我国森林覆盖率从 1998 年的 13.9% 增加到 2013 年的 21.63%,另外通过采取人工造林及提高森林管理水平等措施,预计到 20 世纪中叶,我国的森林覆盖率会达到 26%^[3]。然而,森林生长状况除受到植物自身的生理生态过程影响以外,还受到自然干扰(火灾、病虫害等)、气候变化、人类活动等的影响,具有明显的时空变化,因此森林碳计量存在极大的不确定性,准确监测森林生态系统的碳收支是全球变化研究的前沿问题^[4-7]。

为深入了解森林生态系统的增汇功能,必须有一套科学有效的森林碳计量方法体系。近年来,国内外发展了大量对森林碳计量进行估算的方法,主要有基于样地清查的森林植被碳和土壤碳估算方法^[8-9]、基于生长收获的经验模型估算^[10]、基于定量遥感、雷达观测的遥感估测^[11]、基于多尺度森林生态系统网络的通量观测^[12]和陆地生态系统过程模型模拟^[13]等方法。然而,由于森林生态系统结构复杂,对森林碳计量的估算结果普遍存在精度低、不确定性高的问题。2008 年《联合国气候变化框架公约》中大部分国家采用的是 IPCC 第一、二层次的方法,采用缺省参数计量,存在着成熟林结果偏高,中幼龄林结果偏低的问题^[14]。

在全球变化的背景下,随着世界各国温室气体排放清单的编制,针对我国以中幼龄林为主的现状,迫切需要科学的方法体系计量中国的碳源/汇^[15],分析森林碳源/汇的时空分布特征,预测未来气候变化趋势下森林生态系统碳循环对全球变化的响应与适应的特征及机制,提升我国在生态环境问题上的国际发言权和主导权,同时对我国森林可持续经营、生态环境保护以及美丽中国建设提供建议与支持。本文回顾了森林碳计量方法中基于样地清查的森林碳计量方法,基于模型的森林碳计量方法以及基于生态系统定位观测站的通量观测方法,分析各类方法的主要特征及存在的主要问题,优缺点,同时探讨森林碳计量方法未来的发展趋势,为不同时空尺度下森林碳计量提供参考。

1 基于样地清查的森林碳计量方法

1.1 基于样地清查的森林植被碳估算方法

森林生态系统群落结构复杂,不同植被类型的碳储量直接获取比较困难,之前的国内外研究大多采用

45%或者 50%作为森林植被类型的平均碳含量,乘以森林植被的现存量推算得到森林植被的碳储量^[8-9]。当前,森林碳计量方法主要基于森林清查样地资料的基础数据建立起来^[16]。主要的植被碳计量方法有基于森林清查的样地生物量估算法(包括皆伐法,平均生物量法)和蓄积法。

(1)皆伐法。顾名思义,它通过直接砍伐单位面积的林木之后测定其(根、叶、枝、干、果等)的鲜重,换算之后得到干重,各部分之和为单位面积林木总的生物量。这种方法精度高,但工作量大,在实际操作过程中难度较大,可作为检验其他间接测定方法的标准^[17]。该方法一般适用于林下灌草小样方生物量测定。

(2)平均生物量法。主要是采用平均木的生物量乘以株数,再结合该类型的森林面积估算森林生物量的方法^[18]。通过选取标准木,计算标准木的生物量,乘以样地内的森林株数可以得到样地总生物量^[19]。该方法较为粗略,误差较大,适合大区域中树木大小符合正态分布的森林。

(3)蓄积扩展因子法。通过抽取具体树种生物量与蓄积的比值,即生物量扩展因子(BEF, biomass expansion factor,可以定义为林分总生物量与干材蓄积或干材生物量的比)乘森林总蓄积量求出生物量,然后根据不同类型森林含碳率得到森林碳储量^[20]。有研究表明,扩展因子并不是常数,Brown 等人利用干材扩展因子、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^[21]。方精云等根据中国境内 758 个林分的生物量与蓄积研究,发现 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^[22]。

1.2 基于样地清查的森林土壤碳估算方法

森林土壤碳主要指陆地碳循环中的森林土壤有机碳,在未来气候变暖的情况下,温度的升高导致土壤有机质分解和土壤呼吸作用增强,会引起更多的土壤碳排放^[23-24]。另外,对土壤库的微小扰动都会对陆地生态系统的碳源/汇产生重大影响^[25]。目前对森林土壤碳储量和碳循环的估算和模拟研究是陆地生态系统碳循环的研究热点之一。国内外基于样地清查的土壤碳估算方法主要有:

(1)土壤类型法。根据不同土壤类型单位面积上的采样调查数据获取该类型的土壤碳储量,再根据土壤类型图计算区域土壤碳储量。Eswaran 根据修正后的 FAO 土壤类型分布图估算全球土壤碳储量为 1576 Pg^[26],而 Batjes 在 1996 年将世界土壤图划分为 26 万个基本网格单元,按每个土壤单元土壤理化性质和砾石含量等数据,计算出每个网格单元的平均碳密度,最后根据各网格面积汇总计算全球 1 米分辨率有机碳储量为 1462—1548 Pg^[27]。于东升^[28]基于中国 1:100 万土壤数据库,将中国区域分为 926 个土壤类型单元,九万余个图斑,利用制图单元碳储量求和得到中国有机碳储量为 89.14 Pg。该方法在一定程度上可以获得大区域森林土壤碳储量,但是由于不同研究人员研究基础和采样方法不同,获取的数据资料差异较大,导致结果差异较大。

(2)生命带研究法。根据不同生命地带土壤有机碳的密度与该类型生命带面积的乘积计算总的森林土壤有机碳。Post 根据 Holdridge 生命带分类系统,基于地理分布、植被以及气候因子对土壤碳密度进行细分,计算了超过 1100 个土壤剖面,估算出全球土壤碳库为 1395 Pg^[29]。由于该方法在大区域应用时难以对植被类型进行精确分类和细化,且受土地利用方式变化等人为管理措施的影响,其不确定性较大。

(3)土壤碳经验模型法。由于森林土壤有机碳受到多种因素的影响,因此通过建立土壤碳密度与其周围环境、土壤、气候、植被、地形地貌等因素的关系,可以估算区域碳储量^[30-31]。另外,根据土壤属性的空间自相关性,利用回归模型结合克里金插值的方法估算土壤碳密度,还可以提高模拟精度^[32-33]。基于经验方程的森林土壤碳计量计算简便,但精度较低,往往受区域和森林植被类型的限制,难以实现时空分布上的精确模拟。

基于样地清查的森林碳计量方法能够较为精确的估算森林现有的植被和土壤的碳储量,但操作复杂,比较适合于小区域估算碳储量。在时间尺度上,更多依赖于现有观测资料的观测间隔,且难以实现空间上的碳储量分布和碳源/汇强度估算,没有考虑气候变化和人为管理措施的影响,无法对森林未来碳源/汇进行估算。

2 基于模型的森林碳计量方法

随着《京都议定书》的制定,全球加快了林业清单编制的步伐,针对清单中的方法和参数,越来越多的国

家采取了 IPCC 报告中第三层次的方法和基于本国情况的参数。例如美国国家林业碳计量基于 FORCARB 模型^[34],该模型根据国家清查样地的数据,核心是生长收获的经验模型,而土壤碳的估算根据 STATSGO 数据库。日本对森林碳源/汇的估算采用蓄积扩展因子法,土壤碳源/汇基于 CENTURY 模型^[35-36]估算。加拿大利用基于国家森林清查体系的 CBM-CFS3 模型^[37]等国家森林碳监测、计量及报告系统估算森林的碳源/汇^[38],在东部利用 CENTURY 模型模拟从森林到农田转变时的土壤碳的变化,西部根据加拿大土壤信息系统估算。澳大利亚估算碳源/汇主要基于国家碳计量系统(NCAS),采用 FullCAM 模型^[39],它融合计量森林生态系统的 CAMFor 模型^[40]、计量农田和草地的 CAMAg 模型^[41]以及用于土壤碳的 RothC 模型^[42]。英国对于森林碳计量的模拟是利用 CARBINE 和 C-Flow 碳计量模型。挪威最近一次森林碳计量是 2010 年开始并于 2014 年完成,其森林地上部分根据森林清查经验模型计算,土壤部分则利用 Yasso^[43]模型计算。

生态系统碳循环模型利用数学方法定量描述陆地生态系统碳收支状况及其与全球环境变化之间的关系,并且借助于遥感、地理信息系统和计算机等先进技术手段模拟碳循环的动态变化,估算植被和土壤碳的运输情况,预期其未来^[44]。近几十年来,陆地生态系统碳循环模型得到了较大的发展。根据不同尺度及不同手段,可以分为以下几类:(1)基于生长收获的模型。包括生物量模型,全碳库模型,林窗模型等;(2)利用遥感估算生产力的模型;(3)过程模型。包括基于单株、林分以及生态系统尺度的过程模型。

2.1 基于生长收获的森林碳模型

生长模型是指用一组数学方程式来定量描述森林树木的生长与林分状态和立地条件等的关系,主要基于森林调查数据和经验模型,能够准确地模拟森林的生长,但是不能够解释环境对森林生长的影响。根据其模拟的碳库不同,又分为生物量模型、全碳库模型和林窗模型。

(1)生物量模型。根据不同树种的生长曲线,建立生物量与树木胸径和树高的关系,计算树木地上部分的生物量,通过扩展因子计算地下部分的生物量,然后乘以系数得到碳储量。异速生长模型是生物量模型中应用最广的经验模型之一,随着研究尺度的增大,很多生态学家开始整合大量文献资料,建立起适用范围更大的广义的异速生长方程^[10,45-47]。生长模型中涉及的指标主要包括树高、断面积、胸径、冠幅以及样地的纬度、坡度、坡向、海拔、立地指数等立地条件。具体的模型主要有:FVS^[48-49],CACTOS^[50],ORGANON^[51],TreeGross^[52]等。

(2)全碳库模型。这类模型的核心仍然是生长收获方程,在计算地上植被生物量的同时通过耦合一个土壤碳分解模型亦可以计算地下部分的土壤碳库。例如:CO₂ Fix^[53](耦合 Yasso 模型),TreeGrOSS-C^[54],FORCARB^[34],CBM-CFS3^[37-38]等。但是由于不同的森林植被类型土壤碳含量差距很大,难以实现森林土壤碳储量精确的模拟。

(3)林窗模型。最早由 Watt 提出,指的是一片森林中由于自然因素或者偶然性灾害(大风、雷电、火灾等)造成树木的死亡使得林冠层出现空缺、地表植物快速生长的现象,但未给出林窗的定义。后来的研究者由于研究对象的不同,给出了不同的定义^[55-56]。Botkin 等 1972 年首次建立了林窗模型:JABOWA^[57]。我国的林窗模型 NEWCOP 等在我国东北也得到了较为广泛的应用^[58]。林窗模型使得考虑多树种、异龄林成为可能,为模拟森林长期演替动态奠定了基础。

基于生长收获的模型能够很好的利用森林清查资料,根据经验公式进行森林生物量的计算,也正是这种基于经验公式的方法也带来了局限性。比如:不能说明森林与气候因子的关系,及森林的碳循环、养分循环变化的内在机理,也不能很好地进行地下土壤碳的模拟,特别是在气候变化的情况下,无法很好地进行未来森林状况的预测。

2.2 遥感模型

伴随着遥感技术从定性向量化方向的发展,反演的精度日益提升,可以有效地探测和提取更多的陆面要素,为估算全球碳储量和模拟碳循环过程提供了数据支持和技术基础。例如,成像光谱仪能较确切地探查陆表的生物地球化学组成,反演地表土壤有机质含量和植被冠层碳氮含量;多角度遥感由于具有较好的时空

连续性能够提高对净初级生产力(NPP)、冠层光合有效辐射、水分平衡和蒸散发、能量分布等要素的估算精度;雷达可以用于全天时、全天候地监测地表粗糙度,冠层物理结构特征,植被水分含量等。

另外,通过遥感反演的植被指数(VI)或叶面积指数(LAI)计算光合有效辐射比例(fPAR),再乘以入射的光合有效辐射(PAR)、最大光能利用率与环境因子修正系数,从而得到总初级生产力(GPP)或NPP,这种方式称为光能利用率模型,比较成熟的有CASA^[11],GIO-PEM^[59],VPM^[60]等。该类模型结构简单,能够充分利用卫星遥感的植被观测信息,不需要野外采样,减少插值误差;缺点是模型受地域限制,且多为经验性模型,最大光能利用率不仅与植被类型有关,而且季节性变化明显,不易精确确定。此外,由于遥感资料的时间序列有限,在计算NPP时,土壤碳库的初始化比较困难。

近十年来,随着遥感技术的发展,研究者发现不同植被类型的GPP与日光诱导叶绿素荧光(SIF)在叶片、植株、冠层乃至生态系统尺度均存在很强的线性关系,能够为GPP估算提供一种更为直接的遥感方法^[61-63]。然而,由于森林生态系统群落结构复杂,从叶绿体到冠层尺度GPP与SIF的相关关系呈现不一致的特征,此外还会受到环境胁迫、冠层结构、植物功能型等多方面因素的影响,存在很大的不确定性。

2.3 过程模型

随着模型的发展及研究的不断深入,人们逐渐开始从生态过程机理上进行森林碳循环的模拟。过程模型以植物生理生态学为基础,模拟光合、呼吸和蒸散发等关键生态过程引起的大气-植被-土壤连续体之间的物质交换和能量流动,借助复杂的数理公式和经验方程,计量在单株、林分和陆地生态系统三个尺度上,森林植被和土壤碳库以及碳通量的变化^[12]。生态过程模型理论基础雄厚,层次丰富,结构严谨,分为单株和林分以及生态系统尺度上的森林生态系统过程模型^[64]。

(1)基于单株的过程模型。在单株的尺度上,不仅考虑林木的三维空间尺度,而且考虑太阳的季节和日变化特性来计算林冠下树木对光照辐射的利用程度,详细地从树冠中叶片面积的分布聚集程度,辐射的传输,以及蒸腾来进行光合的计算,比如MAESTRA^[65-66]模型。另外,单株过程模型可以和生长收获模型结合,例如耦合了FVS模型和Stand-BGC模型的FVS-BGC^[67]模型,是美国较为常用的森林管理模型。德国的BANALCE模型,是以气候数据为驱动场,根据林木的单株数据得到树木不同部分的碳贮量,并能模拟树冠的光分配以及碳、氮、水耦合与平衡,从而得到林分水平的预测值,可以用来表征不同环境下林木的响应,并且可以输出单株的三维空间效果图。此外国际上常用的单株模型还有SORTIE^[68-69],TRIPLEX^[70],Fire-BGC^[71]等。

(2)基于林分的过程模型。该类模型一般不以单棵树作为模拟单位,而是综合考虑气候、树木林分结构、管理措施、土壤质地以及气候变化对森林生长的影响。按林分密度计算光合、呼吸、蒸散发等过程。除此之外,该类模型一般不考虑水平方向的空间异质性。例如:初期的BIOMASS^[72]利用经验的方法计算光合,后来采用Farquhar模型进行计算,冠层分为饱和阳叶,未饱和阳叶以及阴叶三部分,并分别计算其辐射吸收量。另外模型还包括呼吸作用、凋落物分解,以及林分的水循环3个模块。基于林分的过程模型还有:GOTILWA⁺^[73],3-PG^[74-75],FORECAST^[76],Forest-BGC^[77-78]等。

(3)基于生态系统的过程模型。该类模型主要用于大尺度上模拟碳在大气-植被-土壤中的循环,过程比较复杂,涉及到太阳辐射传输吸收、植物光合呼吸、冠层蒸散发、土壤分解等过程,能够模拟分析森林生态系统不同部分的碳收支及各类碳库的时空变化特征。涉及的生理模型的驱动因子一般包括气候(温度、降水、风速、日长、云量、太阳辐射、饱和水汽压差、二氧化碳浓度等),土壤(机械组成、粘、砂土含量、湿度、PH(酸碱度),EH(氧化还原电位)、饱和含水率、持水量和萎蔫系数等),植被生理生态参数(物候期、植被类型及分布、气孔导度或阻力、胞间CO₂浓度、叶片温湿度、LAI(叶面积指数)、SLA(比叶面积)、VPD(饱和水汽压差)、光合类型分类(C₃、C₄))、人类活动(砍伐、植树、灌溉等)等。输出变量主要包括碳库(植物根茎叶、凋落物、土壤和总碳库)、生态系统碳通量(GPP、NPP(Net primary productivity,净初级生产力)、NBP(Net biome productivity,净生物群区生产力)、NEP(Net ecosystem productivity,净生态系统生产力))、呼吸(自氧呼吸(维

持、生长)、异氧呼吸)、土地利用变化及灾害损失等。

陆地生态系统过程模型可以同时模拟不同的生态系统(如森林、草地、荒漠等),并可进一步划分为静态植被(如 CENTURY^[35-36]、TEM^[79-80]、InTEC^[81] 和 Biome-BGC^[82-83] 等)和动态植被(如 BIOME3、IBIS^[84-85]、LPJ-DGVM^[86]等)模型。其中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,植被与气候处于平衡状态,而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。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,InTEC 模型综合考虑了森林年龄、气候、森林类型、土壤属性和氮沉降对森林生产力和碳收支的影响^[81]。该模型将植被分为 4 个碳库(粗根、细根、茎、叶),土壤分为 9 个碳库,森林年龄对碳收支的长期影响主要通过 NPP 与林龄的关系模型体现。

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。与统计模型和光能利用率模型相比,该类模型可以详细地描述多种因素对碳循环的影响,同时可以预测未来气候变化条件下陆地生态系统碳收支的变化。

3 通量观测

森林生态系统通量观测研究网络是在森林生态系统分布区建立的长期观测研究设施,对自然或者人为干扰状态下森林生态系统碳收支的动态变化格局与过程进行长期监测^[87],能够识别和剔除生态环境短期波动带来的不确定性,探究生态系统演替的内在规律、变化机制以及周期性规律,为森林碳计量估算提供支持^[13]。关于森林生态网络通量的研究可以追溯到国际地球物理年(1957—1958 年)以及国际生物学计划(IBP)(1964—1974 年),后来演变成了现在的国际长期生态研究计划(ILTER)^[88]。ILTER 主要依托研究站开展生态系统过程与格局方面的研究工作,并系统地收集和存储所有观测数据。目前国际上主要的观测网络有全球环境监测系统(GEMS)、全球陆地观测系统(GTOS)、国际长期生态研究网络(ILTER)、全球通量观测网络(FLUXNET)等。FLUXNET 为全球陆地生态系统碳水循环、碳收支时空格局以及生态系统水碳过程的研究提供了全球范围的实测数据^[87]。

中国在 1988 年建立了覆盖森林等 9 大生态系统的生态系统研究网络(CERN),从 20 世纪中叶开始林业部门逐步建立了中国森林生态系统定位研究网络(CFERN),目前该网络由横跨 30 个维度、代表不同气候带的 73 个森林生态站组成,覆盖了中国森林生态系统分布区,并规划到 2020 年森林生态站数量达到 99 个^[89]。另外,China-FLUX(陆地生态系统通量观测研究网络)于 2001 年起开始了长期联网观测。至此,中国已形成了长期服务于不同尺度的森林生态系统结构和功能、水-碳通量研究、陆地样带野外观测一体化的综合观测研究网络^[90],并在估算中国森林碳储量及研究森林对碳平衡的影响机理等工作中得到广泛应用。

森林生态系统通量观测网络的诞生,极大规避了样地清查中采样和人为的误差,数据更加标准化和规范化,为科学研究及应用提供各个时间尺度、空间尺度,以及各个生物学层次完善的数据支持服务,使研究结果更加可靠,广泛应用于监测分析森林生态系统碳通量在不同时空尺度的变化特征及成因、优化模型参数、结合遥感数据估算区域和全球尺度的生态系统碳收支等方面^[91]。尽管如此,全球已建立的 500 余个通量观测站点中 85% 的通量站点位于北纬 30°—55°之间,而在高植被生产力的热带和高碳储量的北方针叶林区域观测站点极为有限,且受制于地形和生态系统功能型均一的假设,难以获取区域和全球尺度上碳储量的时空格局^[92]。

4 森林碳计量研究中存在的问题与展望

(1) 森林碳计量方法亟需完善整合。不同的森林碳计量方法各有其优缺点,基于样地清查的森林碳计量是最基础、最精确的方法,但其工作量大,对森林破坏程度较大,不易恢复,难以实现时空尺度上碳储量分布格局的模拟和碳源/汇强度估算;基于生长收获的模型根据不同树种的生长曲线以及胸径-树高等关系,能够在

一定程度上估算森林的碳储量,应用到其他区域时需要重新确定经验参数值,具有很强的区域适用性;遥感模型原理清晰,计算过程简单,可以弥补传统方法的不足,但和基于生长收获的模型一样,都没有从机理上考虑森林植被的碳循环过程,而过程模型则弥补了实验观测在机理研究上的不足以及基于生长收获的模型的局限性,相辅相成,可以更全面地理解森林生态系统与气候以及土壤之间的相互关系,但过程模型涉及参数较多,不易获取和本地化。通量观测由于国内通量观测塔分布不均,数量有限,难以形成综合的森林碳计量观测体系。在实际的森林碳计量中,根据不同的森林类型特征和数据获取情况,往往采取不同的碳计量方法,并倾向于多方法的综合集成。

(2)森林碳计量的尺度整合急需加强。由于森林生态系统结构的复杂性,各森林碳计量方法标准不一,观测尺度、模型模拟尺度以及生态过程尺度之间的不匹配,可能会对森林碳计量结果产生较大的影响。如何将不同尺度的遥感观测数据和森林清查数据进行融合,以及在模型验证过程中将地面观测数据升尺度到像元尺度,是当前森林碳循环模拟中亟待解决的难题。因此,集成各森林碳计量方法的优势,进一步集成基于样地和通量观测、遥感模型和过程模型模拟等方法,实现不同尺度间的转换。

(3)森林碳计量的不确定性分析不够深入。森林碳计量的不确定性来源于很多方面,从观测数据的获取、计量方法的选择到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。无论是地面观测还是遥感反演,观测仪器都具有一定的误差范围,而在模型参数的选择中,模型参数具有时空异质性,对某一时刻植被参数的观测,并不能真实反映多个植被多种状态的真实情况。另外,人们对植物生理机制认识尚存在局限性,生物地球化学过程并不是简单的用数学方程刻画,通过经验关系解决也是不确定性来源之一。而所有的不确定性最后都通过复杂的误差传递影响最终碳计量的结果。

(4)发展基于碳-氮-水循环耦合机制的森林碳计量方法。森林生态系统碳-氮-水循环是认识气候变化和森林生态系统相互作用的关键,对于准确评估全球变化背景下森林碳计量和碳源/汇的时空格局具有重要的研究意义。目前虽然对森林碳-氮-水循环及其与环境的相互作用过程机理有了一定的认识,但是缺乏对关键过程的进一步探讨,需要从分子水平上加强对生物调控机制的研究,提高森林碳循环模拟的精确性。

(5)对人工林碳计量的研究严重不足。我国实施了一系列重大的林业生态工程,如三北防护林工程,退耕还林工程等,大规模造林工程的实施使得我国拥有世界上最大面积的人工林,且多为中幼龄林,具有巨大的固碳潜力。因此,加强对人工林固碳潜力和碳源/汇功能的科学评估具有重要意义。目前,对人工林碳计量的研究较少,已有研究主要基于成熟林碳密度为参考,极大地提高了人工林碳储量计量结果的不确定。另外,人工混交林较人工纯林复杂,受人类干扰的活动力度较大,在模型模拟方面也存在诸如植被生理生态参数选择、林分竞争和生物多样性等问题。

(6)数据与方法综合集成是碳计量的发展趋势。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,这些观测数据为陆地生态系统过程模型提供了必要的数据基础。例如:利用气象观测站点的气候驱动数据和遥感影像反演的土地覆被类型、土壤、LAI 和森林年龄等参数作为模型的输入,利用通量观测等资料对模型参数进行优化,考虑森林扰动(火灾、虫害等)和土地利用变化(土地转型等)等人类活动对碳循环的影响,最后通过森林样地清查数据与模型同化,提高碳通量模拟的精度和可靠性。以生态过程模型模拟、遥感反演和数据同化技术为主要手段,基于碳通量观测数据、控制实验数据和遥感影像数据等数据与方法的综合集成,发展多学科、多过程、多尺度的综合联网观测,充分认识森林碳循环过程中碳源/汇强度的时空分布特征,开展区域、洲际乃至全球尺度碳循环及其对全球变化和人类活动响应的系统性、集成性研究,以便建立高效、可靠的碳计量体系是未来林业碳计量的发展趋势,也是目前世界各国的努力目标。

参考文献 (References):

- [1] Ciais P, Carmer W, Jarvis P. Summary for policymakers//Watson R T, Noble I R, Bolin B, Ravindranath N H, Verardo D J, Dokken D J. Land

- Use, Land-Use Change, and Forestry: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [2] Watson R T, Noble I R, Bolin B, Ravindranath N H, Verardo D J, Dokken D J. Land use, land-use change, and forestry. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 308.
- [3] Hu H, Wang S, Guo Z, Xu B, Fang J. The stage-classified matrix models project a significant increase in biomass carbon stocks in China's forests between 2005 and 2050. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11203.
- [4] 岳天祥, 张丽丽, 王鼎益, 赵明伟, 王轶夫, 张慧芳, 刘羽, 刘冬冬, 陈报章. 碳核查体系导论. 北京: 科学出版社, 2017: 10-19.
- [5] Yue T X, Wang Y F, Du Z P, Zhao M W, Zhang L L, Zhao N, Lu M, Larocque G R, Wilson J P. Analysing the uncertainty of estimating forest carbon stocks in China. *Biogeosciences Discussions*, 2016, 12(23): 19535-19577.
- [6] 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: 119-123.
- [7] Piao S, Sitch S, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Wang X H, Ahlström A, Anav A, Canadell J G, Cong N, Huntingford C, Jung M, Levis S, Levy P E, Li J S, Lin X, Lomas M R, Lu M, Luo Y Q, Ma Y C, Myneni R B, Poulter B, Sun Z Z, Wang T, Viovy N, Zaehle S, Zeng N. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO₂ trends. *Global Change Biology*, 2013, 19(7): 2117-2132.
- [8] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学*, 2007, 37(6): 804-812.
- [9] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 13-16.
- [10] 王天博, 陆静. 国外生物量模型概述. *中国农学通报*, 2012, 28(16): 6-11.
- [11] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [12] 冯险峰, 刘高焕, 陈述彭, 周文佐. 陆地生态系统净第一性生产力过程模型研究综述. *自然资源学报*, 2004, 19(3): 369-378.
- [13] 傅伯杰, 刘世梁. 长期生态研究中的若干重要问题及趋势. *应用生态学报*, 2002, 13(4): 476-480.
- [14] 张小全, 朱建华, 侯振宏. 主要发达国家林业有关碳源汇及其计量方法与参数. *林业科学研究*, 2009, 22(2): 285-293.
- [15] 谢馨瑶, 李爱农, 靳华安. 大尺度森林碳循环过程模拟模型综述. *生态学报* 2018, 38(1): 41-54.
- [16] Zhao M W, Yue T X, Zhao N, Sun X F, Zhang X Y. Combining LPJ-GUESS and HASM to simulate the spatial distribution of forest vegetation carbon stock in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 249-268.
- [17] 李文华. 森林生物生产量的概念及其研究的基本途径. *自然资源*, 1978(1): 71-92.
- [18] Brown S, Lugo A E. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes. *Science*, 1984, 223(4642): 1290-1293.
- [19] 赵敏, 周广胜. 基于森林资源清查资料的生物量估算模式及其发展趋势. *应用生态学报*, 2004, 15(8): 1468-1472.
- [20] Turner D P, Koepfer G J, Harmon M E, Lee J J. A carbon budget for forests of the conterminous United States. *Ecological Applications*, 1995, 5(2): 421-436.
- [21] Brown S L, Schroeder P, Kern J S. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management*, 1999, 123(1): 81-90.
- [22] Fang J Y, Wang G G, Liu G H, Xu S L. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship. *Ecological Application*, 1998, 8(4): 1084-1091.
- [23] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [24] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [25] de Godoi S G, Neufeld A D H, Ibarr M A, Ferreto D O C, Bayer C, Lorentz L H, Vieira F C B. The conversion of grassland to acacia forest as an effective option for net reduction in greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Management*, 2016, 169: 91-92.
- [26] Eswaran H, Van Der Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192-194.
- [27] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47, 151-163. Reflections by N.H. Batjes. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 2-3.
- [28] 于东升, 史学正, 孙维侠, 王洪杰, 刘庆花, 赵永存. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2279-2283.
- [29] Post W M, Mann L K. Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation//Bouwman A F, ed. *Soils and the Greenhouse Effect*. England: John Wiley & Sons, 1990: 410-416.
- [30] Burke I C, Yonker C M, Parton W J, Cole C V, Schimel D S, Flach K. Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U. S. grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(3): 800-805.

- [31] 黄从德, 张健, 杨万勤, 张国庆, 王永军. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征. 生态学报, 2009, 29(3): 1217-1225.
- [32] Ahmed S, De Marsily G. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. Water Resources Research, 1987, 23(9): 1717-1737.
- [33] Hengl T, Heuvelink G B M, Rossiter D G. About regression-kriging: From equations to case studies. Pergamon Press, Inc. 2007.
- [34] Heath L S, Nichols M C, Smith J E, Mills J R. FORCARB2: An Updated Version of the U.S. Forest Carbon Budget Model. Gen. Tech. Rep. NRS-67. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Northern Research Station. 2010: 52-52.
- [35] Parton W J, Rasmussen P E. Long-term effects of crop management in wheat-fallow: II. CENTURY model simulations. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(2): 530-536.
- [36] Molina J A E, Crocker G J, Grace P R, Klir J, Körschens M, Poulton P R, Richter D D. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the NCSOIL and NCSWAP models. Geoderma, 1997, 81(1/2): 91-107.
- [37] Kull S J. Operational-scale carbon budget model of the Canadian forest sector training workshops across Canada (POSTER). 2006.
- [38] 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. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(1): 33-43.
- [39] Richards G P. The FULLCAM Carbon Accounting Model: Development, Calibration and Implementation for the National Carbon Accounting System. NCAS Technical Report No. 28. Canberra, Australia: Australian Greenhouse Office, 2002: 6-27.
- [40] Richards G, Booth T H. The National Carbon Accounting System.//Carbon Accounting in Forests. Proceedings of An International Frontiers of Science and Technology Workshop, Csiro Forestry and Forest Products, Canberra, Australia, 24 February. 2003.
- [41] Battle-Aguilar J, Porporato A, Barry D A. Modelling soil carbon and nitrogen cycles during land use change. A review. Agronomy for Sustainable Development, 2011, 31(2): 251-274.
- [42] Coleman K, Jenkinson D S. RothC-26.3-A Model for the turnover of carbon in soil//Evaluation of Soil Organic Matter Models. Berlin: Springer, 2008: 237-246.
- [43] Liski J, Nissinen A, Erhard M, Taskinen O. Climatic effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest. Global Change Biology, 2010, 9(4): 575-584.
- [44] 汪业勋, 赵士洞. 陆地碳循环研究中的模型方法. 应用生态学报, 1998, 9(6): 658-664.
- [45] Brown S. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer. FAO Forestry Paper. Rome: FAO, 1997, 18: 23.
- [46] Wirth C, Schumacher J, Schulze E D. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe—a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. Tree Physiology, 2004, 24(2): 121-139.
- [47] Fehrmann L, Kleinn C. General considerations about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in central Europe. Forest Ecology and Management, 2006, 236(2/3): 412-421.
- [48] Wyckoff W R, Crookston N L, Stage A R. User's guide to the stand prognosis model. General Technical Report, 1982, int-133. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1982. 112 p.
- [49] Crookston N L, Dixon G E. The forest vegetation simulator: a review of its structure, content, and applications. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 49(1): 60-80.
- [50] Wensel L C, Daugherty P J, Meerschaert W J. CACTOS USER'S GUIDE: The California Conifer Timber Output Simulator. Berkeley: Division of Agriculture Science, University of California, 1985.
- [51] Hester A S, Hann D W, Larsen D R. ORGANON: southwest Oregon growth and yield model user manual; version 2.0. Corvallis Or Forestry Publications Office Oregon State University Forest Research Laboratory, 1989.
- [52] Nagel J, Albert M, Schmidt M. Das waldbauliche Prognose- und Entscheidungsmodell BWINPro 6.1. Forst u. Holz. 2002, 57(15/16): 486-493.
- [53] Schelhaas M J, Van Esch P W, Groen T A, De Jong B H J, Kanninen M, Liski J, Masera O, Mohren G M J, Nabuurs G J, Palosuo T, Pedroni L, Vallejo A, Vilen, T. CO₂ FIX V 3.1-A Modelling Framework for Quantifying Carbon Sequestration in Forest Ecosystems. Wageningen, Netherlands: ALTEIRA, 2004.
- [54] Wutzler T. Projecting the Carbon Sink of Managed Forests Based on Standard Forestry Data [D]. Jena, Germany: Friedrich-Schiller-University, 2007.
- [55] Brokaw N V L. The definition of treefall gap and its effect on measures of forest dynamics. Biotropica, 1982, 11: 158-160.
- [56] 答启杰, 李鸣光, 张志权, 周先叶. 林窗及其在森林动态中的作用. 植物学通报, 1997, 14(S1): 18-24.
- [57] Botkin D B, Janak J F, Wallis J R. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. Journal of Ecology, 1972, 60(3): 849-872.
- [58] 延晓冬. 林窗模型的几个基本问题的研究 I. 模拟样地面积的效应. 应用生态学报, 2001, 12(1): 17-22.
- [59] Prince S D, Goward S N. Global primary production: a remote sensing approach. Journal of Biogeography, 1995, 22(4/5): 815-835.

- [60] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, Goltz M, Davidson E A, Zhang Q Y, Moore III B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 519-534.
- [61] Damm A, Guanter L, Laurent V C E, Schaepman M E, Schickling A, Rascher U. FLD-based retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence from medium spectral resolution airborne spectroscopy data. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 147: 256-266.
- [62] Damm A, Guanter L, Paul-Limoges E, Van Der Tol C, Hueni A, Buchmann N, Eugster W, Ammann C, Schaepman M E. Far-red sun-induced chlorophyll fluorescence shows ecosystem-specific relationships to gross primary production: An assessment based on observational and modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 166: 91-105.
- [63] Van Der Tol C, Rossini M, Cogliati S, Verhoef W, Colombo R, Rascher U, Mohammed G. A model and measurement comparison of diurnal cycles of sun-induced chlorophyll fluorescence of crops. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 663-677.
- [64] Cao M, Ian Woodward F. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(6682): 249-252.
- [65] Wang Y P. Crown structure, radiation absorption, photosynthesis and transpiration[D]. Edinburgh: University of Edinburgh, 1988.
- [66] Wang Y P, Jarvis P G. Influence of crown structural properties on PAR absorption, photosynthesis, and transpiration in Sitka spruce: application of a model (MAESTRO). *Tree Physiology*, 1990, 7(1/4): 297-316.
- [67] Wang Y, Bauerle W L, Reynolds R F. Predicting the growth of deciduous tree species in response to water stress: FVS-BGC model parameterization, application, and evaluation. *Ecological Modelling*, 2008, 217(1/2): 139-147.
- [68] Pacala S W, Canham C D, Silander J A Jr. Forest models defined by field measurements: I. The design of a northeastern forest simulator. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23(10): 1980-1988.
- [69] Canham C D, Finzi A C, Pacala S W, Burbank D H. Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, 24(2): 337-349.
- [70] Peng C H, Liu J X, Dang Q L, Apps M J, Jiang H. TRIPLEX: a generic hybrid model for predicting forest growth and carbon and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling*, 2002, 153(1/2): 109-130.
- [71] Kæne R E, Morgan P, White J D. Temporal patterns of ecosystem processes on simulated landscapes in Glacier National Park, Montana, USA. *Landscape Ecology*, 1999, 14(3): 311-329.
- [72] Mcmurtrie R E, Landsberg J J. Using a simulation model to evaluate the effects of water and nutrients on the growth and carbon partitioning of *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management*, 1992, 52(1/4): 243-260.
- [73] Gracia C, Sabaté S, Sánchez A. GOTILWA+ An integrated model of forest growth//Beitrges Zur Geschichte Der Deutschen Sprache Und Literatur, 1914: 201-213.
- [74] Waring R H, Coops N C, Landsberg J J. Improving predictions of forest growth using the 3-PGS model with observations made by remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(9): 1722-1729.
- [75] Landsberg J J, Waring R H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 1997, 95(3): 209-228.
- [76] Seely B, Welham C, Kimmins H. Carbon sequestration in a boreal forest ecosystem: results from the ecosystem simulation model, FORECAST. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169(1/2): 123-135.
- [77] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 1988, 42(2): 125-154.
- [78] Running S W, Khanna P K, Benson M L, Myers B J, McMurtrie R E, Lang A R G. Dynamics of *Pinus radiata* foliage in relation to water and nitrogen stress: II. Needle loss and temporal changes in total foliage mass. *Forest Ecology and Management*, 1992, 52(1/4): 159-178.
- [79] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, Kicklighter D W, Steudler P A, Peterson B J, Grace A L, Moore B, Vorosmarty C J. Potential net primary productivity in south America: application of a global model. *Ecological Applications*, 1991, 1(4): 399-429.
- [80] McGuire A D, Joyce L A, Kicklighter D W, Melillo J M, Esser G, Vorosmarty C J. Productivity response of climax temperate forests to elevated temperature and carbon dioxide: a north American comparison between two global models. *Climatic Change*, 1993, 24(4): 287-310.
- [81] Chen J, Chen W J, Liu J, Cihlar J, Gray S. Annual carbon balance of Canada's forests during 1895-1996. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 839-849.
- [82] Running S W. Documentation and preliminary validation of H2OTRANS and DAYTRANS, two models for predicting transpiration and water stress in western coniferous forests. *American Mineralogist*, 1984, 96(8): 833-840.
- [83] Thornton P E, Law B E, Gholz H L, Clark K L, Falge E, Ellsworth D S, Goldstein A H, Monson R K, Hollinger D, Falk M, Chen J, Sparks J P. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 185-222.
- [84] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S, Haxeltine A. An integrated biosphere model of land surface processes,

- terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4): 603-628.
- [85] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, Fisher V A, Coe M T, Lenters J D, Young-Molling C, Ramankutty N, Norman J M, Gower S T. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 795-825.
- [86] Sitch S, Smith B, Prentice I C, Renticei C P, Arneth A, Bondeau A, Cramer W, Kaplan J O, Levis S, Lucht W, Sykes M T, Thonicke K, Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 161-185.
- [87] 于贵瑞, 伏玉玲, 孙晓敏, 温学发, 张雷明. 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 的研究进展及其发展思路. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(Z1): 1-21.
- [88] Aronova E, Baker K S, Oreskes N. Big science and big data in biology: From the international geophysical year through the international biological program to the long term ecological research (LTER) network, 1957-Present. *Historical Studies in the Natural Sciences*, 2010, 40(2): 183-224.
- [89] 赵苗苗, 赵师成, 张丽云, 赵芬, 邵蕊, 刘丽香, 赵海凤, 徐明. 大数据在生态环境领域的应用进展与展望. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1727-1734.
- [90] Fu B J, Li S G, Yu X B, Yang P, Yu G R, Feng R G, Zhuang X L. Chinese ecosystem research network: Progress and perspectives. *Ecological Complexity*, 2010, 7(2): 225-233.
- [91] 王兵, 崔向慧, 杨锋伟. 中国森林生态系统定位研究网络的建设与发展. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 84-91.
- [92] 袁文平, 蔡文文, 刘丹, 董文杰. 陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展. *地球科学进展*, 2014, 29(5): 541-550.