

区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法 及其不确定性

于贵瑞¹,王秋凤¹,朱先进²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院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)

摘 要:定量评估区域和不同类型生态系统的碳收支,可以为科学预测气候变化、服务于减缓和适应气候变化的区域碳管理提供科学依据,是生态系统与全球变化科学研究的重要科技问题。虽然区域碳收支的定量评估和认证还很难用当前的各种直接观测和评估方法来精确实现,但是,近年来这方面做了很多研究工作,也取得了一定进展。为此,本文综述了陆地生态系统碳收支的观测技术体系,重点分析区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性。分析结果认为,为了定量认证中国区域的陆地生态系统、主要行业以及与碳汇相关项目的碳汇功能及其时空格局,急需采用“多尺度观测、多方法印证、多过程融合、跨尺度认知和跨尺度模拟”的研究思路,构建基于野外台站的碳循环及其通量的观测和实验研究网络、发展地面站点-陆地样带-生态网络与卫星和航空观测结合的多尺度观测系统,发展观测数据-生态过程模型-卫星遥感模型-GIS空间分析系统。同时,本文指出:生态系统碳-氮-水循环间的耦合机制及其对碳源汇时空格局影响研究必将成为生态系统碳循环及其区域碳收支评估和定量认证科学研究的重要发展方向和新的研究热点。

关 键 词:陆地生态系统碳循环;区域碳收支;碳汇评估与管理;碳汇计量和定量认证

1 前言

自工业革命以来,化石燃料的开发、水泥生产以及土地利用方式改变等人类活动,导致了大气层中CO₂、CH₄、N₂O等温室气体浓度的不断升高、温室气体效应增大^[1]。相反,生态系统光合作用又可以不断地吸收大气中的CO₂,并通过复杂的生物、物理和化学过程将其固定在土壤或海洋之中,以起到减缓气候变化的作用^[1]。因此,在人类社会应对气候变化的实践过程中,不仅要努力减少工业活动的温室气体排放,同时还要重视发挥陆地和海洋的生物固碳作用。

陆地生态系统碳收支是指在一定时间内特定区域的植被与大气之间碳交换的净通量,即生态系统的生物碳固定输入与碳排放输出的平衡状况,当陆地生态系统碳固定量大于呼吸碳排放量时,陆地生态系统表现为大气的“碳汇”,相反,则表现为大气的“碳源”^[2]。生态系统的碳源/汇功能对大气中

温室气体变化具有重要影响,它既可以通过碳吸收减缓气候变化,也可以通过碳排放加速气候变化进程。由此可见,定量评估全球以及不同区域和不同类型生态系统的碳收支及其源/汇强度时空格局、揭示生态系统碳循环过程及其空间格局的生物地理学机制、评价生态系统管理对碳循环过程和碳源/汇功能的影响等科学问题,不仅可以为科学认识生态系统与气候变化的相互作用关系、预测气候变化趋势提供理论基础,也可制定服务于减缓和适应气候变化的全球和区域碳管理规划和政策提供科学知识和数据支撑,是生态系统与全球变化科学的重要研究领域。

从20世纪80年代中后期开始,中国就针对不同区域的不同类型生态系统碳收支开展了大量研究,并在一些主要领域取得了可喜的进展^[3]。作者也系统性地回顾了中国陆地生态系统碳循环研究的发展历程,评述了陆地生态系统的碳储量及其空间格局的研究进展^[4]。本文的目的是在综合评述陆

收稿日期:2010-06; 修订日期:2010-11.

基金项目:国家重点基础研究发展规划973计划项目(2010CB833504);中国科学院地理科学与资源研究所自主部署项目(200903007)。

作者简介:于贵瑞(1959-),男,博士生导师,研究员,主要研究方向为生态系碳循环与全球变化。E-mail: yugr@igsnrr.ac.cn

地生态系统碳收支的观测技术体系的基础上,重点讨论典型陆地生态系统和区域碳收支评估各种方法的应用条件及其不确定性,为推动陆地生态系统碳循环及区域碳收支评估科学研究的发展提供方法论基础。

2 陆地生态系统碳收支观测研究的方法论体系

2.1 全球碳收支评估的思路和方法

IPCC 报告基于全球科学家的各种研究成果,评估了3个时段的全球碳收支状况(表1),同时,一些研究工作还匡算了大气、植被、土壤、河流、海洋生物、浅海和深海等各种碳库之间的碳交换通量。这些结果为全球碳管理提供了基础信息,但由于所利用的基础数据和估算方法等方面的局限性,也导致了全球碳收支及其主要组分定量评估结果的很大不确定性。由表1中2000-2005年的数据可见,全球碳平衡各个分量评估的不确定性以大气碳储量变化为最小,其变异系数为2.4%;其次是通过化石燃料燃烧和水泥工业排放的量,其变异系数为4.2%;海洋-大气CO₂净交换量的变异系数为22.7%;不确定性最大的是对陆地-大气CO₂净交换量的评估,其变异系数高达66.7%。

从物理概念上看,陆地与大气间的CO₂净吸收量是土地利用变化向大气释放的CO₂量与陆地固定大气CO₂量平衡的结果。可是由于精确评价这两个分量还十分困难,所以现在的陆地CO₂净吸收量估计还不得不将其作为全球碳平衡方程的残余项来处理,并与大气反演模型模拟结果进行综合集成。这种评估方法包含了计算其他碳平衡组分的所有误差,可以认为,采用这种评估方法所得到的陆地CO₂净吸收量是全球碳收支各个分量中不确

定性最大的。

全球陆地生态系统吸收CO₂量是作为全球碳平衡方程的残余项而估算得到的,其基本理论假设是物质守恒定律,即:

$$\begin{aligned} & \text{化石燃料燃烧和水泥工业生产的CO}_2\text{排放量} \\ &= \text{全球大气中的CO}_2\text{增量} + \text{海洋的CO}_2\text{净吸收量} \\ & \quad + \text{陆地的CO}_2\text{净吸收量} \end{aligned} \tag{1}$$

同时,

$$\begin{aligned} & \text{陆地的CO}_2\text{净吸收量} \\ &= \text{土地利用变化引起的陆地CO}_2\text{排放量} \\ & \quad + \text{陆地生态系统的剩余碳汇} \end{aligned} \tag{2}$$

由此得到:

$$\begin{aligned} & \text{陆地生态系统剩余碳汇} \\ &= \text{化石燃料燃烧和水泥工业生产的CO}_2\text{排放量} \\ & \quad - \text{土地利用变化引起的陆地CO}_2\text{排放量} \\ & \quad - (\text{全球大气中CO}_2\text{增量} + \text{海洋的CO}_2\text{交换量}) \end{aligned} \tag{3}$$

根据上述全球碳平衡方程,20世纪80年代陆地生态系统剩余碳汇大约为1.7(3.4~0.2)PgC,90年代约为2.6(4.3~0.9)PgC,2000-2005年为2.5 PgC(使用90年代土地利用变化引起的CO₂排放值)。通常将其定义为陆地生态系统的碳汇,其物理意义是生态系统光合作用碳固定与呼吸作用碳排放的差值(即生态系统CO₂净交换量)。

基于式(1)-(3)的碳平衡方程的陆地生态系统碳汇能力评价方法,必须建立在假设其他碳循环通量成分的估算都相当准确的前提之下,可事实上并非如此,无论对哪一分量的估计都还存在着极大的不确定性,尤其是土地利用变化对陆地碳汇影响的评价。因此,近年来很多研究都企图通过实测陆地碳汇的技术途径来确定陆地生态系统的固碳能力,以定量评估和认证陆地生态系统的碳汇功能。目前可以用于估算典型陆地生态系统及区域固碳能力的技术途径和方法很多,但是各有其独特的优势,

表1 IPCC第三和第四次评估报告的全球碳收支^[1] (单位:Pg C yr⁻¹)

Tab.1 The global carbon budgets in the third and fourth assessment reports of IPCC (unit: Pg C yr⁻¹)

	20 世纪 80 年代(1980s)		20 世纪 90 年代(1990s)		2000-2005 年
	TAR ^a	TAR 修正值 ^b	TAR	AR4 ^c	AR4
大气 CO ₂ 增加量	3.3±0.1 ^d	3.3±0.1	3.2±0.1	3.2±0.1	4.1±0.1
通过化石燃料燃烧和水泥工业排放 CO ₂ 量	5.4±0.3	5.4±0.3	6.4±0.4	6.4±0.4	7.2±0.3
海洋-大气 CO ₂ 净交换量	-1.9±0.6	-1.8±0.8	-1.7±0.5	-2.2±0.4	-2.2±0.5
陆地-大气 CO ₂ 净交换量	-0.2±0.7	-0.3±0.9	-1.4±0.7	-1.0±0.6	-0.9±0.6
土地利用变化向大气释放的 CO ₂ 量	1.7(0.6~2.5) ^e	1.4(0.4~2.3)	n.a. ^f	1.6(0.5~2.7)	n.a
陆地生态系统固定大气 CO ₂ 量	-1.9(-3.8~-0.3)	-1.7(-3.4~-0.2)	n.a	-2.6(-4.3~-0.9)	n.a

注: a: TAR 为 IPCC 第三次评估报告; b: 考虑海洋热容量的校正值; c: AR4 为 IPCC 第四次评估报告; d: 估算的标准偏差; e: 估算的范围; f: 没有研究资料而空缺; 表中数字正值表示向大气排放 CO₂, 负值表示从大气中吸收 CO₂

同时也都存在着方法论方面的局限性和评估结果的不确定性。

2.2 区域陆地生态系统碳收支评估的技术途径

近10年来,中国区域的陆地生态系统碳循环过程和碳收支研究十分活跃。虽然开展工作的角度不同,针对的科学问题不同,采用的技术途径不同,但其总体的科学目标、研究思路和研究内容却有很多相似之处,其基本研究框架和逻辑关系可由图1表示。

区域碳循环和碳收支研究的科学目标和任务主要是揭示陆地生态系统的碳循环过程机理、评价各类生态系统的碳收支状况、分析区域碳源/汇的时空格局、开发区域碳循环过程机理模型和遥感模型评价方法,研究工作的最终目标是清查区域碳源/汇状况、评估和认证生态系统的固碳潜力、研发生态系统的增汇和碳管理技术、定量认证区域/行业/工程项目的碳汇强度及其技术经济效果、建立区域性/国际碳贸易市场和生态补偿机制和制度。

目前,区域碳收支研究的科学数据主要来源于两个方面(图1),其一是常规的森林、草地、土壤等资源动态清查,地面气象/气候要素观测系统、生态系统碳循环过程和通量观测网络系统,以及国土资源和生态环境要素的观测和空间化基础数据。其二是来自于资源卫星/碳卫星遥感观测系统、高塔/航空遥感观测和激光雷达遥感观测系统所提供的专项观测数据。因此,陆地碳循环过程和通量的观测体系和主要测定内容包括:地面观测网络的土壤和植被碳库变化定位观测、土壤-植被-大气间的碳交换通量测定、高塔/激光雷达的大气层碳浓度垂直分布观测,以及基于资源卫星/碳卫星遥感观测系统的遥感观测,基于航空技术的通量、碳浓度航空遥感观测等(图1)。

随着现代科学技术的发展,各种观测技术也在不断进步,可是任何观测技术都会有其时间和空间尺度的局限性,如何充分利用各种观测技术优势、相互补充和论证、建立多空间的、多时间的、多生态

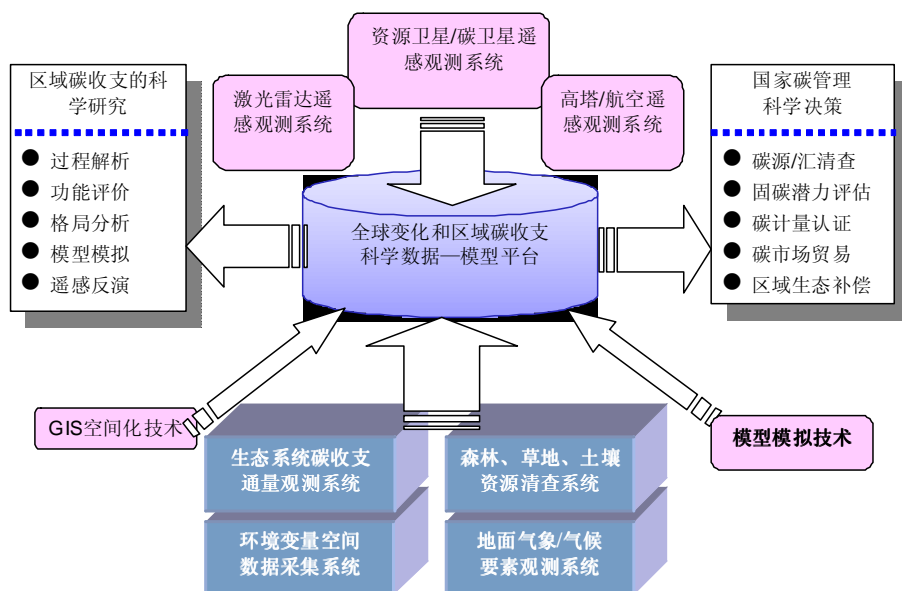


图1 中国陆地生态系统碳收支评估研究的逻辑框架及其技术体系

Fig.1 The logic framework and technical system for the assessment of carbon budgets in China's terrestrial ecosystem

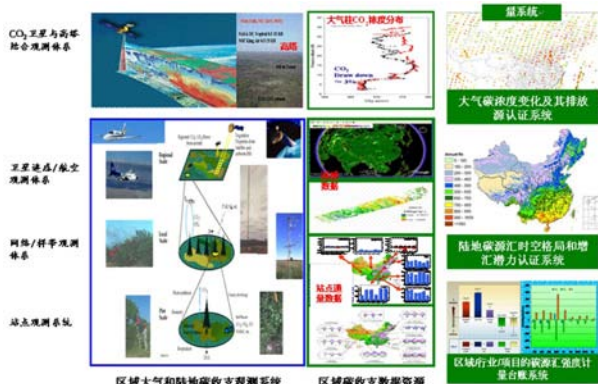


图2 陆地生态系统碳收支观测、数据资源和定量认证系统框架

Fig.2 The framework for observation, data sources and quantitative authentication of the terrestrial ecosystem carbon budgets

要素的多源数据资源整合系统是必须解决的技术问题。因此,区域碳收支的评估需要建立如图2所示的基于野外台站观测和实验网络、地面的站点-样带-网络的多尺度观测与卫星观测系统结合,观测数据-生态过程模型-卫星遥感模型-GIS空间分析系统,以及区域/行业/项目的碳汇计量和定量认证系统(图2)。

中国现阶段的陆地生态系统碳循环与碳收支研究与西方发达国家相比还有较大的差距,主要表现在专项科学数据和基础数据获取的手段、技术和规模等方面。人们已经认识到,要提高陆地碳循环和碳收支评估精度就必须增强陆地生态系统碳循环过程的综合观测,不断积累长期定位观测资料和

空间化的区域资源环境数据,只有可靠的、充足的数据资源支撑,才有可能得到相对准确的区域碳收支评估结果,为区域碳管理提供科技服务。

3 典型生态系统碳循环和碳收支的定位观测技术和方法

典型生态系统是指分布于特定区域、具有明显的地区性植被特征的生态系统,主要包括分布于不同地理区域的森林、草地、农田、湿地生态系统等。目前关于典型生态系统碳收支的观测技术和评价方法已逐渐成熟,可是不同的观测和评估方法还有较大的不确定性和局限性,在实际工作中需要采用各种技术和方法的互补和融合。

3.1 基于土壤和植被碳库变化的生态学测定方法

典型生态系统碳库的研究主要是采用植被和土壤有机碳储量的生态学清查方法,其主要数据资源是生态系统长期定位观测、区域性的定期或不定期土壤普查、森林和草地资源清查等数据。这种方法的优点是直接、明确和技术简单,但是清查法的观测周期长,通常需要几年到数十年的数据积累,才可能观测到植被和土壤碳含量的微量变化^[5-6]。另外,区域性的森林资源清查数据主要是木材材积量,还需要借助生物量换算因子(BEF)等方法才能将其转换为森林植被生物量,进而通过计算不同时段森林植被生物量变化才能估算出年均固碳量^[7]。这种方法在清查资料的可靠性、生物量换算因子方法的科学性、特别是观测数据的区域代表性等方面还都存在着多种误差^[2]。更为突出的问题是,无论森林还是草地的地下生物量测定都极其困难,虽然我们可以将不同草地或森林的地上和地下生物量的比值作为经验常数来推测地下生物量^[8-9],但是这种经验常数的确定本身就已存在很大的不确定性,如果再将其应用于区域碳收支评估产生的误差会更大。

3.2 陆地-大气间碳交换通量的同化箱测定方法

各种类型的箱式测定方法是最早用于土壤与大气之间的CO₂交换通量的野外测定方法,依据不同的分类体系,箱式法的分类也有所不同。如按箱内气流相对于箱体是否流动,可以分为静态箱法和动态箱法^[10];如按通量气体的分析仪器的测定模式,则可以划分为同化箱-气相色谱法^[11-12]和同化箱-红外线分析仪法^[13-15]。还有许多学者以增大箱子高

度的方式,来测定低矮植被与大气间的CO₂交换量,当采用暗箱时,主要是测定土壤或植被的呼吸,当采用透明箱时,则测定的是生态系统与大气间的CO₂交换量^[16-17]。传统的箱法通量测定需要人工操作,难以长期连续自动观测,故国内外的很多学者纷纷对传统箱法进行改良,使之能够达到自动观测的目的^[13-15]。这类观测方法和实验装置的发展,为研究生态系统碳收支评价提供了重要工具,也得到了广泛的应用^[18-25]。可是这种方法的局限性也十分突出,其测定结果的不确定性主要包括:①观测样点的代表性,即少量的几个观测箱的数据能否代表整个生态系统,②观测箱的安置会改变生态系统自然气体交换过程,③观测箱内与自然条件之间的环境差异会影响测定结果。特别需要指出的是,在夏季晴朗的白天,观测箱内特别是透明箱的温度会比自然条件下高出几度,这种影响如果不能被排除,其观测值将会明显偏离真实值,导致对CO₂通量的错误估计^[26]。

3.3 陆地-大气间碳交换通量的微气象学观测技术

微气象学方法是通过测量被测气体的浓度和近地层的湍流状况来获得该气体的通量值,主要包括质量平衡法、能量平衡法、空气动力学法、涡度相关法等^[10,26],其中涡度相关技术因能够直接连续测定特定生态系统与大气间的碳交换通量,已在全球范围内得到广泛应用,成为研究森林、草地等植被与大气CO₂交换量最直接而有效的观测方法^[26-27]。涡度相关法与其他观测技术一样也有其自身的局限性,当自然条件无法满足涡度相关技术要求时就会带来观测误差。造成观测误差的主要原因包括:①由传感器物理属性的局限性引起的高频或低频湍流信号丢失;②坐标系选择不恰当造成的长期碳收支的系统低估;③夜间湍流混合不均匀引起呼吸通量低估等^[26]。在复杂地形、大气不稳定等非理想观测条件下,通量观测结果的不确定性主要是来自通量贡献区、重力波、平流和空气动力学等方面的影响^[28]。此外,在通量数据的后处理过程中,各种数据校正和插补方法的选择也会造成对生态系统碳收支估算的误差和不确定性^[26]。

4 区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性

区域尺度陆地生态系统碳收支评估是指针对

特定区域尺度(流域、生态区、国家、大陆或全球)的各种类型的生态系统(森林、草地、湿地、农田等)碳收支、或者不同类型生态系统碳收支的综合评估。目前被广泛应用的技术途径包括植物生物量和土壤碳储量清单调查、生态系统通量观测、卫星遥感、大气CO₂浓度反演以及生态系统模型模拟等。由于每种研究方法均存在明显的优缺点,导致不同尺度陆地碳源/汇评估结果具有很大的不确定性。

各种评估方法不仅有各自优势、适宜的时间和空间尺度,其评估的精度也具有巨大的差距,图3给出了各种方法适宜的空间和时间尺度。一般而言,观测方法适宜的空间尺度越小、时间尺度越短,测定的越精细,反之,观测方法适宜的空间尺度越大、时间尺度越长,则测定的越粗糙,但这并不意味着我们对大尺度的区域碳收支一定要强调高强度的精细观测,因为这种大规模的精细观测往往意味着大量经费的需求,而且如果采用了不适宜的尺度扩展方法还可能会导致更大的评估误差。

因此,中国学者提倡通过对不同区域、不同类型生态系统的长期观测与试验,结合控制试验、遥感、模型等技术手段,采用“多尺度观测、多方法印证、多过程融合、跨尺度认知和跨尺度模拟”等技术途径^[29],以开展生态系统碳评估的综合研究,认识全球变化和人类活动共同驱动下的生态系统碳循环过程与格局变化规律、区域生态系统碳汇的调控和管理途径。

4.1 基于生物量和土壤碳储量清单调查的区域碳收支评估

利用长期的和高密度的植物生物量和土壤碳储量清查资料评价区域生态系统的碳库及碳通量、评价区域甚至全球的碳收支是一种可行的技术途径。这种方法获得的所有基础数据均为实测值,存在较大的可信度,现在很多区域生态系统碳收支大多采用这种方法估计^[30-35]。生物量和土壤清查方法的优点是直接、明确和技术简单,但是其观测周期长且时间序列不连续。同时,利用这种研究方法评估区域碳收支时,还需要充分代表各种生态系统类型的调查样点和高精度的土地利用和土地覆被空间图,但是要满足这方面的需求也是极其困难的。更重要的是,这种方法评估结果的可信程度极大地受到观测样点的空间分布密度、各种生态系统观测数据的代表性、以及生态系统类型分布空间信息的精确程度等方面的限制。中国学者利用碳储量清

查方法,根据国家的森林清查资料分析了森林碳汇的变化^[30,36-37],利用草地清查资料评估了中国草地的碳储量和碳汇功能变化^[8,38-41],还利用土壤普查和实验调查资料评估了中国土壤^[42-47]和农田生态系统的碳储量及碳汇变化^[48-55]。

4.2 基于生态系统通量观测结果的区域碳收支评估

涡度相关通量观测弥补了生物量清查法、地面同化箱和卫星遥感等测定方法在时间上的不连续、积累数据耗时长等方面的不足,可以在较短的时间内获得大量高时间分辨率的CO₂通量和环境变化数据,为开展不同时间尺度的碳通量变化及其环境响应机理研究提供了方便^[27]。可是涡度相关技术仍是一种小尺度生态系统观测方法,其结果本身还只是代表观测塔周边的生态系统碳收支特征,如果盲目地将站点的观测结果直接外推到更大区域尺度会导致较大的不确定性^[56]。中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)于2001年创建,已经对中国主要类型生态系统开展了连续的碳和水通量观测,近年来还开始了大气氮沉降和生物固氮通量及其稳定同位素通量观测,形成了站点-样带-区域尺度的综合观测体系(图4),积累了主要陆地生态系统碳、氮、水和能量通量的长期观测数据,收集了通量观测站及其所代表区域的森林、草地和土壤的普查和清查资料,定量评价了主要森林和草地生态系统碳源/汇功能的时空格局与变化特征,揭示了温度、降水、辐射和叶面积指数等生物环境因素对亚洲季风区不同陆地生态系统碳收支时空变

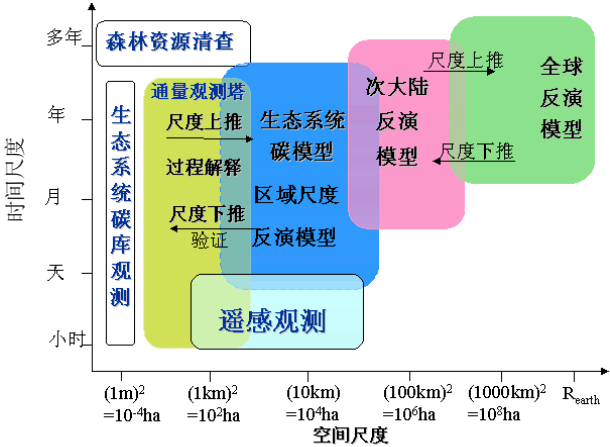


图3 各种碳收支观测和评估方法适宜的空间和时间尺度
Fig.3 The suitable temporal and spatial scales for various methods of observations and assessments of carbon budgets

化的驱动机制^[57-58]。

4.3 利用大气 CO₂ 浓度观测数据反演的区域碳收支评估

利用大气 CO₂ 浓度观测数据的大气反演方法是将大气层的 CO₂ 梯度与大气传输模型相结合来评估陆地 - 大气间的净 CO₂ 交换量, 常被用来检验清单 - 卫星遥感结合法计算的结果。虽然在区域尺度上, 大气反演估计的碳通量精度较粗, 具有很大的不确定性, 但由于它能够独立地提供陆地碳源/汇的估计结果, 所以也是评价区域碳收支的重要技术途径。在区域上, 由于大气 CO₂ 浓度观测网络的站点极其缺乏(全球仅分为 10-15 个陆区)^[30,59], 由此所带来的误差是不可回避的, 同时这种方法评估的结果也对大气传输模型误差和化石燃料释放 CO₂ 估计偏差反应较为敏感^[60-61]。大气 CO₂ 浓度反演方法忽略了许多重要的碳循环过程和重要的生态系统(如湿地和城市生态系统), 如果单一地使用大气反演方法对陆地碳收支开展评估, 其风险还是极大的。例如, Piao 等^[30]利用大气 CO₂ 浓度反演方法计算的中国陆地生态系统碳汇值为 0.35 PgCyr⁻¹, 几乎是清单调查与遥感结合法计算的碳汇量(0.177 PgCyr⁻¹)的两倍, 如果进一步考虑碳交换的侧向通量(包括光合产物释放到大气中非 CO₂ 形态的碳通量, 木材和食物的传输通量和河流碳通量)的影响, 则反演方法所得到的碳汇量为 0.261 PgCyr⁻¹, 两者的差异被大大缩小。

4.4 基于温室气体观测卫星和航空观测的碳收支评估

近年来, 温室气体观测卫星技术的发展以及大气温室气体浓度梯度和地表通量的航空观测技术得到了快速发展, 为评价全球、区域、国别以及重大

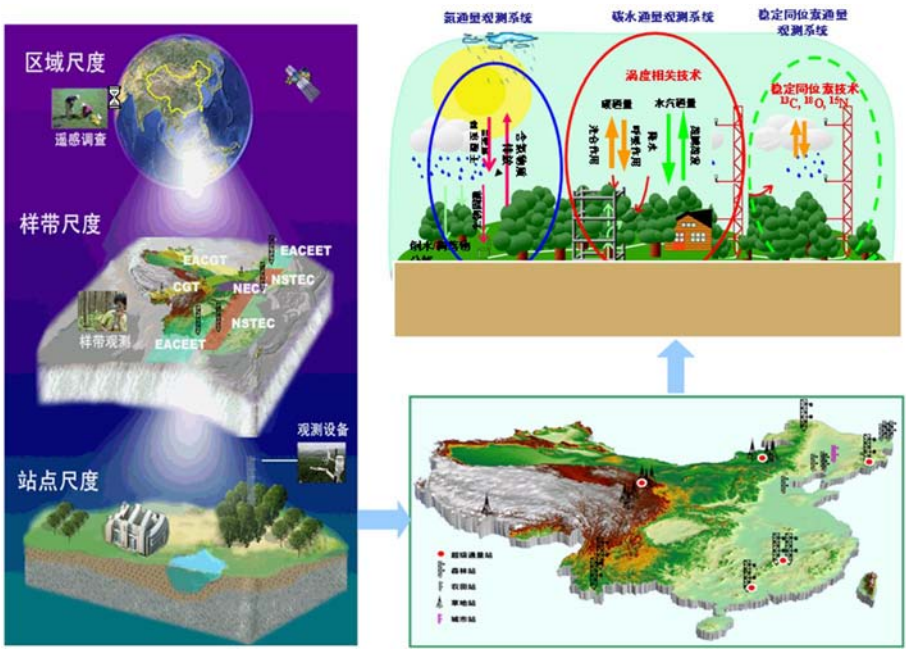


图4 ChinaFLUX 的综合观测体系
Fig.4 Integrated observation system of ChinaFLUX

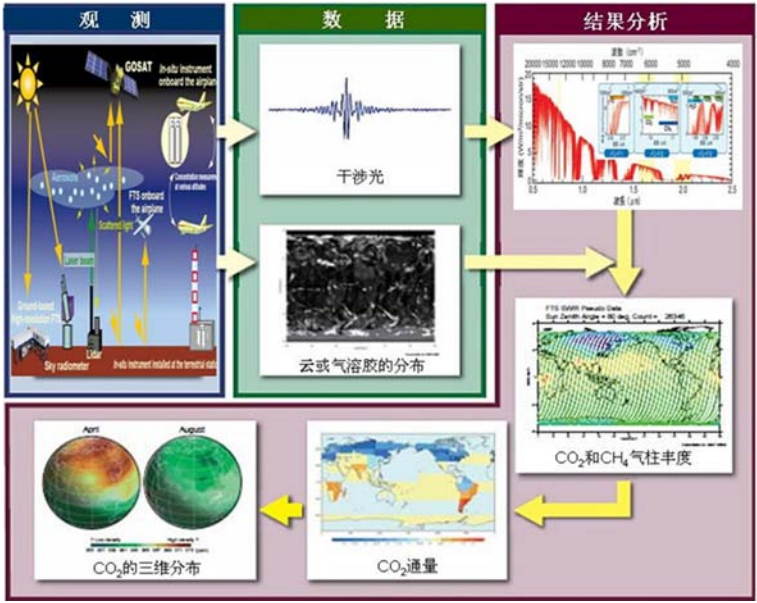


图5 GOSAT 的观测、数据分析、结果输出的概念(依据 GOSAT PROJECT 改绘)
Fig.5 Observations, data analysis and results outputs of GOSAT

生态工程项目的碳收支提供了新的技术途径, 得到了主要发达国家的高度重视。日本航空自 1993 年起使用 Boeing 观测全球和区域 CO₂, 并于 2009 年 1 月 23 日成功地发射了温室气体观测卫星(Greenhouse gases Observing SATellite, GOSAT), 通过对获取数据的分析, 可以评估 CO₂ 和 CH₄ 的全球分布, 以及评估这些温室气体来自于哪些区域、又被哪些区域所吸收等碳收支地理分布、季节变化和年际波动

(图5)。欧洲自1994年起使用Airbus观测全球和区域 H_2O 、 O_3 、 CO 。美国NASA也于2009年2月24日发射了轨道碳观测卫星(Orbital Carbon Observatory, OCO),计划监测全球 CO_2 排放,但是以发射失败而告终。虽然卫星和航空观测方法可以提供高精度的 CO_2 观测数据,帮助我们了解全球或区域的温室气体浓度分布状况,但是,这种方法还需要与大气反演等方法结合才能对区域或全球的碳收支进行评估,而且观测结果的可靠性还需要地面观测数据的验证。

上述技术已经成为一个不容忽视的前沿性科技领域,面对此必然趋势,我们必需能够提供我们的全球和区域温室气体观测数据,以累积科学研究(温室效应气体排放量计算)和国际谈判的资本,避免在全球温室气体管制的谈判过程中被边缘化。

4.5 基于生态系统过程模型的区域碳收支评估

生态过程机理模型是评估区域碳收支的重要工具,它在精细的空间尺度参数化方案和空间化植被和环境数据支撑下,能够模拟生态系统碳循环的空间格局^[62-64]。国际上的生态过程模型发展非常迅速,中国学者也以不同的生态系统类型为对象,自主开发了基于个体的中国森林碳收支模型(FORCCHN)^[65],基于生物物理过程的农田碳收支模型(Agro-C)^[64],以及基于生物-物理-化学耦合过程的草地生态系统碳收支模型(DCTEM)^[66]。在区域碳收支模拟方面,还对AVIM模型进行了改进,将其发展为AVIM2模型^[67];改进了CEVSA模型的物候、分配和凋落、蒸散和土壤水分等过程模拟和参数方案,发展了可以模拟生态系统尺度碳水通量特征的CEVSA2模型^[68-69]。此外,张文菊等^[70]以植物生理生态特性和有机碳周转动力学原理为基础,建立了湿地碳循环模型,并在三江平原和洞庭湖湿地得到了验证。但由于被评估区域的各个网格点内参数的获取,以及模型尺度转换等困难,导致了多数生态过程机理模型在评价区域碳收支时都存在着较大的不确定性^[71-74]。由于生态系统的碳、氮、水三大循环是通过各种生物过程紧密地耦合在一起的联动系统,在模型模拟方面,还需要逐渐从单一的碳循环模拟向碳、氮、水等多种物质循环相耦合的模拟方向发展。

4.6 基于遥感模型的区域碳收支评估

遥感模型也是评估区域碳收支的重要工具,该

方法以遥感数据产品(NDVI、FPAR、APAR)为驱动变量,以GIS的植被或空间化的环境数据库为支撑,模型的参数少,可以定位分析同一样区不同时段的非干扰变化,实现对生态系统碳平衡的动态监测^[30]。中国基于遥感模型的区域碳收支评估方法研究也取得了可喜的进展,如张娜等^[75]以遥感图像为数据源,建立了景观尺度生产力过程模型;Yuan等^[76]建立了基于NDVI、PAR、空气温度和波文比的EC-LUE模型;Li等^[77]就VPM模型在中国高寒草地生态系统中的模拟精度进行了阐述;林文鹏等^[78]建立了基于修正土壤调节植被指数(MSAVI)的城市森林NPP遥感模型;王臣立等^[79]以遥感和森林清查数据为基础,分别建立了基于植被指数和神经网络的森林蓄积量模型并在南方人工林进行了验证;王军邦等^[80]利用过程模型CEVSA和遥感模型GEO-PLM相结合,开发了遥感-过程模型GEO-PLM-CEVSA,并在三江源地区对净生产力进行了模拟。但是,遥感模型的推算结果受模型算法的精确性、卫星观测成像的频率等方面的影响^[30,81-84]。同时,大多数遥感模型缺乏明确的生理生态机制,不能清楚地解释区域碳收支的变化机制,并且在光能传递及转换过程等方面还存在着很大的不确定性。

4.7 基于模型-数据融合技术的碳收支评估

模型-数据融合技术就是充分利用可能获得的观测数据,通过数学方法调整模型的参数或状态变量,使模拟结果与观测数据之间达到一种最佳匹配关系,从而更准确地认识和预测系统状态的变化。它是改善模型参数、选择模型结构、优化传感器网络设计和试验设计及分析模拟结果的不确定性等方面研究的一个有效工具。

生态系统通量观测可以为生态过程机理模型和遥感模型构建、参数确定和结果验证提供原始科学数据,并且其观测数据的空间代表性也与这些模型的空间分辨率相匹配,所以将涡度相关观测数据与生态过程模型和遥感模型相结合是评估区域碳收支有效的技术途径^[69,85-87]。ChinaFLUX初步建成了数据-模型融合系统,Zhang等^[88]采用马尔可夫链-蒙特卡罗滤波,开展了基于涡度相关技术测定的净生态系统碳交换量的陆地生态系统模型参数估计,并利用观测数据反演生态系统模型关键参数,预测生态系统碳通量及其不确定性^[89],利用概率反演探讨碳在生态系统中的残存时间^[90]。

5 结语

定量评估全球以及不同区域和不同类型生态系统的碳收支,可以为科学预测气候变化、服务于减缓和适应气候变化的区域碳管理提供科学依据和科学知识,是生态系统与全球变化科学研究的重要科技问题,近年来的很多研究工作都企图从陆地生态系统碳收支的实测途径来定量评估和认证陆地生态系统固碳能力及其时空格局。本文通过对陆地生态系统碳收支的观测技术体系的综合评述以及区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性的分析,提出了中国急需采用“多尺度观测、多方法印证、多过程融合、跨尺度认知和跨尺度模拟”的技术途径,建立基于野外台站观测和实验网络、地面的站点-样带-网络的多尺度观测与卫星观测系统结合,观测数据-生态过程模型-卫星遥感模型-GIS空间分析系统,建立国家、区域、主要行业以及碳汇相关项目的碳汇计量和定量认证的科学技术系统。

中国从20世纪80年代中后期开始,就针对不同区域的不同类型生态系统碳收支开展了大量研究,利用各种地面清查、中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的定位观测、生态过程模型和遥感模型的模拟分析等多种手段,评价了各种陆地生态系统碳汇、源的时空变化特征,并初步证明了中国的主要生态系统类型都具有不同强度的碳汇功能,在缓解气候变化中将会发挥重要作用。可是采用各种观测、清查方法、生态过程模型、遥感模型等途径得出的中国区域生态系统碳汇功能的评估结果存在着很大的差异,这说明无论在科学认识,还是在区域碳收支评估的理论、技术和方法等方面都还有较大的不确定性。

现实的陆地生态系统是一个异常复杂的系统,在土壤、植被、大气等不同构件之间存在着错综复杂的相互作用关系,特别是生态系统的碳、氮、水三大循环是通过各种生物过程紧密地耦合在一起的联动系统,忽视这种复杂的相互制约关系而独立地开展陆地生态系统的碳循环及其碳汇功能的研究实际上存在着极大的缺陷,尽管近年来科学家们已经意识到了这个问题的重要性,但是关于生态系统碳-氮-水循环间的耦合机制及其对碳源汇的时间和空间格局影响的科学认知还十分匮乏,这必将成为生态系统碳循环及区域生态系统碳收支评估和定

量认证科学研究的重要发展方向和新的热点问题。

参考文献

- [1] IPCC, Summary for Policymakers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 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.
- [3] Li W. Progresses and perspectives of ecological research in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(1): 3-14.
- [4] Yu G R, Li X R, Wang Q F, et al. Carbon storage and its spatial pattern of terrestrial ecosystem in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(2): 97-109.
- [5] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981-2000年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学: D辑*, 2007, 37(6): 804-812.
- [6] 刘国华, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [7] 方精云, 慈龙骏. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320-2322)的若干说明. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 243-249.
- [8] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 491-498.
- [9] 钟华平, 樊江文, 于贵瑞, 等. 草地生态系统碳蓄积的研究进展. *草业科学*, 2005, 22(1): 4-11.
- [10] 张旭东, 彭镇华, 漆良, 等. 生态系统通量研究进展. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1976-1982.
- [11] 邹建文, 焦燕, 王跃思, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量测定方法研究. *南京农业大学学报*, 2002, 25(4): 45-48.
- [12] 郑循华, 徐仲均, 王跃思, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高影响稻田-大气 CO₂ 净交换的静态暗箱法观测研究. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1240-1244.
- [13] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 等. 用于测定陆地生态系统与大气间 CO₂ 交换通量的多通道全自动通量箱系统. *生态学报*, 2007, 27(4): 1273-1282.
- [14] Liang N, Inoue G, Fujinuma Y. A multichannel automated chamber system for continuous measurement of forest soil CO₂ efflux. *Tree Physiology*, 2003, 23(12): 825-832.
- [15] Liang N, Hirano T, Zheng Z M, et al. Continuous measurement of soil CO₂ efflux in a larch forest by automated chamber and concentration gradient techniques. *Biogeosciences Discuss*, 2010, 7(1): 1345-1375.
- [16] 贾金生, 李俊, 张永强. 夏玉米生长盛期农田土壤 CO₂ 排放的研究. *中国生态农业学报*, 2003, 11(3): 1-4.
- [17] 段晓男, 王效科, 冯兆忠, 等. 内蒙古河套灌区春小麦苗期生态系统 CO₂ 通量变化研究. *环境科学学报*, 2005, 25(2): 166-171.
- [18] 郑泽梅, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 涡度相关法和静态箱/气相色谱法在生态系统呼吸观测中的比较. *应用生态学报*,

- 2008, 19(2): 290-298.
- [19] 杜睿, 王庚辰, 吕达仁, 等. 静态箱法原位观测草原CO₂通量的探讨. 生态学报, 2002, 22(12): 2167-2174.
- [20] 娄运生, 李忠佩, 张桃林. 不同利用方式对红壤CO₂排放的影响. 生态学报, 2004, 24(5): 978-983.
- [21] 尹春梅, 谢小立, 王凯荣. 稻田冬闲期CO₂气体排放的观测研究. 生态环境, 2007, 16(1): 71-76.
- [22] 朱咏莉, 童成立, 吴金水, 等. 透明箱法监测稻田生态系统CO₂通量的研究. 环境科学, 2005, 26(6): 8-14.
- [23] 张文丽, 陈世苹, 苗海霞, 等. 开垦对克氏针茅草地生态系统碳通量的影响. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1301-1311.
- [24] 宋霞, 刘允芬, 徐小锋. 箱法和涡度相关法测碳通量的比较研究. 江西科学, 2003, 21(3): 206-210.
- [25] Zheng X H, Xie B H, Liu C Y, et al. Quantifying net ecosystem carbon dioxide exchange of a short-plant cropland with intermittent chamber measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(3), GB3031, doi: 10.1029/2007GB003104.
- [26] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [27] Yu G R, Fu Y L, Sun X M, et al. Recent progress and future directions of Chinaflux. *Science in China: Series D*, 2006, 49(Suppl II): 1-23.
- [28] Massman W J, Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1-4): 121-144.
- [29] 于贵瑞. 人类活动与生态系统变化的前沿科学问题. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [30] Piao S, Fang J, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [31] Frolking S, Goulden M L, Wofsy S C, et al. Modelling temporal variability in the carbon balance of a spruce/moss boreal forest. *Global Change Biology*, 1996, 2(4): 343-366.
- [32] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U.S. carbon budget: Contributions from land-use change. *Science*, 1999, 285(5427): 574-578.
- [33] Del Grosso S, Parton W, Stohlgren T, et al. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature. *Ecology*, 2008, 89(8): 2117-2126.
- [34] Daolan Z, Stephen P, Robb W. Terrestrial net primary production estimates for 0.5° grid cells from field observations - a contribution to global biogeochemical modeling. *Global Change Biology*, 2003, 9(1): 46-64.
- [35] Chamberlain P M, Emmett B A, Scott W A, et al. No change in topsoil carbon levels of Great Britain, 1978-2007. *Biogeosciences Discuss.*, 2010, 7(2): 2267-2311.
- [36] Fang J, Chen A, Peng C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [37] Ni J. Net primary productivity in forests of China: Scaling-up of national inventory data and comparison with model predictions. *Forest Ecology and Management*, 2003, 176(1-3): 485-495.
- [38] Piao S, Fang J, Zhou L, et al. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(2): GB2002. doi:10.1029/2005GB002634.
- [39] 胡中民, 樊江文, 钟华平, 等. 中国温带草地地上生产力沿降水梯度的时空变异性. *中国科学: D辑*, 2006, 36(12): 1154-1162.
- [40] 韩彬, 樊江文, 钟华平. 内蒙古草地样带植物群落生物量的梯度研究. *植物生态学报*, 2006, 30(4): 553-562.
- [41] Fan J, Zhong H, Harris W, et al. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass. *Climatic Change*, 2008, 86(3): 375-396.
- [42] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 等. 1990-2000年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化. *地理学报*, 2004, 59(4): 483-496.
- [43] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. *地理研究*, 1999, 18(4): 349-356.
- [44] 王绍强, 刘纪远, 于贵瑞. 中国陆地土壤有机碳蓄积量估算误差分析. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 797-802.
- [45] 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 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.
- [46] Li Z P, Han F X, Su Y, et al. Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China. *Geoderma*, 2007, 138(1-2): 119-126.
- [47] Xie Z, Zhu J, Liu G, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2007, 13(9): 1989-2007.
- [48] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28(2): 612-619.
- [49] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农田管理土壤碳汇估算. *中国农业科学*, 2008, 41(3): 734-743.
- [50] 鲁春霞, 谢高地, 肖玉, 等. 我国农田生态系统碳蓄积及其变化特征研究. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 35-37.
- [51] 李洁静, 潘根兴, 李恋卿, 等. 红壤丘陵双季稻稻田农田生态系统不同施肥下碳汇效应及收益评估. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2520-2525.
- [52] 赵荣钦, 秦明周. 中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(2): 1-6.
- [53] Huang Y, Zhang W, Sun W J, et al. Net Primary Production of Chinese Croplands from 1950 to 1999. *Ecological Applications*, 2007, 17(3): 692-701.
- [54] Sun W J, Huang Y, Zhang W, et al. Estimating topsoil SOC sequestration in croplands of Eastern China from 1980 to 2000. *Australian Journal of Soil Research*, 2009, 47(3): 261-272.

- [55] Zhang W J, Xiao H A, Tong C L, et al. Estimating organic carbon storage in temperate wetland profiles in Northeast China. *Geoderma*, 2008, 146(1-2): 311-316.
- [56] 于贵瑞, 孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征. 北京: 科学出版社, 2008.
- [57] Fu Y, Zheng Z, Yu G, et al. Environmental influences on carbon dioxide fluxes over three grassland ecosystems in China. *Biogeosciences*, 2009, 6(12): 2879-2893.
- [58] Yu G R, Zhang L M, Sun X M, et al. Environmental controls over carbon exchange of three forest ecosystems in Eastern China. *Global Change Biology*, 2008, 14(11): 2555-2571.
- [59] Kaminski T, Knorr W, Rayner P J, et al. Assimilating atmospheric data into a terrestrial biosphere model: A case study of the seasonal cycle. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1066. doi:10.1029/2001GB001463.
- [60] Stephens B B, Gurney K R, Tans P P, et al. Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO₂. *Science*, 2007, 316(5832): 1732-1735.
- [61] Gurney K R, Chen Y H, Maki T, et al. Sensitivity of atmospheric CO₂ inversions to seasonal and interannual variations in fossil fuel emissions. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: D10308, doi:10.1029/2004JD005373.
- [62] Tao B, Cao M K, Li K R, et al. Spatial patterns of terrestrial net ecosystem productivity in China during 1981-2000. *Science in China: Series D*, 2007, 50(5): 745-753.
- [63] Zhou T, Luo Y Q. Spatial patterns of ecosystem carbon residence time and Npp-driven carbon uptake in the conterminous United States. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22, GB3032, doi:10.1029/2007GB002939.
- [64] Huang Y, Yu Y Q, Zhang W, et al. Agro-C: A biogeophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(1): 106-129.
- [65] 延晓冬, 赵俊芳. 基于个体的中国森林生态系统碳收支模型 FORCCHN 及模型验证. *生态学报*, 2007, 27(7): 2684-2694.
- [66] 周广胜. 草地生态系统碳收支模型//黄耀, 周广胜, 吴金水, 等. 中国陆地生态系统碳收支模型. 北京: 科学出版社, 2006.
- [67] 黄政, 季劲钧, 曹明奎, 等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟. *生态学报*, 2006, 26(12): 4156-4163.
- [68] 顾峰雪, 于贵瑞, 温学发, 等. 干旱对亚热带人工针叶林碳交换的影响. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 1041-1051.
- [69] Gu F X, Cao M K, Wen X F, et al. A comparison between simulated and measured CO₂ and water flux in a subtropical coniferous forest. *Science in China: Series D*, 2006, 49: 241-251.
- [70] 张文菊, 童成立, 吴金水, 等. 典型湿地生态系统碳循环模拟与预测. *环境科学*, 2007, 28(9): 1905-1911.
- [71] Dufrene E, Davi H, Francois C, et al. Modelling carbon and water cycles in a beech forest Part I: Model description and uncertainty analysis on modelled Nee. *Ecological Modelling*, 2005, 185(2-4): 407-436.
- [72] Jung M, Vetter M, Herold M, et al. Uncertainties of modeling gross primary productivity over Europe: A systematic study on the effects of using different drivers and terrestrial biosphere models. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21, GB4021, doi:10.1029/2006GB002915.
- [73] Koca D, Smith B, Sykes M T. Modelling regional climate change effects on potential natural ecosystems in Sweden. *Climatic Change*, 2006, 78(2-4): 381-406.
- [74] Tang J Y, Zhuang Q L. Equifinality in parameterization of process-based biogeochemistry models: A significant uncertainty source to the estimation of regional carbon dynamics. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113, G04010, doi:10.1029/2008JG000757.
- [75] 张娜, 于贵瑞, 赵士洞, 等. 基于遥感和地面数据的景观尺度生态系统生产力的模拟. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 643-652.
- [76] Yuan W P, Liu S, Zhou G S, et al. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143(3-4): 189-207.
- [77] Li Z, Yu G, Xiao X, et al. Modeling gross primary production of alpine ecosystems in the Tibetan Plateau using Modis images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 107(3): 510-519.
- [78] 林文鹏, 王臣立, 赵敏, 等. 基于森林清查和遥感的城市森林净初级生产力估算. *生态环境*, 2008, 17(2): 766-770.
- [79] 王臣立, 牛铮, 郭治兴, 等. 基于植被指数和神经网络的热带人工林地上蓄积量遥感估测. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1830-1834.
- [80] 王军邦, 刘纪远, 邵全琴, 等. 基于遥感-过程耦合模型的1988-2004年青海三江源区净初级生产力模拟. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 254-269.
- [81] Prinn R, Jacoby H, Sokolov A, et al. Integrated global system model for climate policy assessment: Feedbacks and sensitivity studies. *Climatic Change*, 1999, 41(3-4): 469-546.
- [82] Xiao X, Hollinger D, Aber J, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needle-leaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 519-534.
- [83] Xiao X, Zhang Q, Braswell B, et al. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(2): 256-270.
- [84] Xiao X, Zhang Q, Saleska S, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(1): 105-122.

- [85] Luo Y Q, White L W, Canadell J G, et al. Sustainability of terrestrial carbon sequestration: A case study in duke forest with inversion approach. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17, 1021, doi:10.1029/2002GB001923.
- [86] 米娜, 于贵瑞, 王盘兴, 等. 基于 calco 模型对中亚热带人工针叶林 CO₂ 通量季节变异的模拟. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1119-1131.
- [87] Cao M K, Yu G R, Liu J Y, et al. Multi-scale observation and cross-scale mechanistic modeling on terrestrial ecosystem carbon cycle. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2005, 48(s1): 17-32.
- [88] Zhang L, Yu G, Luo Y, et al. Influences of error distributions of net ecosystem exchange on parameter estimation of a process-based terrestrial model: A case of broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbaishan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3017-3026.
- [89] 张黎, 于贵瑞, Luo Y Q, 等. 基于模型数据融合的长白山阔叶红松林碳循环模拟. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1044-1055.
- [90] Zhang L, Luo Y, Yu G, et al. Estimated carbon residence times in three forest ecosystems of Eastern China: Applications of probabilistic inversion. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115, G01010, doi:10.1029/2009JG001004.

Methods and Uncertainties in Evaluating the Carbon Budgets of Regional Terrestrial Ecosystems

YU Guirui¹, WANG Qiufeng¹, ZHU Xianjin²

(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, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: Quantitative assessment of carbon budgets at regional scale or in different ecosystems is an important scientific issue in the field of ecosystem and global change, which can provide scientific basis for forecasting climate change and regional carbon management serving for mitigation and adaptation to climate change. Though assessment and authentication of regional carbon budgets could not be fulfilled precisely using current measurements and evaluation methods, many progresses had been made. In this paper, we reviewed the observation technique systems, especially the methods and their uncertainties in evaluating regional carbon budget. To evaluate the carbon sink function of ecosystems, main industries, and projects related to carbon sink and their spatiotemporal patterns quantitatively, it is urgent to build an observation and experiment network based on field platforms and to develop a multi-scale observation system comprised by field platforms, terrestrial transects and ecological networks combined with satellites and aviation observations. The system based on observation data, ecological process model, remote sensing model and GIS spatial analysis is also needed to be built. These systems should be under the guideline of multi-scale observation, multi-method confirmation, multi-process fusion, across-scale cognition and simulation. Meanwhile, cycles of carbon, nitrogen and water in terrestrial ecosystems are coupled by various biological processes, while the knowledge of the coupling mechanisms and their influences on the spatiotemporal patterns of carbon source or sink was limited, so it will be an important aspect and new research hot in the research of ecosystem C cycle and regional carbon budget assessment and authentication.

Key words: terrestrial ecosystem carbon cycle; regional carbon budgets; evaluation and management of carbon sink; measure and quantitative authentication of carbon sink

本文引用格式:

于贵瑞, 王秋风, 朱先进. 区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 103-113.