

中国区域陆地生态系统碳收支综合研究的科技需求 与重要科学问题

王秋凤¹, 刘颖慧², 何念鹏¹, 方华军¹, 伏玉玲¹, 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. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘 要: 陆地生态系统碳收支及其循环过程机制研究一直是全球气候变化的成因分析、变化趋势预测、减缓和适应对策分析等领域的热点, 受到科技界和国际社会的广泛关注。本文在简要回顾中国陆地生态系统碳收支及其循环过程研究领域的发展历史, 总结各个发展阶段主要特征的基础上, 讨论了开展中国区域陆地生态系统碳收支综合研究的科技需求和社会需求, 评述了中国在相关领域研究中存在的主要问题, 探讨了当前的科学研究前沿领域及其关键科学问题。本文指出, 现阶段中国开展区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程机制综合研究工作不仅是提升中国生态系统生态学、地球系统科学与全球变化科学的创新能力的科技发展需求, 更是中国参与应对全球气候变化国际合作、改进生态系统管理、保障生态安全的社会经济发展需求。同时还指出, 中国现阶段在该领域的研究工作还缺乏各类生态系统碳收支的实际调查数据, 缺乏国家尺度碳收支科学数据的整合, 缺乏可用于碳收支计量与综合评估的模型工具, 也没有形成国家层次的碳源汇计量、评估、认证及决策分析信息系统平台。本文通过国内外科技发展的分析认为, 中国在该领域的研究工作, 应在大力发展陆地生态系统碳收支和碳汇功能的定量监测、评价和认证的方法与技术基础上, 重点关注并前瞻性地开展陆地生态系统碳-氮-水循环过程耦合关系及其对全球气候变化的响应与适应、碳-氮-磷生态化学计量学特征及其环境影响、碳-氮-水耦合循环过程的生物调控机制等前沿领域, 以提高中国生态系统与全球变化科学研究水平, 为国家的生态系统与温室气体管理提供基础理论、科学知识和先进技术的储备。

关 键 词: 碳收支与碳循环; 碳汇功能; 碳-氮-水耦合循环; 增汇技术与潜力; 陆地生态系统; 中国

1 前言

地球系统的碳循环是指碳元素在大气、海洋、陆地和岩石圈碳库之间的交换和流动的生物地球化学过程。由于全球碳循环与气候变化的关系密切, 使得地球系统的碳循环及其过程机制成为气候变化的成因分析、变化趋势预测、减缓和适应对策科学研究中的基础问题, 受到科技界和国际社会的广泛关注^[1-2]。关于不同类型生态系统的碳储量、固碳速率和增汇潜力及其机制的研究也成为国内外生态系统生态学、地球科学研究的重点和热点。

应对以气候变暖为核心内容的全球变化问题已经成为维持全球可持续发展的重要议题, 减少CO₂等温室气体排放, 抑制大气中温室气体浓度的

持续增加已被作为国际行动的主要目标和任务。因此, 世界各国的温室气体减排责任的谈判、全球规模的减排行动已经成为众多发展中国家所面临的巨大压力和难以解决的问题。中国面临着更大的国际减排压力, 并且仅从自身的社会经济发展来看, 提高工农业生产的科技水平、适度地节能减排、加强生态建设、发挥生态系统固碳增汇功能也是中国必须选择的国家发展战略^[3]。由此可见, 综合研究中国区域陆地生态系统碳循环过程及其格局变化规律不仅是评估中国区域碳收支状况、有效管理温室气体、积极应对气候变化的迫切需要, 同时也是生态系统与全球变化科学发展的科技任务, 并且还具有非常重要的全球意义^[1,3]。

自20世纪80年代中后期, 中国学者开始了陆

收稿日期: 2011-10; 修订日期: 2012-01.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833504); 中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA05050600)。

作者简介: 王秋凤(1973-), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为陆地生态系统碳循环与水循环。E-mail: qfwang@igsnr.ac.cn

通讯作者: 于贵瑞(1959-), 男, 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@igsnr.ac.cn

地生态系统碳循环研究工作,并在许多研究领域取得了重要进展。本文在回顾中国陆地生态系统碳收支及其循环过程综合研究的发展历程基础上,针对中国在陆地生态系统碳收支综合研究方面的近期科技需求、存在的问题及需要重点解决的关键科学问题等进行了阐述,期望能为今后该领域的科学研究、国家层面的碳收支监测、评估、认证和管理工作提供有价值的信息。

2 中国陆地生态系统碳收支研究历史的简要回顾

中国陆地生态系统的碳收支及其循环过程研究始于20世纪80年代中后期,尤其是在近10多年来发展最为迅速,陆续启动了各种类型、不同规模的研究项目,这些研究项目共同关注的科学和技术问题包括:① 不同类型生态系统不同碳库碳储量的时空格局及其影响因素;②碳循环关键过程对气候变化和人为干扰的响应和适应机制;③主要类型陆地生态系统碳汇/源强度、时空格局及其形成过程;④陆地生态系统碳循环过程模型和遥感反演模型的引进和发展;⑤生态系统碳收支的历史过程模拟、未来情景预测及增汇潜力分析;⑥土地利用/覆被变化、农田管理、流域治理、森林经营和生态工程对陆地生态系统碳库及其碳汇功能的影响;⑦人为

调控区域生态系统碳收支以及碳循环过程的技术途径和措施,人为碳汇强度、持续性、泄漏、经济性的定量认证^[4]。

回顾中国陆地生态系统碳循环研究过程,大致经历了以下几个主要阶段:①陆地生态系统碳收支与循环过程的前期研究阶段;②区域尺度生态系统碳收支和碳循环过程综合研究阶段;③生态系统碳循环过程对环境变化的响应和适应性实验研究阶段;④生态系统碳-氮-水耦合循环及其区域碳收支调控管理研究阶段^[4]。纵观研究工作的发展历史可以看出,中国的生态系统碳收支与碳循环过程研究经历了从局地到全球问题,从静态格局评价到动态变化分析,从单一的碳收支评价到多种复杂的碳循环过程综合研究的发展历程。如图1所示,从不同角度可以概括为以下几个显著的阶段特征:

研究对象:典型生态系统→区域生态系统→全国尺度→全球尺度;

研究内容:静态格局分析→动态过程模拟→环境影响分析→系统响应与适应;

应用目标:储量清查→过程分析→过程模拟→区域定量评价→区域综合管理;

技术手段:资源清查→碳氮水通量联网观测→生态过程控制实验;

关键过程:地上生物量积累→生态系统碳循环过程→水碳氮循环耦合关系。

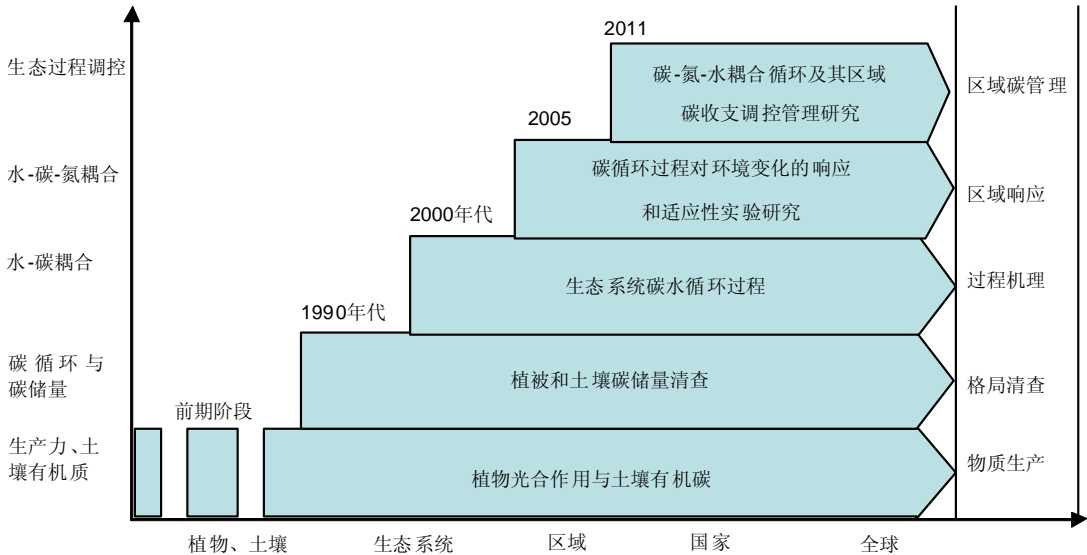


图1 中国陆地生态系统碳循环研究的历史阶段及其主要特征

Fig.1 Development stages of carbon cycle research in Chinese terrestrial ecosystem and the main characteristics

3 中国陆地生态系统碳收支研究的科技需求和社会需求

中国位于地球环境变化速率最大的东亚季风区,具有 50 多个自然生态系统类型区域。就其环境本身而言,具有时间和空间格局方面的复杂性、多样性和变异性;就其对外界变化的响应和承受力而言,具有对环境变化的敏感和脆弱性的特点。与此同时,目前中国又处于经济高速发展、人口压力剧增的时期,人类活动对环境的干扰显得尤为突出。这些都导致中国陆地生态系统及其状态千差万别,生态系统碳循环过程十分复杂。因此,在中国开展陆地生态系统碳收支研究不仅对于提升中国生态系统生态学、全球变化科学以及地球系统科学的科技创新能力具有十分重要的意义,更是中国参与应对全球气候变化国际合作、改进生态系统管理、保障生态安全的社会经济发展的急迫需求。

3.1 提升中国地球系统科学与全球变化科学的科技创新能力的科技需要

为应对全球气候变化,需定量评估中国陆地生态系统碳库储量、固碳潜力与速率,以及其区域分布格局、动态变化趋势和主要驱动力,各种固碳技术措施及其对碳汇贡献和经济可行性,综合模拟结果的可靠性,重大生态工程固碳效果和国家尺度碳管理政策的合理性等^[2-3]。为此,需要采用多尺度、多学科的野外长期观测、人工控制实验、生态系统过程模拟、数据-模型融合等先进技术手段,需要地球系统科学、全球变化科学、生态系统生态学、生态经济学、信息科学的交叉和集成性创新研究^[2]。中国复杂多样的生态系统类型和地形条件、气候变化和人类活动的交互效应,使得中国陆地生态系统碳循环及其对环境变化响应和适应的区域特征更加复杂^[4]。因此,有效地组织基于综合观测-控制实验-模拟分析为技术手段,多学科协同攻关的生态系统碳循环过程机理及其对环境变化响应的基础研究,必将会促进中国相关学科的基础理论发展和研究方法创新,提升科技创新能力,而且为中国陆地生态系统的适应性管理提供重要的科学指导。

3.2 参与应对全球气候变化国际行动和维护国家利益的迫切需要

目前中国已经成为第一大温室气体排放国^[5],虽然近年来中国在降低能耗和减少温室气体排放方面成就显著,但在今后相当长的时期内,中国人

口还会继续增长,继续增加能源消费和温室气体排放量是不可避免的现实^[6]。从国际谈判的进程和形势来看,目前发达国家之间的分歧和矛盾可能有所缓解,他们会团结起来向发展中国家施加更大的压力,其焦点会集中在中国、印度和巴西等新兴经济体,希望这些国家来承担下一阶段的减排义务。由此可见,中国承担温室气体减排的国际压力必将会越来越大。

IPCC 认为生态系统固碳是目前经济可行和环境友好的减缓大气 CO₂ 浓度升高的方法,《京都议定书》3.4 款已经明确,可以通过增加生态系统碳库来抵消经济发展中的碳排放^[7]。因此,全球的主要经济大国都十分重视增加生态系统碳库问题,已经开展了全球主要区域的陆地生态系统碳汇的时空分布格局、陆地增汇潜力和技术途径的综合研究,而中国急需开展陆地生态系统的碳收支及其碳循环过程的综合研究,揭示陆地生态系统的固碳速率和增汇潜力,为中国应对气候变化提供科技支撑。

3.3 改进生态系统管理和保障生态安全的需要

中国社会经济可持续发展正面临着资源短缺和生态环境破坏等一系列问题、经济发展与资源环境保护的矛盾日益突出^[8],如何寻求经济发展-资源保障-生态安全三者的协调是中国经济发展过程中必须解决的瓶颈性问题。与此同时,在气候变化的影响下,中国的资源、生态和环境状况已经发生了重大改变,对经济发展和生态安全形势产生了重大影响^[9]。值得注意的是,应对气候变化的陆地生态系统碳增汇需求与生态环境建设和保护的目标是一致的。通常的陆地增汇技术科学研究都是从生态系统碳、氮和水的综合管理角度出发的,现有的生态系统碳汇管理措施也都同时具有保护和提高生态系统水源涵养、生物多样性、水土保持等多种功能。因此,研究生态系统碳循环过程及其对环境变化的响应与适应机制,不仅是增加陆地碳汇、适应气候变化、减缓中国的减/限排压力的需求,同时也是改善中国生态系统管理、保障生态安全、维持社会可持续发展的重大科技需求。

4 中国陆地生态系统碳收支研究存在的主要问题

中国的陆地生态系统碳收支及其循环过程研究虽然起步较晚,但是发展迅速,尤其是近年来,在

科学研究的深度和广度方面得到了极大的扩展,并取得了一些具有国际影响力的科技进展,为国家的生态环境建设和应对气候变化提供了科学依据。可是,相对于国际上一些发达国家而言,中国在该领域的科学研究工作还有较大差距,还存在着一些急需解决的关键技术和科学问题。

4.1 缺乏全国规模的可支撑各类生态系统碳收支评估的基础调查数据

陆地生态系统碳收支评估不仅需要生态系统碳收支的直接观测数据,还需要全国规模的可以支撑碳收支评估的各种类型基础数据。在一系列碳收支与碳循环研究领域的国家重大计划项目推动下,中国积累了一些不同区域、不同生态系统类型以及多个陆地样带的碳储量调查数据及其相关的基础数据,比较有使用价值的包括全国土地利用与土地覆盖空间数据^[10]、全国森林资源清查数据^[11]、全国草地资源清查数据^[12]、全国土壤普查整编数据^[13]、全国植被空间分布数据^[14]、全国气候和气象要素空间数据^[15]。但是,中国的科学数据积累与美国、欧洲和日本等发达国家相比差距很大,现在所拥有的数据还缺乏系统性、完整性、规范性,尤其缺乏全国尺度、各类生态系统长期连续的动态变化普查数据,与此同时,评估区域碳收支所需要的地理学、气象学、植物学、卫星遥感等基础数据也相对缺乏。因此,在中国开展全国尺度的碳收支研究,急需采取统一的标准和方法,对中国森林、草地、农田和湿地等各类生态系统碳储量和固碳速率进行大规模综合调查,开展全国植被和环境要素的遥感观测与数据集成,形成系统性的陆地生态系统碳收支评估所需要的科学数据资源体系。

4.2 缺乏区域尺度和国家尺度的碳收支科学数据集集成和整合

中国直接服务于陆地生态系统碳收支评估的科学数据积累方面也有很好的基础,例如定期或不定期的全国和区域性土壤普查、森林和草地资源清查、土地资源调查、土地利用清查以及各种生态环境要素的卫星遥感反演等工作都积累了一些有价值的区域性的空间格局科学数据。与此同时,中国科学院的中国生态系统研究网络(CERN)、国家林业局的森林生态系统研究网络(CFERN)、以及国家生态系统观测研究网络(CNERN)也开展了生态系统变化长期定位观测^[16-18],特别是中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)开展了陆地生态

系统碳水通量及其碳循环过程观测,以及环境变化对生态系统碳循环过程影响的野外控制实验等,这些观测和实验网络直接为中国的区域碳收支评估提供了原始科学数据源^[4]。但是,对于全国尺度碳收支评估的数据要求而言,依然存在着观测网络站点密度低、空间代表性和类型代表性不足、观测项目缺失、数据共享机制不健全等问题,特别是不同部门的观测研究台站之间的空间布局、观测系统设计、技术标准还没有统一,使得观测和实验数据可比性不强。更为重要的是,中国还存在着地面观测数据与卫星遥感观测数据的整合度不高,气象、植被与土壤观测数据的时空尺度不匹配,各种方法与技术途径观测数据精度不同,数据融合、再分析和空间化等基础工作不扎实等问题,使得现有数据还难以满足中国区域碳收支评估数据需求^[3]。因此,现阶段迫切需要整合定位观测-样带调查-区域清查-卫星遥感-社会统计的多源科学数据资源,为中国陆地生态系统碳循环与碳收支计量提供有力的数据支撑。

4.3 缺乏可用于生态系统碳收支计量和综合评估的模型工具

生态模型是评估区域碳收支的重要工具,在精细空间尺度参数化方案与空间化植被和环境数据支撑下,能够模拟生态系统碳循环空间格局^[19-21]。中国在这方面已经开展了很多工作,一方面是引进了多个生态系统模型(如BEPS、InTEC、GLO-PEM、CBM-CFS、CASA等),并对其进行了本地参数化^[2];另一方面,对森林、草地、农田、湿地生态系统碳循环模型以及区域模型的开发也取得了一些进展,如,植被-土壤-大气碳交换模型(CEVSA)^[22-23]、大气-植被相互作用模型(AVIM)^[24-25]、农田模型^[21]、草地模型^[26]、森林模型^[27]等,这些模型为开展生态系统碳收支格局的分析和预测奠定了基础。但目前国内大多数模型在对陆地生态系统碳收支的模拟分析中还只考虑了气候要素变化本身的影响,缺乏对土地利用变化和各種人类活动影响的定量描述,对气候变化和人类活动双重驱动下的区域陆地碳收支时空变化的模拟研究较少。

此外,由于缺乏长时间序列的观测数据支撑,对碳-氮-水耦合循环关键过程尚缺乏深刻认识,特别是生态系统碳循环过程对环境变化适应性的模拟能力还十分有限。因此,系统开发直接用于生态系统碳收支计量和综合评估的模型工具是一项需

求十分迫切的科技工作。

4.4 尚未形成国家层次的碳源汇计量、评估、认证及决策分析信息系统平台

区域碳收支研究需要跨学科、跨区域和不同部门科学家之间的广泛合作和资源共享,还需要地理覆盖范围大、延续时间长、连续性好的碳循环观测研究以及空间栅格化的基础性科学数据的支持,更需要数据分析、决策分析和模型工具的不断发展。中国在森林碳汇计量、LULUCF 碳计量的方法学等方面开展了一些相关的研究工作^[28-29],但是还没有形成国家层次的碳计量、认证和决策分析的信息系统平台。因此,中国急需进一步推动科学数据资源挖掘和整合工作,开发数据集成分析方法、碳计量和评估方法、碳管理决策分析技术,急需构建中国主要类型生态系统以及国家层次的基础科学数据、专项科学数据和碳统计数据资源信息系统,建立站点定位观测-专项生态调查-行业资源清查相结合的数据采集和同化系统,生态过程模式-遥感反演模式-碳计量统计相融合的碳收支评估认证系统,以及中国温室气体收支计量、管理和政策分析系统^[3],为集成分析和评价中国区域陆地生态系统碳收支的地理空间格局和历史过程及其增汇潜力和效果提供信息平台。

5 陆地生态系统碳收支及其循环过程研究的重要科学问题

陆地生态系统碳收支及其循环过程研究是定量评估区域和不同类型生态系统碳收支的基础,是生态系统与全球变化科学研究的重要科技问题。就当前的研究阶段而言,有以下几个重要科学问题应给予高度重视。

5.1 陆地生态系统碳收支的定量评价和增汇潜力的认证及其不确定性

陆地生态系统被公认为大气碳汇,增强陆地生态系统的碳固定、减少碳排放以提高生态系统碳汇功能是温室气体管理的重要技术途径。中国学者利用地面清查、长期定位观测、遥感和模型模拟等多种手段研究了中国陆地生态系统碳收支及其源/汇功能的时空变化特征,取得了一些重要进展^[2,4]。虽然大多的研究都已证明,自 20 世纪 70 年代中期以来,中国的植树造林和林业管理、草地保护、农作制度改革和保护性耕作等措施发挥了重要的固碳

功能,为缓解全球的气候变化作出了重要贡献,但是各种方法评估的结果仍然存在较大不确定性^[2]。近年来,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开展了很多研究工作^[30-33],已经提出了国家温室气体清单计量方法、清洁发展机制(CDM)项目、造林与再造林和林业管理项目、土地利用及土地覆被变化对碳源汇影响等方面的碳计量方法,可是这些方法在国际上的公认程度、数据的可获得性、评估结果的准确性等方面都存在着很大的不确定性^[33]。由此可见,要在全球范围内准确监控和管理陆地生态系统的碳源/汇,科学评估中国陆地生态系统的固碳速率和潜力,急需解决以下 3 个方面的关键科学和技术问题:

(1) 如何建立中国和全球大气温室气体浓度变化、地-气的碳交换动态分布监测体系,大气碳收支的定量评估系统,以及大气 CO₂ 的源/汇分布和区域性碳排放强度的辨识方法,增强生态系统减排/增汇的可报告、可度量和可核查的基础能力、提高制定国家碳减排/增汇政策和规范的科技支撑能力;

(2) 如何定量认证中国陆地碳收支及其增汇潜力,评估碳减排行动/措施/政策的实际减排效果,评价陆地碳增汇措施和碳捕获技术的碳汇效应,建立国家的碳计量和核查的技术系统,增强温室气体科学管理的技术服务能力;

(3) 如何建立全球和中国的碳贸易市场体系,制订国家碳交易政策、规范与制度,发展碳汇林业、碳汇农业和碳汇草业,并定量认证其可交易碳汇及其成本效益,为建立温室气体管理的地域间、行业间和省际间的碳交易、生态补偿方案的制订及核算标准提供技术服务。随着中国对应对气候变化问题重视程度的不断提高,区域碳循环过程调控和温室气体管理概念^[34]被逐渐认可,并且温室气体管理的格局管理(pattern management)与过程管理(process management)两者并举的思想^[34]也被广泛接受。基于这种理念,近年来在国家层面上相继启动了一批以区域碳收支格局管理或典型生态系统碳循环过程管理为研究目标的科研项目。例如,2009 年中国科学院启动了全球气候变化与生态项目群,系统开展中国森林、草地和农田土壤生态系统固碳潜力及其增汇技术研究^[35];2010 年国家 973 计划启动了“天然森林和草地土壤固碳功能与固碳潜力研究”;2011 年中国科学院又启动了“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”战略性先导科技专项(图

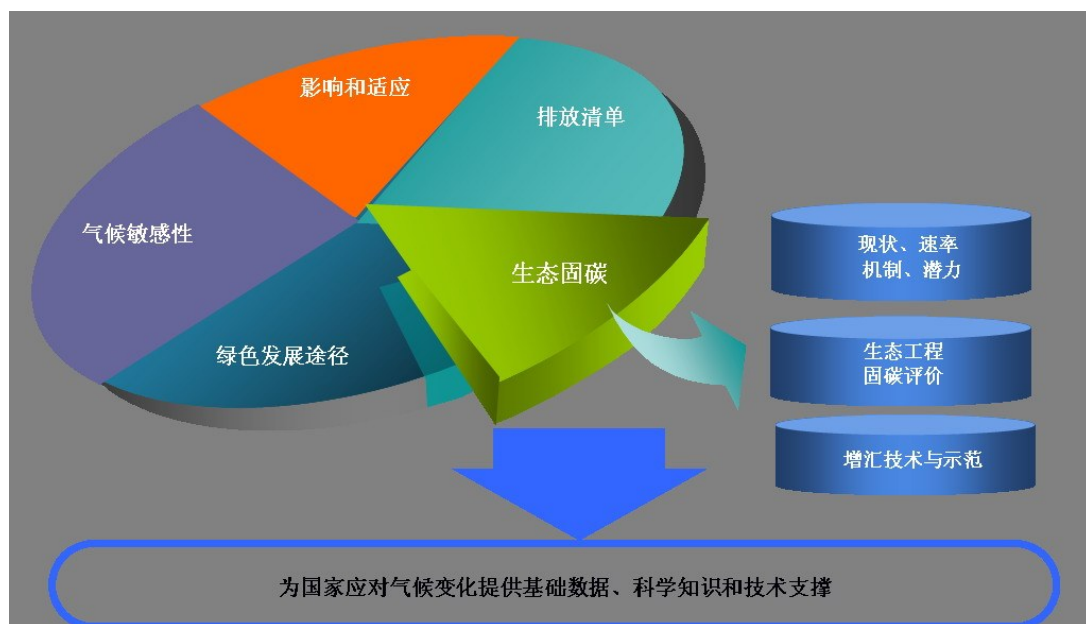


图2 “应对气候变化的碳收支认证及相关问题”的概念框架

Fig.2 Conceptual framework of “Strategic Priority Research Program - Climate Change: Carbon Budget and Relevant Issues”

2)。该先导科技专项的重点定位在研究中国陆地碳收支的定量认证、碳增汇潜力与速率评估、增汇技术与措施选择、生态工程固碳效果评价、增汇技术的试验示范等重大科学技术问题。这些项目的启动说明了中国陆地碳循环研究已经由过去的基础科学问题、观测和评估方法、区域格局特征研究阶段进入了以直接服务国家尺度的温室气体区域格局管理和典型生态系统循环过程调控的新阶段。

5.2 陆地生态系统碳-氮-磷生态化学计量学特征及其耦合机制和环境影响

生态化学计量学是研究生态过程和生态作用中化学元素平衡的科学^[36]。2004年5月,《Ecology》杂志专门介绍了生态化学计量学这一研究热点,说明生态化学计量学已经成为一个系统的、重要的学科。陆地生态系统碳-氮-磷生态化学计量学特征的分析,以及碳-氮-磷耦合机制和环境影响的研究有助于理解大气的氮沉降对碳循环、固碳潜力和速率的影响。

中国的生态化学计量学研究起步较晚,但近几年发展较快^[37-38]。研究工作主要集中在区域C:N:P化学计量学格局及其驱动因素方面^[39-43],同时也关注了氮肥施加对群落N:P比率的影响^[44],不同演替阶段优势植物的N:P比率的变化^[45]。但是如何利用生态化学计量学理论,分析中国陆地生态系统碳-氮-水通量的平衡关系及其对全球变化的响应和适

应方面的研究还十分匮乏,需要在以下几个方面加强研究:

(1) 主要植被生物组成化学计量关系的稳定性机制是什么,生态系统主要有机碳库的生态化学计量特征之间的作用关系如何,生物功能性状(物种、生物量、叶面积、根冠比)计量关系的保守性和时空格局;

(2) 全国尺度的植物、土壤、微生物的化学计量特征的空间格局及其机理,不同生态系统的C:N:P化学计量特征,不同生态系统类型是否具有稳定的化学计量特征,不同类型生态系统如何相互影响,如何影响全球生物地球化学循环;

(3) 碳-氮-水循环通量计量平衡的内稳性和变异性,生物系统的化学计量如何制约生态系统碳-氮-水耦合循环通量计量平衡关系,碳-氮-水循环耦合关系的地理格局是什么,全球变化对这种耦合关系的影响如何。

目前,中国在这一领域资助的项目还相对较少。国家基金委已资助了一些重点和面上项目,例如重点项目“草原生态系统中的生源要素的计量化学关系及其耦合机理”、“植物功能属性及化学计量生态学”等已经开展了一些研究工作,一些研究成果也在不断涌现,它也必将会成为中国陆地生态系统碳收支综合研究中的一个重要方向。

5.3 生态系统碳-氮-水循环过程耦合关系及其对全球气候变化的响应与适应

近年来,生态系统碳-氮-水耦合循环的研究正逐渐成为陆地生态系统和全球气候变化研究的新生长点和科学研究前沿。生态系统的碳、氮、水循环是驱动陆地生态系统过程和功能的关键过程,全球变化四大“联合研究计划”都将生态系统碳、氮、水循环以及其与全球变化的相互关系作为研究重点^[46]。近年来,中国在生态系统碳、氮、水循环过程及其对气候变化的响应方面也开展了大量的研究。但是,在以往的研究过程中,由于观测和实验研究条件和能力的限制,往往是假设生态系统的碳、氮和水循环之间相对独立,各自从不同角度开展独立的研究工作,也往往是仅仅关注各自的循环过程及其机理^[46]。但实际上生态系统的碳、氮、水循环间存在着严格的耦合,相互影响,相互作用,综合研究生态系统碳-氮-水循环过程耦合关系及其对全球气候变化的响应与适应已经成为前沿性的科学问题,已经得到中国科技界的关注。2006年国家基金委启动的重大项目“中国主要陆地生态系统对全球变化的响应与适应性样带研究”就开始关注生态系统碳-氮-水循环过程耦合关系及其对全球气候变化的响应与适应问题,2010年科技部又启动了973计划研究项目“中国陆地生态系统碳-氮-水通量的相互关系及其环境影响机制”。这两个项目的研究重点和研究目标是充分利用中国东部南北样带和中国草地样带在全球植被中的区位优势 and 现有的研究基础,建立中国陆地生态系统碳-氮-水循环的综合科学研究平台(ChinaFLUX-CN),开展典型陆地生态系统碳-氮-水循环过程及其通量的长期联网观测,组织增温、控水、施肥和放牧的多因子交互联网控制实验,开发新一代生态系统碳-氮-水耦合循环的过程机理-遥感耦合模型,阐明生态系统碳、氮和水通量之间的生态计量平衡特征及其对气候变化的响应和适应^[4]。

通过近几年的研究工作,已经初步构建了ChinaFLUX-CN的综合观测技术体系,多因子野外控制实验网络(ChinaFLUX-CNFEN),生态过程-遥感模型系统平台(ChinaFLUX-CNMS),生态系统碳循环模型-数据融合系统(CCMDFS-V0)(Carbon Cycle Model-Data Fusion System)以及服务于国家碳收支评估的数据集成-模型模拟-可视化表达的协同环境(ChinaFLUX-CNeSE)。但是,系统性地认识生

态系统碳-氮-水循环过程及其耦合关系,理解这些耦合关系对全球气候变化的响应与适应规律,还需深入研究解决以下几个关键科学和技术问题:

(1) 生态系统碳、氮、水通量之间究竟具有怎样的平衡关系;是什么机制驱动这种平衡关系的时空变异。

(2) 生态系统碳、氮、水通量的平衡关系与土壤和植物的生物化学计量平衡、以及生物资源的有效利用具有怎样的联系。

(3) 生态系统碳-氮-水耦合循环存在着多个环节,具体是哪些环节对生态系统功能的影响发挥关键作用;在不同的时间尺度上,这些耦合环节对碳氮水循环的影响是否一致。

(4) 全球变化引起的气候变暖、CO₂浓度升高、氮沉降增加以及降水格局变化如何综合地影响生态系统碳平衡,是否会改变生态系统碳-氮-水通量之间的耦合关系。

该前沿性的科学研究领域逐渐得到了科技界的高度重视和认可。2011年国家基金委也将该领域作为重点资助方向,并资助了“典型森林土壤碳氮循环关键过程对可利用氮响应的同位素示踪研究”、“大气氮沉降对内蒙古草原植被-土壤系统¹⁵N自然丰度梯度变化和N循环特征的影响”等5个重点项目。2011年科技部又启动了973计划“典型流域生态系统-大气碳氮气体交换关键过程、规律与调控原理”项目。

5.4 陆地生态系统碳-氮-水耦合循环过程的生物调控机制及其对环境变化适应性

陆地生态系统碳-氮-水耦合循环关系特征表征了生态系统能量-营养-水分循环的耦合关系规律,区域尺度的碳-氮-水耦合循环过程决定着植物/大气界面碳-氮-水交换通量的时空格局以及植物/土壤碳-氮-水储存的时空格局。因此,陆地生态系统碳-氮-水耦合关系整合研究是生态系统与全球变化科学研究的前沿科学领域,随着研究生态系统碳-氮-水循环的各个界面通量观测技术的进步以及科学数据的积累,该领域必将成为生态系统生态学的研究热点。

生态系统碳-氮-水耦合循环是由一系列链环式的生物过程所调控,生物系统对环境变化的适应机制直接决定着碳-氮-水耦合循环的环境响应特征。可是迄今为止,关于生态系统中的生物系统的研究还很少,尤其是土壤生物(根系、微生物)对陆地生态

系统碳-氮-水耦合循环过程的调控机制及其对全球变化的响应与适应机制。开展植物叶片冠层调控生源要素交换的机制和环境适应性、根系冠层对碳氮水耦合循环过程机制的控制作用及其环境适应性、土壤微生物功能群网络对碳氮耦合循环的调控机制等都将作为重要研究方向。需要通过这方面的研究工作解决以下几个关键科学问题,进而揭示生态系统主要生源要素的计量平衡关系及其与生态系统生产力、固碳潜力和速率之间的理论联系。

(1) 根系冠层系统的结构特征及其功能;根冠系统中养分吸收与水分吸收之间的耦合关系如何;根冠系统对营养物质的选择吸收及其调控机制;根际微生物在养分吸收中的作用。

(2) 不同植被类型下典型植物根系数量、结构和周转特征;植物根系对不同氮素形态的吸收特征、植物根系养分吸收与水分吸收之间的耦合关系等如何量化。

(3) 温室气体排放跷跷板效应的微生物控制机理;微生物功能群落相互作用的网络关系;凋落物、根系分泌物和土壤有机质矿化作用对植物吸收土壤养分有效性的影响;不同生态系统中特征微生物功能群落空间分布格局。

6 结语

陆地生态系统碳收支及其循环过程研究与气候变化的关系密切,开展相关领域的研究对于提升中国地球系统科学与全球变化科学的科技创新能力、提高中国参与应对全球气候变化国际行动和维护国家利益的话语权、改进中国生态系统管理和保障生态安全都具有十分重要的意义。

近年来中国已经在气候变化与陆地生态系统碳循环研究领域方面开展了大量的研究工作,包括联网观测、联网实验、模型模拟等,同时也资助了一批国家级的科研项目。但是,由于尚缺乏国家尺度各类生态系统碳收支的实际调查数据、国家尺度碳收支相关数据的整合、用于碳收支计量和综合评估的模型工具,以及尚未形成国家层次的碳汇评估、认证和决策分析信息系统平台,因此,目前还难以作为中国应对气候变化与碳减排的国际谈判提供有力的支撑。

当前中国生态系统碳收支研究工作的重点是利用生态学区域普查和生态系统网络的多尺度长

期联网观测和实验,生态过程研究与模型-数据的跨尺度融合,以及多尺度、多过程、多学科、多途径的综合集成分析等手段,准确评估中国森林、灌丛、草地、农田和湿地等生态系统的固碳现状、速率、潜力,客观评价陆地固碳增汇潜力、现实固碳潜力、近期内可实现的固碳潜力以及相应的固碳速率及其在全球碳收支中的意义,为发展中国陆地生态系统碳收支计量/认证的方法论体系、开发碳收支评价的生态过程-遥感模拟分析技术体系、建立碳管理技术和工程碳汇效应的测量/报告/验证系统提供理论依据。

区域生态系统碳收支及其循环过程机制是一个非常复杂的问题,需要开展长期的综合性科学研究,中国今后的科学研究规划需要在重视陆地生态系统碳收支的定量评价和增汇潜力的认证综合研究、降低碳收支评估不确定性的基础上,积极开展陆地生态系统碳-氮-磷生态化学计量学特征及其耦合机制和环境影响,生态系统碳-氮-水循环过程耦合关系及其对全球气候变化的响应与适应,陆地生态系统碳-氮-水耦合循环过程的生物调控机制及其对环境变化适应性等研究领域的前瞻布局,为国家的生态系统与温室气体管理提供基础理论、科学知识和先进技术的储备。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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] 曾宁.气候变化:中国的困境、机遇和对策.气候变化研究进展,2009,5(3): 163-166.
- [6] 潘家华,郑艳.温室气体减排途径及其社会经济含义.环境保护,2008(2): 18-22.
- [7] 于贵瑞,牛栋,王秋风.《联合国气候变化框架公约》谈判中的焦点问题.资源科学,2001,23(6): 10-16.
- [8] 国家发展和改革委员会.中国应对气候变化的政策与行动:2009年度报告.北京:国家发展和改革委员会,2009.

- [9] 马爱民. 气候变化的影响与我国的对策措施. 中国科技投资, 2009(7): 20-23.
- [10] 刘纪远, 庄大方, 张增祥, 等. 中国土地利用时空数据平台建设及其支持下的相关研究. 地球信息科学, 2002, 4(3): 3-7.
- [11] 国家林业局. 全国森林资源统计 1999-2003. 北京: 国家林业局, 2005.
- [12] 中国科学院自然资源综合考察委员会. 中国草地资源数据. 北京: 中国农业科技出版社, 1994.
- [13] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查数据. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [14] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中华人民共和国植被图 1:1000000. 北京: 地质出版社, 2007.
- [15] 于贵瑞, 何洪林, 刘新安, 等. 中国陆地生态系统空间化信息研究图集: 气候要素分卷. 北京: 气象出版社, 2004.
- [16] Fu B J, Li S G, Yu X B, et al. Chinese ecosystem research network: Progress and perspectives. *Ecological Complexity*, 2010, 7(2): 225-233.
- [17] 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.
- [18] 傅伯杰, 牛栋, 于贵瑞. 生态系统观测研究网络在地球系统科学中的作用. *地理科学进展*, 2007, 26(1): 1-16.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Tao B, Li K R, Shao X M, et al. The temporal and spatial patterns of terrestrial net primary productivity in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(2): 163-171.
- [23] 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(52): 241-251.
- [24] Ji J J. A climate-vegetation interaction model: Simulating physical and biological process at the surface. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(4): 445-451.
- [25] 黄玫, 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 张小全, 侯振宏. 森林、造林、再造林和毁林的定义与碳计量问题. *林业科学*, 2003, 39(2): 145-152.
- [29] 陈健, 朱德海, 徐泽鸿, 张志华. 全国森林碳汇监测和计量体系的初步研究. *生态经济*, 2008(5): 128-132.
- [30] 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.
- [31] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme//Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. Japan: IGES, 2006.
- [32] 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.
- [33] 任伟, 王秋风, 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.
- [34] 于贵瑞, 王秋风, 于振良. 陆地生态系统水-碳耦合循环与过程管理研究. *地球科学进展*, 2004, 19(5): 831-839.
- [35] 丁仲礼, 傅伯杰, 韩兴国, 等. 中国科学院“应对气候变化国际谈判的关键科学问题”项目群简介. *中国科学院院刊*, 2009, 24(1): 8-17.
- [36] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [37] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [38] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 逼近从个体到生态系统的统一理论. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 2-6.
- [39] Han W, Fang J Y, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [40] He J S, Fang J Y, Wang Z H, et al. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China. *Oecologia*, 2006, 149(1): 115-122.
- [41] He J S, Wang L, Flynn D F B, et al. Leaf nitrogen: phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes. *Oecologia*, 2008, 155(2): 301-310.
- [42] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学研究. *环境科学*, 2007, 28(12): 2665-2667.
- [43] Zheng S X, Shangguan Z P. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China. *Trees*, 2007, 21(3): 357-370.

- [44] Zhang L X, Bai Y F, Han X G. Differential responses of N:P stoichiometry of *Leymus chinensis* and *Carex korshinskyi* to N additions in a steppe ecosystem in Nei Mongol. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(3): 259-270.
- [45] 高三平, 李俊祥, 徐明策, 等. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片 N、P 化学计量学特征. *生态学报*, 2007, 27(3): 947-952.
- [46] 于贵瑞, 方华军, 伏玉玲, 等. 区域尺度陆地生态系统收支及其循环过程研究进展. *生态学报*, 2011, 31(19): 5449-5459.

Demands and Key Scientific Issues in the Synthesis Research on Regional Terrestrial Ecosystem Carbon Budget in China

WANG Qiufeng¹, LIU Yinghui², HE Nianpeng¹, FANG Huajun¹, FU Yuling¹, 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. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Process mechanisms of carbon budget and carbon cycle in terrestrial ecosystems are the research hot-spots in analyzing the causes of global climate change, forecasting the climate change trend, and making mitigation and adaptation countermeasures, which have attracted broad attention from the scientific community and international community. In this paper, we review the history of the research on the carbon budget and carbon cycle process in Chinese terrestrial ecosystems; summarize the main characteristics of each development stage. Based on the review, we discuss the demands for carrying out the synthesis research on regional terrestrial ecosystem carbon budget in China from the aspects of science and technology and society, bring forward the main existing problems, and explore the key scientific issues in related fields. The paper analyzes the importance for carrying out the synthesis research on regional terrestrial ecosystem carbon budget in China from various aspects such as socio-economic development, ecosystem management, and eco-security as well. Simultaneously, the paper points out that, in China, we are still lack of practical investigation data of carbon budget for various ecosystem types, lack of data integration at national scale, lack of modelling tools that can be used in carbon accounting and assessment, and no information system platform has been developed for national carbon source/sink accounting, assessment, authorization and decision making. Through the above analysis, we think that, in order to enhance the innovation capacity in the area of ecosystem and global change in China, to provide fundamental theory and advanced technology for national ecosystem and greenhouse gases management, more emphasis should be placed on the following frontier fields, such as the coupling relationships among carbon-nitrogen-water cycles in terrestrial ecosystems and their response and adaptation to global climate change, ecological stoichiometry characteristics of carbon-nitrogen-phosphorus and their environmental impact, and the biological regulation mechanisms of the processes of carbon-nitrogen-water coupling cycles as well.

Key words: carbon cycle and carbon budget; carbon sink function; carbon-nitrogen-water coupling cycles; sink enhancement technology and potential; terrestrial ecosystem; China

本文引用格式:

王秋凤, 刘颖慧, 何念鹏, 等. 中国区域陆地生态系统碳收支综合研究的科技需求与重要科学问题. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 78-87.