

于贵瑞,方华军,伏玉玲,王秋凤. 区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展. 生态学报 2011, 31(19): 5449-5459.

Yu G R, Fang H J, Fu Y L, Wang Q F. Research on carbon budget and carbon cycle of terrestrial ecosystems in regional scale: a review. Acta Ecologica Sinica 2011, 31(19): 5449-5459.

区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展

于贵瑞^{*}, 方华军, 伏玉玲, 王秋凤

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:地球系统的碳库和碳循环过程变化是影响气候系统的重要因素,而陆地生态系统的碳收支及其循环过程机制研究一直是全球气候变化成因分析、变化趋势预测、减缓和适应对策分析领域的科学研究热点。回顾了过去几十年区域尺度陆地生态系统碳循环和碳收支研究领域的国际前沿及其关键科学问题,并分析了我国在该研究领域的科技需求和发展方向。当前国际科学研究的热点和前沿领域主要包括:生态系统和区域碳储量和碳收支的清查、综合计量与碳汇认证,陆地生态系统碳通量的联网观测及其循环过程机制,陆地生态系统碳循环过程对气候变化响应野外控制试验,陆地生态系统水、碳、氮循环及其耦合关系机制和模拟模型研究等,同时指出在这些研究领域依然存在且急需解决的关键科学问题。我国近期的科技工作重点应该是努力构建天-地-空一体化的碳储量和碳收支动态监测体系、开展生态系统碳-氮-水耦合循环及其区域调控管理的前瞻性研究,定量评价中国生态系统的碳收支状况和增汇潜力,评估各种典型生态系统增汇技术的经济效益,为国家尺度的温室气体管理和碳交易机制与政策体系的建立提供可报告、可度量 and 可核查的科学数据和技术支持。

关键词:陆地生态系统碳循环; 碳收支; 响应与适应; 碳-氮-水耦合作用

Research on carbon budget and carbon cycle of terrestrial ecosystems in regional scale: a review

YU Guirui^{*}, FANG Huajun, FU Yuling, WANG Qiufeng

Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Changes of carbon pools and carbon cycles in the earth system are important factors affecting the climate system, and the mechanism of carbon budget and carbon cycle of terrestrial ecosystems is the research focus in the field of global climate change cause, trend forecasting, mitigation and adaptation countermeasure. This paper focuses on reviewing the research frontiers of regional carbon cycle and carbon budget of terrestrial ecosystems and its key scientific issues in the past few decades, and analyzing the technical requirements and development in this research field. Presently, the frontier areas and focus of research include inventory of ecosystems and regional carbon storage and their budget, a comprehensive measurement and certification of carbon sinks, network observation of carbon fluxes in terrestrial ecosystems and its driving mechanisms, controlled experiments on the responses and adaption of terrestrial ecosystems carbon cycle to climate change, and the coupling cycles of water, carbon, nitrogen processes in terrestrial ecosystem and model simulation. Simultaneously, some key scientific issues need to be resolved in this research field was suggested. In China, recent research should focus on building the three-dimensional monitoring system of integrated carbon storage and carbon budget, prospectively researching ecosystem carbon-nitrogen-water coupling cycle and its regulation, quantitatively evaluating the carbon budget and potential carbon sink of Chinese terrestrial ecosystems, and assessing the economic benefits of typical increasing carbon sink technology. These can provide reports, measurable and verifiable scientific data and technical support for greenhouse

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833504); 国家自然科学基金资助(41071166, 31070435)

收稿日期:2011-07-06; 修订日期:2011-08-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yugr@igsrr.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

gas management, carbon trading scheme and policy system build.

Key Words: terrestrial ecosystem carbon cycle; carbon budget; response and adaptation; carbon-nitrogen-water coupling

自从工业革命以来,由于化石燃料的燃烧、水泥生产以及土地利用方式的改变等人类活动,使原本已被封存于岩石圈和陆地生态系统中的有机和无机碳被活化,又重新参与到地球系统的碳循环之中,导致大气中CO₂等温室气体浓度不断升高、大气层的温室效应不断增强^[1]。相应地,全球气温和海温的升高会导致极地和高山的大范围积雪和冰川融化、全球海平面上升,威胁着人类社会的可持续发展^[1]。

全球碳循环与气候变化的关系密切,使得地球系统的碳库变化和碳循环过程机制问题成为气候变化成因分析、变化趋势预测、减缓和适应对策等全球变化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^[2]。目前,科学家们已大致掌握了全球各个碳库(大气、海洋、土壤、植被)的大小以及各库之间碳流动(化石燃料燃烧排放、海洋吸收、植被光合、生态系统呼吸等)的基本状况^[1]。然而,由于各个碳库之间的正负反馈过程十分复杂,所以在揭示陆地生态系统碳循环过程机制及其在全球气候变化中的作用等方面还面临着各种挑战,还需要深入地定量评估各种类型生态系统的碳库储量及其变化过程、生态系统的碳源/汇强度及其时空变化规律、以及生态系统管理对碳循环过程的影响等科学问题^[3]。

本文将重点评述该研究领域的国际前沿及其关键科学问题,并分析了我国陆地生态系统碳收支及其循环过程研究的科技需求和发展方向,为我国在该领域的科学研究工作、以及国家层次的碳收支评估和温室气体管理工作提供有价值的信息。

1 区域尺度生态系统碳储量和碳收支的清查与综合计量研究

植物生物量和土壤碳储量清单调查、生态系统碳通量观测、卫星遥感、大气CO₂浓度反演以及生态系统模型等均被广泛应用于生态系统、区域和全球等不同尺度生态系统碳收支计量方法学的研究之中。由于每种技术和研究方法均存在其适宜的时间和空间尺度,各自也具有其明显的优势和劣势,因此采用各种方法对不同空间和时间尺度的陆地生态系统碳收支评估结果存在较大的差异。

1.1 生态系统碳储量和碳收支的生态清查

生态系统碳储量和碳收支的生态清查法主要是依托各国的资源清查数据,研制合理的数据转换和统计方法来评估生态系统碳储量的空间分布和历史变化。在国家尺度上 Kern^[4]、Bemoux 等^[5]、Schwartz 等^[6]、Krogh 等^[7]、Chaplot 等^[8]等分别估算了美国、巴西、刚果、丹麦和老挝等国的土壤碳储量。同时,方精云等^[9]、王绍强等^[10]、Wu 等^[11]、于东升等^[12]、Xie 等^[13]等分别利用全国土壤普查的资料,计算并分析了全国土壤有机碳储量的空间格局与历史变化。由于收集的土壤剖面数目和采用的统计方法不同,得出的全国土壤碳储量数量不尽一致。区域尺度上的土壤有机碳储量估算较多,包括欧洲中部和东部、非洲中部和青藏高原等地区^[14-16]。关于地上碳储量方面, Fang 等^[17]以国家森林清查资源为基础,通过生物量转换因子法将森林的材积量转化为森林地上生物量和碳储量; Fan 等^[18]也利用国家草地资源清查资、以及草地地上和地下生物量数据,估算了我国草地生态系统碳储量。

生态清查法的优点是直接、明确、技术简单,但是生态清查方法通常需要几年到数十年的数据积累,才可能反映出生态系统的植物和土壤碳含量的微量变化。此外,由于人力、物力、设备和技术等方面的限制,全国大规模的资源清查所获取的部分数据精度难以达到碳收支评估的需求,如何利用多源数据同化方法去伪存真,提高数据的可比性都是必须解决的关键技术问题^[19]。

1.2 生态系统碳储量和碳收支定位观测

传统的生态系统碳储量和碳收支定位观测主要是以生态系统定位研究站为依托,对群落生物量、叶面积指数、生物群落结构和功能,土壤和大气变化开展动态的精细观测。研究基于定位观测的生物量变化,采用现存量法统计出生态系统的年净初级生产力(NPP)^[20]。近30a来,以涡度相关法为主要技术的生态系统碳通

量观测弥补了以前生物量清查法、传统的定位观测和卫星遥感等观测技术在时间上的不连续性、积累数据耗时等方面的缺点,能够在较短的时间内获得高时间分辨率的 CO₂ 通量和气象环境变化数据,为典型生态系统碳收支的动态计量提供了大量可靠的数据,有助于开展不同时间尺度上的碳通量变化及其环境响应机理研究^[21]。

涡度相关技术能够非干扰连续测定不同生态系统大气与群落间 CO₂ 和水热通量,在生态系统尺度上更为有效地揭示陆地生物圈-大气圈相互作用关系^[22],成为全球生态系统碳储量和碳收支的主要观测手段^[21]。目前,在国际通量观测网络(FLUXNET)注册的通量观测站点已有 524 个,分布在南纬 30°到北纬 70°之间的热带到寒带的各种植被区(图 1)。通过多站点或单点多塔的联网碳通量观测为评价陆地生态系统碳收支的时空格局、全面而深入地研究陆地生态系统碳循环和水循环、生态系统水碳过程对全球变化的适应性等方面的研究提供了可靠的全球范围的实测数据。例如,已经研究证实分布在北美、欧洲及亚洲中高纬度的森林生态系统是重要的碳汇^[23];大多数温带草地生态系统已达到碳平衡状态,碳源汇转变与极端气候密切相关^[24-25]。区域或景观尺度,通量网络观测研究可以揭示复杂地形条件、林龄、生物多样性和土地利用管理以及自然或人为干扰对生态系统碳循环的影响;在生物区系、洲际或全球的尺度,结合遥感信息可以揭示碳通量与突发、异常事件(厄尔尼诺/拉尼娜、火山爆发、火灾、热浪等)之间的内在联系^[23, 26-28]。但是,涡度相关技术仍是一种小尺度的生态系统观测方法,在观测结果的应用过程中仍存在多源数据整合、复杂地形的通量观测技术及尺度转换等 3 个方面的关键理论和技术问题尚待突破^[29]。

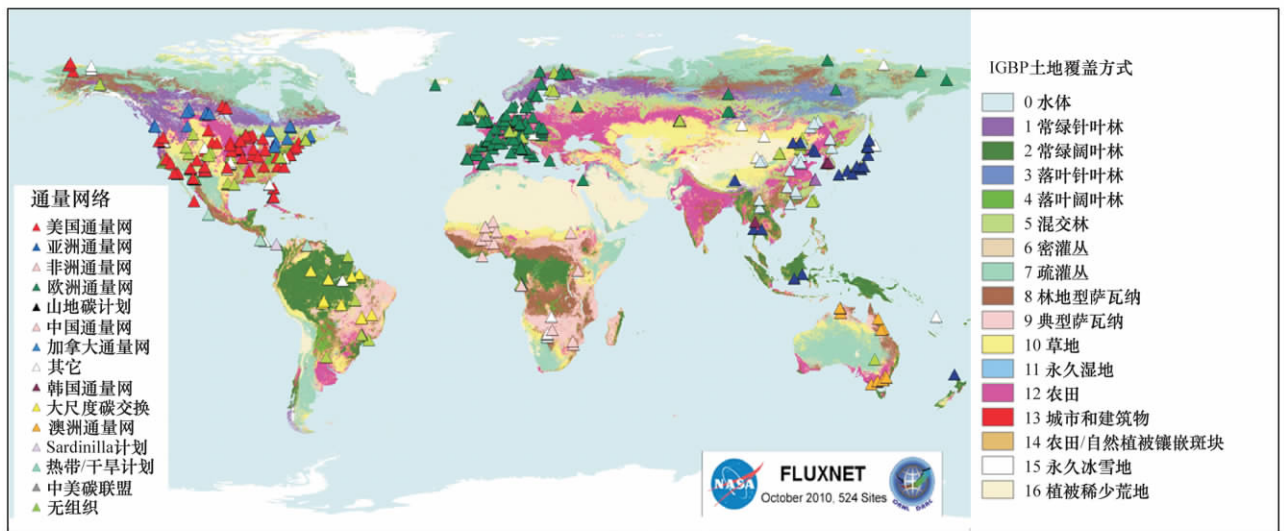


图 1 基于 IGBP 土地分类的国际通量观测网络站点分布

Fig. 1 The distribution of sites in the international flux measurement network based on IGBP land classification

1.3 生态系统碳储量和碳收支的卫星遥感观测

卫星遥感技术能够在瞬时获得大面积连续分布的大气与地表数据,其数据具有区域连续分布,信息综合定量的特点。现有的多种卫星组合可以提供不同空间尺度像元分辨率的地面数据。利用卫星观测可以获取地表覆盖类型(生态类型)、生物量、LAI、VI、覆盖度、叶绿素、含氮量、叶片含水量等多种植被冠层参数;可以获取 PAR、反照率、净辐射、地表温度、冠层温度、土壤温度、最高和最低气温、空气动力学温度、水汽压差、辐射、水热参数等物理参数,还可以获取地形高程、坡度、坡向、地表粗糙度、土壤持水量和土壤含水量等立地条件参数。利用遥感产品和地上植被清查数据来估算区域和全球尺度碳储量的变化趋势^[16-17, 30]。例如, Piao 等^[30]利用实测点($n=34$)与从 NOAA-AVHRR 遥感影像提取的归一化植被指数(NDVI)建立经验回归方程,并假设地上/地下生物量比值为常数,随后将实测调查点通过尺度上推来估算区域和全国灌丛碳储量格局。最近美国和日本已经开始利用卫星观测技术测量大气的气溶胶、温室气体浓度、污染气体等研究,为及时评估

区域和全球尺度碳收支状况提供技术支撑。根据“呼吸号”探测卫星发布的大气 CO₂ 浓度初步观测数据,发现我国是当前全球最大的排放区(图 2),这将导致我国在国际外交谈判中面临极大的减排压力。为了验证国际社会对我国碳收支的估算结果,揭示我国陆地生态系统碳汇潜力及实施策略,以遥感技术为基础,结合地面监测和生态模型构建区域碳收支评估系统为国家乃至全球提供快速、精确的碳收支信息是当前我国急待实现的重要任务。

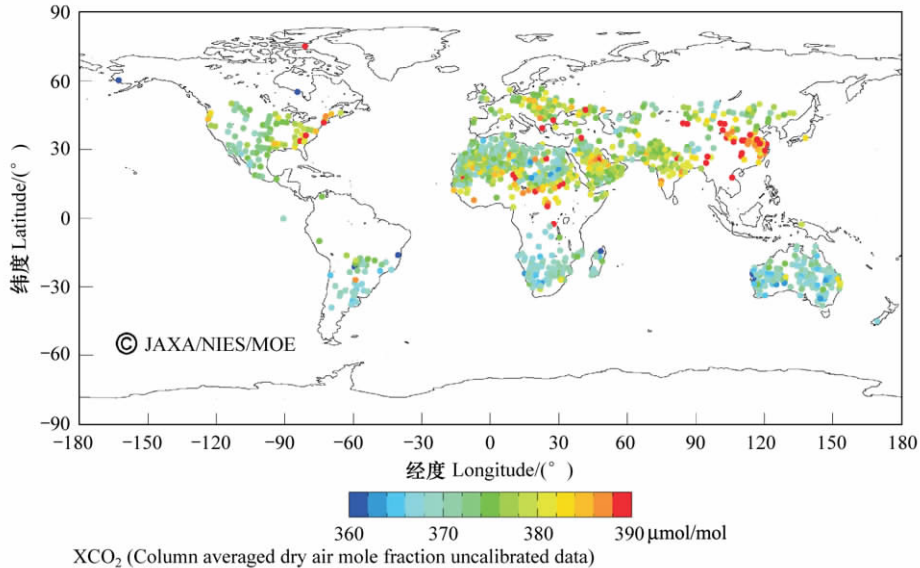


图 2 “呼吸号”探测卫星公布的 2009 年全球大气 CO₂ 浓度空间分布特征

Fig. 2 The global pattern of atmospheric CO₂ concentration detected by the satellite “Respiration” in 2009

1.4 区域尺度陆地生态系统碳收支的定量认证与调控管理

区域尺度陆地生态系统碳收支计量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进行计量学的统计和综合评估。而碳汇认证则是按照京都碳汇的定义和技术规则对可计量的生态系统净碳吸收量进行认证,被认证的碳汇才可以按照《京都议定书》的规则用于各国或地区的减排目标核算之中。目前被广泛应用的技术途径包括:基于生物量和土壤碳储量清单调查的区域碳收支评估,基于生态系统通量观测结果的区域碳收支评估,利用大气 CO₂ 浓度观测数据反演的区域碳收支评估,基于温室气体观测卫星和航空观测的碳收支评估,基于遥感模型的区域碳收支评估,基于模型-数据融合技术的碳收支评估等理论和方法。可是,由于每种研究方法均存在明显的优势和缺点,导致不同时空尺度陆地碳源汇评估结果具有很大的不确定性。

2 陆地生态系统碳循环过程对气候变化的响应与适应性研究

2.1 陆地生态系统碳循环过程对气候变化的响应与适应实验研究网络

野外控制实验是研究现在以及未来全球变化情景下生态系统物质循环和能量交换过程及其生态系统功能变化的控制机制,辨别生态系统变化关键驱动因子的重要手段,在发展和验证生态系统模型方面发挥着重要作用^[31]。针对气温升高、降水量和降水频率变化、大气 CO₂ 浓度升高、氮沉降增加等气候和环境变化,生态学家们相应地布置了土壤和冠层的增温实验、冠层穿透降水转移和降水脉冲实验、自由大气 CO₂ 富集实验以及模拟氮沉降的养分添加实验等。研究对象主要集中在生态系统碳、氮、水及其它养分循环和能量流动,生物多样性变化及生态系统结构和功能的动态变化机制。控制实验从单因素逐渐向多因子交互作用过渡,并与自然环境梯度或陆地生态系统样带方法相结合。研究的空间尺度包括植物叶片、个体、生态系统及区域,研究的时间尺度从秒、日、月、年拓展到几十年。目前已形成全球陆地生态系统对气候变化响应和适应的野外控制实验研究网络,各种气候与环境变化实验站点多达 144 个,大多数分布在欧洲和北美洲(图 3)。

2.2 陆地生态系统碳循环过程对温度升高的响应与适应

温度升高对生态系统碳循环过程的影响主要表现在植物物候期变化、光合作用、呼吸、土壤水分动态和蒸散的变化^[32-34]。气候变暖通常会提高生态系统的生产力、延长生长季,进而增加陆地生态系统的植被碳库^[35]。另一方面,气候变暖也会增加植物自养呼吸和土壤呼吸速率^[36]或加重土壤干旱^[37-38],这些都可能导致生态系统固碳能力的降低。但也有研究表明,随着时间的推移,气候变暖会导致呼吸增加趋于减弱,潜在地产生了适应^[32,39-40]。

气候变暖或温度升高通常同时改变碳的输入和碳的驻留时间来影响整个生态系统的碳平衡和碳固定,包括以下3种观点:①增温产生水分胁迫,抑制植物生长,并加速生态系统呼吸,促进碳排放^[34];②增温促进养分矿化和增加生态系统氮输入,植物生长加快,增加碳吸收^[35,41];③如果生态系统光合碳输入和呼吸、淋溶等碳输出的速率大致相当,则整个生态系统碳收支基本处于平衡状态^[42]。总体而言,不同纬度地带的土壤对气候变暖的响应不同,一般引起高纬度富碳地区土壤碳流失,尤其在在北方森林和苔原地区,而中低纬度地区的土壤碳库则可能不变或略有增加^[3]。通过多年的增温实验和模型模拟研究,现在生态学家们更加关注以下几个方面:(1)陆地生态系统对气候变暖的负反馈机制,如土壤呼吸对增温的适应性^[32]、非对称增温过程中光合作用的过补偿作用^[43]。(2)区域生态系统土壤呼吸对增温响应的温度敏感性(Q_{10})空间格局和影响机理^[44]。(3)气候变暖对生物多样性和生态系统功能的影响及其机理^[45]。

2.3 陆地生态系统碳循环过程对降水变化的响应与适应

降水变化包括降水量、降雨频度、降雨强度以及降雨季节分配等方面。降水变化改变生态系统的结构、功能与过程^[46-48],进而影响区域尺度的碳平衡^[28,48]。增加降水一般促进生态系统碳吸收,同时增加分解速率(即降低碳的驻留时间)^[49]。例如,欧洲和中国东部森林生态系统净初级生产力(NPP)随年降水量的增加而增加^[50-51]。相反,季节性干旱能够导致生态系统碳吸收能力下降^[28,48]。除降水量外,降水频率和强度也影响生态系统碳过程和碳平衡。降水变率增加降低土壤呼吸和地上NPP^[46,52]。降水强度也影响物种组成,土壤发育,养分有效性和其它过程,这些因素又间接地影响生态系统碳过程^[47]。

2.4 陆地生态系统碳循环过程对CO₂浓度富集的响应与适应

大气CO₂浓度升高一般使植物的光合作用增强、叶片气孔导度降低、蒸腾速率减小和水分利用效率提高,从而对植物碳固定具有正反馈效应^[53-54]。大气CO₂浓度富集促进植物生物量生长的同时,还可能增加土壤碳储量^[55]。但也有研究指出,CO₂浓度富集瞬间增加光合碳输入通量是根据一个不变的函数估计的,随着时间的推移,其促进效应迅速下降^[55]。而且,CO₂浓度富集在促进光合作用的同时,或者使土壤微生物呼吸增强,或者因叶面积指数提高增加蒸腾,降低土壤含水量,进而降低其光合过程的促进作用,形成了对碳固定的负反馈效应^[56]。另外,CO₂浓度升高的施肥效应往往受到土壤水分(如干旱)、养分(尤其是氮含量)和温度条件的强烈限制^[57-59]。

2.5 陆地生态系统碳循环过程对大气氮沉降输入的响应与适应

一般而言,陆地生态系统生产力受到氮素供应的限制,因此一定的氮素输入会影响陆地生态系统的碳固定。目前有关氮沉降对陆地碳汇的影响存在严重分歧,包括:①氮沉降显著促进南美热带雨林和北方沼泽土壤碳释放^[60-61];②沉降氮主要持留在土壤库中,进入植被库的氮量较少,对森林生态系统碳固定的影响不大,取决于土壤的氮饱和状态^[61-63];③氮沉降对欧洲森林固碳贡献巨大,有明显的增汇作用,对生态系统氮饱和现象提出质疑^[64]。

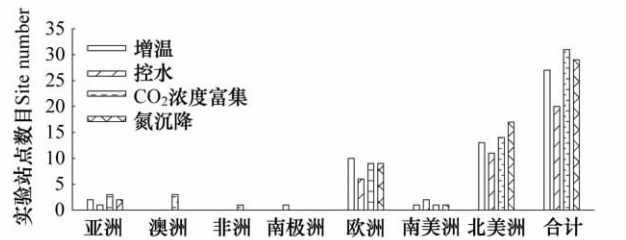


图3 全球陆地生态系统对气候变化响应和适应控制实验研究网络分布

Fig. 3 The distribution of controlled experimental research network on the response and adaptation of global terrestrial ecosystems to climate change

大气氮沉降或施氮对陆地生态系统和土壤碳循环关键过程(NEE、GPP、Re、Rs 和 CH_4 通量)的影响迥异,反映了生态系统碳氮过程在不同氮素状态下发生耦合和解耦现象,具体机制概括为:①生态系统碳分配的不确定性,氮沉降或施氮一般刺激碳输入,导致植物碳储量增加^[65],但是否能够净增加土壤碳储量存在严重分歧^[66]。②氮素输入对生态系统碳固定的潜力取决于生态系统 NPP 和生态系统呼吸(ER)对氮素输入的响应程度^[67]。③氮素输入引起物种组成和内部环境条件的变化。氮沉降增加显著降低生态系统物种组成和多样性,进而影响整个生态系统的生产力^[68-69]。④其它环境因子(如磷限制)也会干扰氮素对生态系统碳固定的影响。氮输入可能导致土壤酸化或使生态系统朝磷限制或水分可利用性限制的方向发展,生态系统碳固定能力下降^[70]。

2.6 陆地生态系统碳循环过程对多种因子的响应与适应

生态系统对气候变化的响应和适应的环境控制实验研究需更多地关注多因子交叉实验、以及更长时间尺度多因子协同作用的响应机制^[71]。未来的发展趋势表现为,由单点实验向多站点联网试验、由单因素控制实验向多因素控制实验发展,所关注的科学问题也由研究温度升高、 CO_2 浓度变化、降水、大气氮沉降等单一要素变化对生态系统过程的影响转向关注多种环境要素间的协同作用,多种生态过程的耦合关系等方面^[3]。例如,在 CO_2 浓度升高的实验中同时考虑温度升高效应, CO_2 升高与生态系统渐近式氮素限制作用, CO_2 与 O_3 之间的交互作用等关键科学问题。Zavaleta 等^[72]研究了 CO_2 浓度富集、增温、降水变化和氮沉降增加对 California 1 年生草地生物多样性的影响,发现 CO_2 浓度富集和氮沉降增加,降水增加、增温分别降低、增加和不改变植物多样性。

虽然理论上多因子实验有利于理解陆地生态系统对环境变化的适应性和缓解作用,多因子交互作用也有助于提醒我们未来变化是不确定的。但是,多因子控制实验也存在许多不足,例如运行费用十分昂贵,难以约束多个假设,结果通常难以解释,概念上容易混乱等等科学问题,最终导致其在全球范围内无法广泛开展。

3 陆地生态系统碳、氮、水耦合循环过程及其相互作用关系

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,全球四大“联合研究计划”(全球碳计划(GCP)、全球水系统计划(GWSP)、全球环境变化与食物系统(GECAFS)和全球环境变化与人类健康(GECHH))均将碳、氮、水循环及其与全球气候变化的相互关系作为研究重点。为了简化问题或便于操作,过去研究常假定碳、氮、水循环间相对独立,研究每个循环的过程和机理。然而,自然界中的碳、氮和水循环不仅存在生物的、化学的和物理的耦合关系(图4),在生态系统各个库内、库与库之间的物质交换过程中也存在相对稳定的平衡关系。近年来,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。

3.1 生态系统碳-氮循环相互作用关系及其耦合机制

碳和氮生源元素都是生物有机体的重要组成部分,各组成成分之间碳、氮含量具有相对稳定的化学计量关系^[73]。据统计,植被地上生物量的 C:N 约为 35:1,土壤有机质的 C:N 约为 14:1,凋落物中的 C:N 约为 46:1^[74-75]。生物圈和大气之间的碳、氮交换过程主要是通过植物和微生物的碳、氮代谢过程耦合在一起的。植物体内碳和氮的比例关系一定程度上反映了植物的养分利用效率,其大小影响植物的碳固定、累积与养分吸收、植物凋落物与土壤有机物的分解,进而决定生态系统中碳、氮的利用、贮存和转移。因此,生态系统碳贮量和碳通量在很大程度上受到生态系统氮循环的影响和限制^[64]。大量研究已证明生态系统各个库的 C:N 比值具有相对的稳定性,甚至生态系统碳氮通量也会存在数据上的平衡关系;基于 C:N 计量化学及其内稳定机制,可以推测生态系统各个库的碳氮储量^[73,76]。这些推论在生态系统水平还未得到野外实验的证明,因此,生态系统水平 C:N 的保守性与变异性机制将是生态系统碳氮耦合循环研究的科学问题。

3.2 生态系统水-碳循环的相互作用关系及其耦合机制

碳循环和水循环是生物地球化学循环的两大基本过程,是当前全球变化研究的热点。在陆地生态系统中,在植物的光合-蒸腾等生理生态作用下,碳循环和水循环具有密切的耦合作用。在陆地生态系统的土壤-

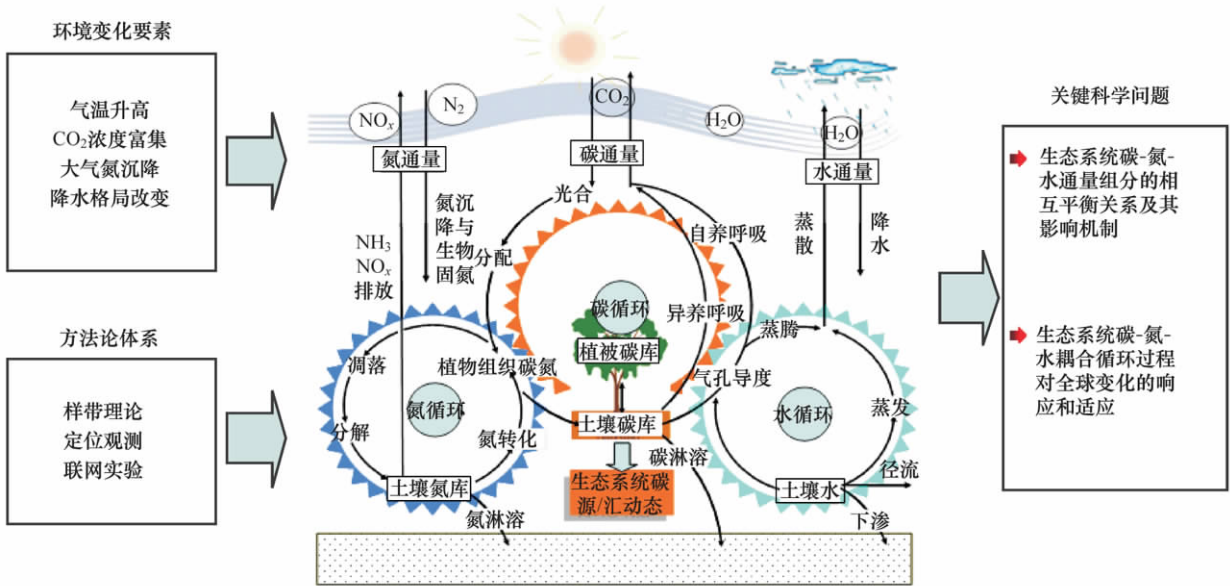


图 4 全球变化背景下的碳-氮-水耦合循环

Fig. 4 The carbon-nitrogen-water coupling cycles in the context of global changes

植被-大气连续体(SPAC) 中, 碳循环和水循环可以在土壤-植被、植被-大气、土壤-大气和植物体内 4 个节点上发生交换和耦合^[73]。其中, 以气孔行为控制为主导的植被-大气 CO₂ 和水汽交换和耦合作用, 是陆地生态系统碳、水耦合中最重要的生物学控制过程^[77]。在当前对碳、水问题和碳-水循环耦合关系还缺乏系统研究的情况下, 以 WUE 作为切入点, 对陆地生态系统的碳-水耦合关系进行研究, 是探讨碳-水耦合的基本过程与机理的重要途径。例如, Yu 等^[78]发现温带针阔混交林 GPP 和 ET 之间为直线关系, 而亚热带人工林和混交林为指数增长关系, 分别表现出碳水过程耦合和解耦现象。进一步研究发现季节性的环境变化对 GPP 和 ET 的驱动作用的差异是导致 WUE 的保守性和变异性的主要原因^[78]。

3.3 陆地生态系统主要生源要素计量平衡关系及其对全球变化的响应和适应

陆地生态系统不同层次(分子、细胞、个体、种群、群落、景观) 都是不同元素按照一定的比例组成, 其主要生源要素(C, N, P) 在不同器官和物质流动过程具有相对平衡的关系。化学计量生态学是研究生态过程和生态作用中化学元素平衡的科学, 它能够从元素比率的角度把这些不同层次的研究结果统一起来, 已成为生态学研究的有效工具和热点^[73]。自 20 世纪 90 年代以来, 以 Robert Sterner 和 James Elser 为代表的科学家将化学计量学应用于陆地生态系统食物网营养循环、资源竞争、生物进化和演替等各个不同的生态学领域^[73]。进入 21 世纪以来, 全球变化增加了陆地生态系统研究的不确定性, 将化学计量生态学的观点和技术手段引入陆地生态系统研究, 有利于阐明碳-氮-水的耦合循环。例如, 如何判断不同尺度生态系统 N、P 限制, 不仅对提高生产力具有重要意义, 还对预测全球变化对陆地生态系统的影响提供了理论依据^[79]。

当前, 化学计量生态学的研究主要包括: 1) 不同时空尺度/不同生态系统动物、植物(或叶片) C : N : P 比率的内稳性和变异性; 2) 不同生态系统植物、动物生长率与 N、P 含量与比率的关系, 即生长率假说; 3) 大尺度 C : N : P 化学计量模式及其空间分布格局; 4) 基于大尺度的数据, 采用 C : N : P 化学计量生态学的方法, 研究区域或全球养分限制状况。就陆地生态系统研究而言, 化学计量生态学将更多地用于研究和预测陆地生态系统对全球变化的响应和适应。其中应包括: 1) 不同陆地生态系统碳-氮-磷计量化学平衡是否具有普适的稳定性及其形成机制; 2) 化学计量平衡对自然演替和各种干扰的响应; 3) 从碳汇角度, 采用化学计量生态学的方法, 分析不同类型、不同区域生态系统碳固持的限制因子和碳固持潜力; 4) 基于生态系统水平碳-氮-磷化学计量平衡的研究, 探讨陆地生态系统对全球变化(CO₂ 浓度升高、温度上升、N 沉降和外源 P 素增加、降水格局变化等) 的响应和适应。

4 结语

全球环境变化和人类活动已经并且正在深刻地改变着生态系统的格局和过程。一方面,全球变化对陆地生态系统过程、结构和功能产生显著影响,同时生态系统中的生物要素及其生态学过程会对外部环境变化会产生不同的反馈和适应现象。在过去几十年内,生态学家们已在全球变化和生态系统碳循环领域已经开展了大量研究,在生态系统碳库/碳储量、生态系统碳循环过程和碳收支格局、生态系统变化的动态、联网观测和试验研究、生态系统过程模拟和尺度转换等研究方面取得了显著进展;但是由于生态系统的复杂性,我们对于气候变化与生态系统碳氮水循环过程及其耦合关系,生态系统对全球气候变化的响应与适应性特征与机制等方面的认识还不够深入,还有许多问题亟待解决。未来区域陆地生态系统碳循环研究将继续利用生态系统网络的多尺度、长期观测与联网观测和实验,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,重点开展区域陆地生态系统碳储量及其动态,典型生态系统碳循环关键过程和碳固定功能,生态系统碳氮水循环过程及其耦合关系对全球气候变化的响应与适应等方面的研究工作。

References:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to The Fourth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Yu G R, Fu Y L, Sun X M, Wen X F, Zhang L M. Recent progress and future directions of China FLUX. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(S II): 1-23.
- [3] Yu G R. *Scientific Frontier on Human Activities and Ecosystem Changes*. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [4] Kern J S. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous United States. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(2): 439-455.
- [5] Bernoux M, Eschenbrenner V, Cerri C C, Melillo J M, Feller C. LULUCF-based CDM: too much ado for a small carbon market. *Climate Policy*, 2002, 2(4): 379-385.
- [6] Schwartz D, Namri M. Mapping the total organic carbon in the soils of the Congo. *Global and Planetary Change*, 2002, 33(1/2): 77-93.
- [7] Krogh L, Noergaard A, Hermansen M, Greve M H, Balstroem T, Breuning-Madsen H. Preliminary estimates of contemporary soil organic carbon stocks in Denmark using multiple datasets and four scaling-up methods. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 96(1/3): 19-28.
- [8] Chaplot V, Bouahom B, Valentin C. Soil organic carbon stocks in Laos: spatial variations and controlling factors. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1380-1393.
- [9] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 497-508.
- [10] Wang S Q, Zhou C H, Li K R, Zhu S L, Huang F H. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 533-544.
- [11] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 305-315.
- [12] Yu D S, Shi X Z, Sun W X, Wang H J, Liu Q H, Zhao Y C. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1: 1000000 soil database. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2279-2283.
- [13] Xie Z B, Zhu J G, Liu G, Cadisch G, Hasegawa T, Chen C M, Sun H F, Tang H Y, Zeng Q. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2007, 13(9): 1989-2007.
- [14] Batjes N H. Carbon and nitrogen stocks in the soils of Central and Eastern Europe. *Soil Use and Management*, 2002, 18(4): 324-329.
- [15] Batjes N H. Mapping soil carbon stocks of Central Africa using SOTER. *Geoderma*, 2008, 146(1/2): 58-65.
- [16] Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, Ji C J, Zheng C Y, He J S, Zhu B. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1592-1599.
- [17] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(9): 1341-1350.
- [18] Fan J W, Zhong H P, Harris W, Yu G R, Wang S Q, Hu Z M, Yue Y Z. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above-and below-ground biomass. *Climatic Change*, 2008, 86(3/4): 375-396.
- [19] Yu G R, Li H T, Wang S Q. *Global Change, Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem*. Beijing: Meteorological Press, 2003.
- [20] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Cai L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320.

- [21] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 479-492.
- [22] Baldocchi D. 'Breathing' of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*, 2008, 56(1): 1-26.
- [23] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, Schulze E D, Rebmann C, Moors E J, Granier A, Gross P, Jensen N O, Pilegaard K, Lindroth A, Grelle A, Bernhofer C, Grünwald T, Aubinet M, Ceulemans R, Kowalski A S, Vesala T, Rannik Ü, Berbigier P, Loustau D, Gumundsson J, Thorgeirsson H, Ibrom A, Morgenstern K, Clement R, Moncrieff J, Montagnani L, Minerbi S, Jarvis P G. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 2000, 404(6780): 861-865.
- [24] Flanagan L B, Wever L A, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology*, 2002, 8(7): 599-615.
- [25] Suyker A E, Verma S B, Burba G G. Interannual variability in net CO₂ exchange of a native tallgrass prairie. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 255-265.
- [26] Gu L H, Baldocchi D D, Wofsy S C, Munger J W, Michalsky J J, Urbanski S P, Boden T A. Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: enhanced photosynthesis. *Science*, 2003, 299(5615): 2035-2038.
- [27] Janssens I A, Freibauer A, Ciais P, Smith P, Nabuurs G J, Folberth G, Schlamadinger B, Hutjes R W A, Ceulemans R, Schulze E D, Valentini R, Dolman A J. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions. *Science*, 2003, 300(5625): 1538-1542.
- [28] Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogee J, Allard V, Aubinet M, Buchmann N, Bernhofer C, Carrara A, Chevallier F, De Noblet N, Friend A D, Friedlingstein P, Grünwald T, Heinesch B, Keronen P, Knohl A, Krinner G, Loustau D, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Ourcival J M, Papale D, Pilegaard K, Rambal S, Seufert G, Soussana J F, Sanz M J, Schulze E D, Vesala T, Valentini R. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 2005, 437(7058): 529-533.
- [29] Yu G R, Sun X M. Flux Measurement and Research of Terrestrial Ecosystem in China. Beijing: Science Press, 2008.
- [30] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [31] Walther G R, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebe T J C, Fromentin J M, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, 416(6879): 389-395.
- [32] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, Wallace L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413(6856): 622-625.
- [33] Sherry R A, Zhou X H, Gu S L, Arnone J A III, Schimel D S, Verburg P S, Wallace L L, Luo Y Q. Divergence of reproductive phenology under climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(1): 198-202.
- [34] Zhou X H, Luo Y Q, Gao C, Verburg P S J, Arnone J A III, Darrouzet-Nardi A, Schimel D S. Concurrent and lagged impacts of an anomalously warm year on autotrophic and heterotrophic components of soil respiration: a deconvolution analysis. *New Phytologist*, 2010, 187(1): 184-198.
- [35] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(6682): 249-252.
- [36] Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Reichstein M, Luysaert S, Margolis H, Fang J Y, Barr A, Chen A P, Grelle A, Hollinger D Y, Laurila T, Lindroth A, Richardson A D, Vesala T. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 2008, 451(7174): 49-52.
- [37] Staddon P L, Ramsey C B, Ostle N, Ineson P, Fitter A H. Rapid turnover of hyphae of mycorrhizal fungi determined by AMS microanalysis of ¹⁴C. *Science*, 2003, 300(5622): 1138-1140.
- [38] Arnone J A III, Verburg P S J, Johnson D W, Larsen J D, Jasoni R L, Lucchesi A J, Batts C M, Von Nagy C, Coulombe W G, Schorran D E, Buck P E, Braswell B H, Coleman J S, Sherry R A, Wallace L L, Luo Y Q, Schimel D S. Prolonged suppression of ecosystem carbon dioxide uptake after an anomalously warm year. *Nature*, 2008, 455(7211): 383-386.
- [39] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, Newkirk K, Lux H, Bowles F P, Catricala C, Magill A, Ahrens T, Morrisseau S. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science*, 2002, 298(5601): 2173-2176.
- [40] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 2008, 451(7176): 289-292.
- [41] Sorensen P L, Michelsen A. Long-term warming and litter addition affects nitrogen fixation in a subarctic heath. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 528-537.
- [42] Keyser A R, Kimball J S, Nemani R R, Running S W. Simulating the effects of climate change on the carbon balance of North American high-latitude forests. *Global Change Biology*, 2000, 6(S1): 185-195.

- [43] Wan S Q, Xia J Y, Liu W X, Niu S L. Photosynthetic overcompensation under nocturnal warming enhances grassland carbon sequestration. *Ecology*, 2009, 90(10) : 2700–2710.
- [44] Yu G R, Zheng Z M, Wang Q F, Fu Y L, Zhuang J, Sun X M, Wang Y S. Spatiotemporal pattern of soil respiration of terrestrial ecosystems in China: the development of a geostatistical model and its simulation. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(16) : 6074–6080.
- [45] Malchair S, De Boeck H J, Lemmens C M H M, Ceulemans R, Merckx R, Nijs I, Carnol M. Diversity-function relationship of ammonia-oxidizing bacteria in soils among functional groups of grassland species under climate warming. *Applied Soil Ecology*, 2010, 44(1) : 15–23.
- [46] Knapp A K, Fay P A, Blair J M, Collins S L, Smith M D, Carlisle J D, Harper C W, Danner B T, Lett M S, McCarron J K. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland. *Science*, 2002, 298(5601) : 2202–2205.
- [47] Huxman T E, Smith M D, Fay P A, Knapp A K, Shaw M R, Loik M E, Smith S D, Tissue D T, Zak J C, Weltzin J F, Pockman W T, Sala O E, Haddad B M, Harte J, Koch G W, Schwinning S, Small E E, Williams D G. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. *Nature*, 2004, 429(6992) : 651–654.
- [48] Phillips O L, Aragão L E O C, Lewis S L, Fisher J B, Lloyd J, López-González G, Malhi Y, Monteagudo A, Peacock J, Quesada C A, van der Heijden G, Almeida S, Amaral I, Arroyo L, Aymard G, Baker T R, Bánki O, Blanc L, Bonal D, Brando P, Chave J, de Oliveira Á C A, Cardozo N D, Czimczik C I, Feldpausch T R, Freitas M A, Gloor E, Higuchi N, Jiménez E, Lloyd G, Meir P, Mendoza C, Morel A, Neill D A, Nepstad D, Patiño S, Peñuela M C, Prieto A, Ramírez F, Schwarz M, Silva J, Silveira M, Thomas A S, ter Steege H, Stropp J, Vázquez R, Zelazowski P, Dávila E A, Andelman S, Andrade A, Chao K J, Erwin T, Di Fiore A, Honorio C E, Keeling H, Killeen T J, Laurance W F, Peña Cruz A, Pitman N C, Núñez Vargas P, Ramírez-Angulo H, Rudas A, Salamão R, Silva N, Terborgh J, Torres-Lezama A. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 2009, 323(5919) : 1344–1347.
- [49] Knapp A K, Beier C, Briske D D, Classen A T, Luo Y Q, Reichstein M, Smith M D, Smith S D, Bell J E, Fay P A. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *BioScience*, 2008, 58(9) : 811–821.
- [50] Weltzin J F, Bridgman S D, Pastor J, Chen J Q, Harth C. Potential effects of warming and drying on peatland plant community composition. *Global Change Biology*, 2003, 9(2) : 141–151.
- [51] Yu G R, Zhang L M, Sun X M, Fu Y L, Wen X F, Wang Q F, Li S G, Ren C Y, Song X, Liu Y F, Han S J, Yan J H. Environmental controls over carbon exchange of three forest ecosystems in eastern China. *Global Change Biology*, 2008, 14(11) : 2555–2571.
- [52] Fay P A, Carlisle J D, Knapp A K, Blair J M, Collins S L. Productivity responses to altered rainfall patterns in a C₄-dominated grassland. *Oecologia*, 2003, 137(2) : 245–251.
- [53] Shaw M R, Zavaleta E S, Chiariello N R, Cleland E E, Mooney H A, Field C B. Grassland responses to global environmental changes suppressed by elevated CO₂. *Science*, 2002, 298(5600) : 1987–1990.
- [54] Körner C, Asshoff R, Bignucolo O, Hättenschwiler S, Keel S G, Peláez-Riedl S, Pepin S, Siegwolf R T W, Zotz G. Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂. *Science*, 2005, 309(5739) : 1360–1362.
- [55] Luo Y, Field C B, Jackson R B. Does nitrogen constrain carbon cycling, or does carbon input stimulate nitrogen cycling?. *Ecology*, 2006, 87(1) : 3–4.
- [56] Ainsworth E A, Long S P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 2005, 165(2) : 351–371.
- [57] Heath J, Ayres E, Possell M, Bardgett R D, Black H I J, Grant H, Ineson P, Kerstiens G. Rising atmospheric CO₂ reduces sequestration of root-derived soil carbon. *Science*, 2005, 309(5741) : 1711–1713.
- [58] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, Nösberger J, Ort D R. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*, 2006, 312(5782) : 1918–1921.
- [59] Reich P B, Hobbie S E, Lee T, Ellsworth D S, West J B, Tilman D, Knops J M H, Naeem S, Trost J. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂. *Nature*, 2006, 440(7086) : 922–925.
- [60] Cleveland C C, Townsend A R. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(27) : 10316–10321.
- [61] Bragazza L, Freeman C, Jones T, Rydin H, Limpens J, Fenner N, Ellis T, Gerdol R, Hájek M, Hájek T, Iacumin P, Kutnar L, Tahvanainen T, Toberman H. Atmospheric nitrogen deposition promotes carbon loss from peat bogs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(51) : 19386–19389.
- [62] Nadelhoffer K J, Emmett B A, Gundersen P, Kjønaas O J, Koopmans C J, Schleppei P, Tietema A, Wright R F. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. *Nature*, 1999, 398(6723) : 145–148.
- [63] De Vries W, Solberg S, Dobbertin M, Sterba H, Laubhahn D, Reinds G J, Nabuurs G J, Gundersen P, Sutton M A. Ecologically implausible carbon response? *Nature*, 2008, 451(7180) : E1–E3.

- [64] Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, Berbigier P, Berninger F, Delzon S, Grelle A, Hari P, Jarvis P G, Kolari P, Kowalski A S, Lankreijer H, Law B E, Lindroth A, Loustau D, Manca G, Moncrieff J B, Rayment M, Tedeschi V, Valentini R, Grace J. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature*, 2007, 447(7146): 849-851.
- [65] Vitousek P M. *Nutrient Cycling and Limitation: Hawai'i As A Model System*. Princeton: Princeton University Press, 2004.
- [66] Liu L L, Greaver T L. A global perspective on belowground carbon dynamics under nitrogen enrichment. *Ecology Letters*, 2010, 13(7): 819-828.
- [67] Niu S L, Wu M Y, Han Y, Xia J Y, Zhang Z, Yang H J, Wan S Q. Nitrogen effects on net ecosystem carbon exchange in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 144-155.
- [68] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, Gowing D J. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. *Science*, 2004, 303(5665): 1876-1879.
- [69] Lu X K, Mo J M, Gilliam F S, Zhou G Y, Fang Y T. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in an old-growth tropical forest. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2688-2700.
- [70] Aber J D, Nadelhoffer K J, Steudler P, Melillo J M. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience*, 1989, 39(6): 378-286.
- [71] Norby R J, Luo Y Q. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO₂ and global warming in a multi-factor world. *New Phytologist*, 2004, 162(2): 281-293.
- [72] Zavaleta E S, Shaw M R, Chiariello N R, Thomas B D, Cleland E E, Field C B, Mooney H A. Grassland responses to three years of elevated temperature, CO₂, precipitation, and N deposition. *Ecological Monographs*, 2003, 73(4): 585-604.
- [73] Sterner R W, Elser J J. *Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to The Biosphere*. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [74] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markow T A, Cotner J B, Harrison J F, Hobbie S E, Odell G M, Weider L J. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [75] Cleveland C C, Liptzin D. C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [76] Taylor P G, Townsend A R. Stoichiometric control of organic carbon-nitrate relationships from soils to the sea. *Nature*, 2010, 464(7292): 1178-1181.
- [77] Yu G R, Wang Q F, Yu Z L. Study on the coupling cycle of water-carbon and process management in terrestrial ecosystem. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(5): 831-839.
- [78] Yu G R, Song X F, Wang Q F, Liu Y F, Guan D X, Yan J H, Sun X M, Zhang L M, Wen X F. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables. *New Phytologist*, 2008, 177(4): 927-937.
- [79] Elser J J, Bracken M E, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.

参考文献:

- [2] 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 (China FLUX) 的研究进展及其发展思路. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(S1): 1-21.
- [3] 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.
- [9] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.
- [10] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.
- [12] 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.
- [19] 于贵瑞, 李海涛, 王绍强. 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.
- [29] 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.
- [77] 于贵瑞, 王秋凤, 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.