

陆地生态系统碳平衡主要研究方法评述

赵德华¹, 李建龙^{1,*}, 齐家国², 范亚民¹

(1. 南京大学生物系, 南京 210093; 2. 美国密歇根州立大学地理系和全球变化-对地观测中心, 密歇根州东兰辛市 48823)

摘要: 陆地生态系统碳平衡是全球变化科学中的核心问题之一, 目前也是生态科学中的前沿与热点问题, 而陆地生态系统的复杂性与不确定性决定了对陆地生态系统碳平衡估测的复杂性和不确定性。为研究这一复杂性问题, 已发展了许多研究方法, 可分为“自下而上”与“自上而下”两种, 各种方法都有其自身的优势和劣势。相关方向也已经有了大量的研究报道, 但是, 不同的研究由于在方法、时间与空间尺度等存在的差异, 使得许多研究结果和预测很难被有效的整合或适用于大范围甚至全球水平。综述了陆地碳平衡的主要研究方法, 分析和比较了各方法的特点, 指出在研究中对不同方法的结果进行分析和比较, 以及采用综合方法的必要性。

关键词: 碳平衡; 陆地生态系统; 自上而下方法; 自下而上方法

文章编号: 1000-0933(2006)08-2655-08 **中图分类号:** Q143 **文献标识码:** A

An overview of current methods to estimate carbon budget of terrestrial ecosystems

ZHAO De-Hua¹, LI Jian-Long^{1,*}, QI Jia-Guo², FAN Ya-Ming¹ (1. Department of Biological Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Department of Geography and Center for Global Change and Earth Observations, Michigan State University, East Lansing, MI 48823, USA). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2655 ~ 2662.

Abstract: The continued increase in atmospheric carbon dioxide (CO₂) due to anthropogenic emissions (mostly by fossil burning and land use and land cover change) is believed to have caused significant changes in global climate and biology. Because terrestrial ecosystems play an important but ambiguous role in the global carbon budget, a prime focus of much research in the global change studies is on the carbon accounting of the terrestrial ecosystems. Despite carbon sequestration by terrestrial ecosystems has been thought to occur predominantly in the Northern Hemisphere, the magnitude, longitudinal distribution and dynamics of carbon sinks remain uncertain. To fully balance carbon budget, uncertainties in estimating carbon sinks / sources must be quantified that include soil respiration variations with temperature, terrestrial responses to climate change, major disturbances in forest ecosystems, and total amount of sequestrations by the global oceans and terrestrial ecosystems. Most of these uncertainties mainly result from the complexity of terrestrial ecosystems. To reduce uncertainties in carbon budget estimation, many methods have been developed in the past several decades. However, these methods may not necessarily result in uncertainties reduction, instead, they often constrain the generality of carbon estimates. The purpose of this study is to provide comprehensive review of current methods, specifically focusing on terrestrial ecosystems.

Eight methods commonly used in estimating terrestrial ecosystem carbon budget were reviewed with respects to their merits and limitations that include 1) the whole-plant or soil chamber method, 2) forest inventory, 3) the eddy covariance techniques, 4) plant-soil C isotopes techniques, 5) land use and land cover change, 6) process-based modeling, 7) atmospheric tracer-transport modeling, and 8) remote sensing techniques. These methods were divided into two groups: bottom-up (or land-based) and top-down (or atmosphere-based). Generally, the bottom-up approaches are more appropriate in understanding and predicting changes

基金项目: 南京大学人才引进启动资助项目(0208005122)和江苏省自然科学基金重点预研项目联合资助项目(No. BK2005212)

收稿日期: 2005-06-02; **修订日期:** 2006-02-28

作者简介: 赵德华(1975~), 男, 江苏连云港人, 博士, 主要从事遥感技术应用和全球变化研究. E-mail: jlli2008@nju.edu.cn

Foundation item: The project was supported by Project of Nanjing University for Newly Engaged Teacher(No. 0208005122)

Received date: 2005-06-02; **Accepted date:** 2006-02-28

Biography: ZHAO De-Hua, Ph.D., mainly engaged in the applications of remote sensing and global change. E-mail: dhzhao@nju.edu.cn

in carbon balance of terrestrial ecosystems. However, they are difficult to be scaled up to represent the regional or global terrestrial ecosystems. The top-down approaches, similarly, have the advantage of estimating carbon budget over large spatial areas, but provide little information about the processes. As each approach has its own limitations, results from each study often vary significantly and difficult to compare. It is suggested that a study be made to compare and analyze the results from different methods using a single dataset, which will provide some quantitative assessment of uncertainties from each method.

Key words: carbon balance; terrestrial ecosystems; top-down methods; bottom-up methods

受人类活动影响,大气 CO_2 浓度有日益上升的趋势,引发了一系列的全球变化(IPCC,2001),对地球生态系统产生长期的影响^[1~3]。目前,全球碳平衡问题日益成为近年来全球变化科学中前沿与热点问题。人类活动释放的 CO_2 可能存在大气、海洋和陆地生态系统,海洋和大气组成相对均匀或具有很强的规律性,相关参数的估测相对容易;陆地生态系统最复杂、最具有不确定性,而且,陆地是人类赖以生存基础,同时也是受人类活动影响最大的区域。因此,相关方向的研究大都集中在有关陆地碳平衡问题的探讨^[4~9]。随着研究的深入,研究手段和研究方法也得到了不断的改进与创新,但是,由于不同的研究在方法、时间与空间尺度的差异,使得研究结果和预测很难适用于更大范围或全球水平^[10,11]。陆地与大气间碳交换与平衡研究的方法可分为两种:以陆地为对象的“自下而上(Bottom-up)”方法和以大气为对象的“自上而下(Top-down)”方法,本文综述了“自下而上”和“自上而下”的陆地碳平衡研究方法,分析和比较了不同方法的特点,及其对研究结果的影响。

1 “自下而上”方法

1.1 箱法

箱法是用具一定体积的箱子罩在待测地表,隔绝箱体内外空气,测定箱内空气中 CO_2 的变化速率,从而计算出地-气间 CO_2 的交换速率,这是一种直接测定碳通量方法,具有原理简单、操作简单、成本低、结果相对准确等优点,在小范围内进行气体交换的动态变化测定、分析植被的生理状态和土壤呼吸时,箱法有着很强的优势,特别适用于土壤、草地、农田碳通量的研究^[12~15]。箱法是目前区域碳平衡研究中最常用的方法之一,箱法也是中国陆地生态系统碳通量观测网络(ChinaFLUX)中主要的方法之一。近年来,箱法技术本身也得到了不断的改进,发展出了多种箱法技术,如静态和动态箱法、明箱和暗箱法等。

箱法的缺点和误差源主要有:① 箱体本身会干扰 CO_2 扩散梯度,使 CO_2 通量被低估,但这种误差一般不会超过 15%,而且可以用拟合曲线和缩短测定时间的方法来校正这一误差^[16]。② 当用这种小范围测定结果推测一个生态系统的气体交换量时,容易产生较大的误差,主要原因就在于实验选择的样点(叶片的不同部位、不同叶位的叶片,以及样株与样地)很难代表某一生态系统的实际状况,因此,实验结果受人为因素的影响较大^[17],控制这一误的方法是调整箱体的大小、数目和取样频率^[16]。③ 箱体内外空气容易产生压力差,可以显著地影响测定结果,通常减小这一误差的方法是采用适当大小的通风口和调节箱体内外通气量^[16]。

1.2 涡度相关技术

涡度相关指的是某种物质的垂直通量,即这种物质的浓度与其速度的协方差,是研究陆地碳平衡最常用的方法之一。利用涡度相关技术的碳通量测定起到了将“自下而上”法与“自上而下”法联系起来的桥梁作用^[18],因此,有一些分类既不把涡度相关技术方法分为“自下而上”法,也不分为“自上而下”法。涡度相关技术被广泛地用于陆地碳平衡的研究^[17~19]。这种方法优点有^[17]:① 是一种直接测量 CO_2 交换量的方法,不会干扰环境;② 研究尺度比较适合;③ 样地可纵向空间扩展性;④ 样地可连续观测性。

涡度相关技术的主要缺点或误差源主要有:① 当地形有一定的坡度时,容易使空气中的 CO_2 发生漏流;② 将小范围的研究结果推广到区域或全球时仍会产生较大的误差;③ 忽略空气的水平流和溶解于水体中碳容易造成 CO_2 交换量被低估^[20];④ 低层大气对 CO_2 的贮存效应容易造成 CO_2 交换量被低估^[21];⑤ 容易受环境条件的影响^[17];⑥ 目前全世界测定 CO_2 通量的网点相对较少,限制了这些数据资料在全球陆地生态系统碳平衡研究中的应用^[22]。

1.3 清单方法

在不同的陆地生态系统中选取典型样地,实地观测植被与土壤碳贮量的相关参数,通过不同时期的碳贮量的变化也可估算该陆地生态系统的碳平衡状态。这种方法的优点主要在于这是一种直接的测定方法,其结果较为可靠。

缺点或误差源在于:① 资金与人力的投入大,持续时间长;② 很难估测引起生态系统碳平衡变化的原因^[23];③ 难以同时完成对所有陆地碳库组成的清查^[7],比如进行森林清查时往往忽略分配到地下的那部分碳,而进行土壤清查时往往忽略地上部分碳的变化^[24];④ 陆地生态系统的高度空间变异性,使得小样地的调查结果有时很难代表整个生态系统的实际情况^[25,26];⑤ 不同样地的清查方法、时间等存在的偏差容易造成估测误差。

1.4 地面碳同位素方法

假定大气中碳同位素的量是衡定的,植被通过光合作用固定的碳也就含有一定量的碳同位素,由于同位素的衰变,对于土壤或植被中的碳同位素,周转期越长,碳同位素的含量就越低,因此,通过分析植被或土壤中碳同位素的丰度,可以确定植被或土壤中有有机碳的年龄,分析有机碳的动态变化,“将古论今”,弥补常规方法存在的一些缺陷。地面碳同位素方法在分析陆地碳平衡时非常有用,是全球变化研究中最常用的方法之一,特别适用于探讨陆地碳平衡的主导因子及其对全球变化的响应等方面^[27-32]。

碳同位素方法在研究陆地碳平衡中的不足或误差源在于,① 由于陆地生态系统的复杂性,地面碳同位素方法与基于地面的其他方法(比如箱法、涡度相关技术方法)一样,将小范围的研究结果外推到区域甚至全球水平时,会引起较大的误差,甚至根本是不可能的。② 同位素方法与传统的测定方法的测定结果间会表现出一定的差异性,比如,对植物根系周转期的估测,同位素方法获得的值一般大于传统方法(比如物质平衡方法)估测的值^[33,34]。

1.5 土地利用与土地覆盖变化方法

土地利用变化会引起土壤有机碳含量的变化,一般的研究结果认为林地或草地转变为耕地会引起土壤有机碳的下降,保持稳定的草场和农用地的植树造林是缓解大气 CO₂ 浓度升高的重要措施^[35,36]。当林地转变为草地时,土壤有机碳库和土壤呼吸强度可能会表现为增加、降低或无显著变化,总的来说,无显著地降低或增加趋势;土壤表层有机碳的循环周期有缩短的趋势^[35,37,38]。但是,由于林地地上生物量大于草地地上生物量,因此,森林向草地的入侵会引起生态系统碳量的增加^[2,5,37,39,40]。基于上述及其他的研究结果,通过对土地利用变化的分析可估测区域陆地碳平衡的变化。

土地利用变化方法在研究陆地碳平衡中的不足或误差源在于① 土地利用变化与陆地碳平衡变化间关系复杂,例如, Jackson 等^[41]最近通过研究 30~100a 前被木本植物入侵的草原生态系统,得出了与其他许多研究不同的结论,他们发现降雨量显著影响木本植物入侵所引起的草原生态系统土壤有机碳和氮的变化方向:干旱生态系统碳储量有所增加,而湿润生态系统碳储量却有所减少,而且,湿润地方的碳存储减少的量足以抵销植被生物量的增加量。② 通过土地利用变化估测陆地碳平衡需要弄清弃耕农田植被(主要是森林)重新生长与环境变化引起的原有植被生物量增加在目前陆地碳库或源中的作用,因为,如果目前中高纬度的碳汇主要是由于植被的重新生长,那么未来中高纬度的碳汇量将比目前估计的要小(因为随着人类加强对森林的保护,这种效应有减小的趋势);如果主要是由于环境变化引起原有植被生物量的增加,那么未来中高纬度的碳汇量将比目前估计的要大(因为全球气候正朝着有利于植被生长的方向变化)^[42]。有关这一问题还存在不同的研究结果。有研究认为,美国目前是一个稳定的碳库,但是,其中弃耕农田和被砍伐森林中木本植物的再生比 CO₂ 浓度升高和气候变化的影响作用更大^[10,43]。但是, Houghton 等^[40]通过森林调查认为土地利用变化(弃耕农田的林地再生、森林砍伐后的再生和森林野火的控制等)只占森林碳积累增加量的 20%~30%,如果把森林管理控制的森林火灾考虑进去,这个比例可达到 65%。但是欧洲的一些研究表明,土地利用变化、森林管理与由于气候变化(主要是 CO₂ 升高与氮的沉降作用)促进的植被生长都对森林碳汇的增加起非常重要的作

用^[44]。而中国的研究表明,陆地碳汇的增加主要是由于人类的植树造林^[45]。③ 土地利用变化方法引起估测误差还在于这类方法中只考虑了土地利用变化引起的陆地碳平衡的变化,但是忽略了其它因素引起的碳平衡的变化,比如,气候变化所引起的陆地源或汇的改变^[42]。

1.6 基于过程的陆地碳循环模型方法

陆生碳循环模型是指用数学方法定量描述陆地碳循环过程,估计土壤和植被的碳存贮现状以及预测未来的碳存贮潜力^[46-48]。基于过程的陆地碳循环模型主要包括生物地理模型、生物地球化学模型和基于多种模型的复合模型^[49,50]。陆地碳循环模型中需要输入的参数一般用“自下而上”的方法获得,因此,一般把这类方法归为“自下而上”法。基于过程模型的不足或缺点在于,① 建立基于过程模型的目的是为了把复杂的自然过程简单化,使它们能够为人类所接受,但是,任何一个模型,不管如何复杂,都不能够模拟所有的自然过程,不同的模型都具有不同的缺点或者只适用于局部地区。过于复杂的模型,参数的确定将会比较困难,从而限制了它的应用性;而简单的模型,虽然参数的确定相对比较容易,但是适用性或精度却很难满足需要^[51]。② 利用目前的数据,许多基于过程的陆地碳循环模型还不能得到充分的验证^[61]。③ 由于基于过程的模型方法带有很强的主观性,不同的研究中采用的空间和时间尺度上存在较大的差异性,使得基于过程模型的适用性较低,不同的模型的结果间存在较大差异,结果带有很大的不确定性^[19,52]。④ 评价一个模型的三个基本标准为:普遍性(*general*,即模型在时间和空间上的适用性)、真实性(*realistic*,即模型中是否包括了将来许多偶然的过程)、准确性(*accurate*,即模型结果在数量上的准确度),但是,在很多时候,过程模型只强调其中的两条标准,很少同时强调或满足这些标准^[53]。⑤ 由于对模型中具体过程理解的不足,许多模型即使其结果与实际状况非常吻合,其中具体过程仍可能是不准确的,甚至是错误的^[54]。

2 “自上而下”方法

2.1 遥感技术应用

遥感技术是一个非常重要的对地观测技术,在大尺度问题的研究中具有强大优势,广泛应用于全球碳平衡及其空间格局的研究中。例如,遥感监测表明,由于森林采伐,在 1990~1997 年之间,湿润的热带森林每年损失 $(5.8 \pm 1.4) \text{ M hm}^2$, $(2.3 \pm 0.7) \text{ M hm}^2$ 出现明显的退化^[55]。最近,Imhoff 等^[56]主要利用 FAO 的统计资料和遥感手段分析了人类利用净光合生产量的全球格局,得出,人类消费的净光合生产量约占总量的 36.8%,相当于 20.8 Pg 碳(全球每年净初级光合生产力按 56.8 Pg 估算)。随着遥感技术的发展,遥感信息在空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率上逐步得到改善,可供选择的遥感信息也越来越多,满足不同的研究在时间与空间尺度上的要求,因此,遥感技术在陆地碳平衡的研究中将发挥越来越重要的作用。

遥感技术在研究陆地碳平衡中的不足或误差源在于:① 遥感技术本身的一些缺点使得对于陆地植被生产力的估测存在较大的误差。② 遥感技术在估测陆地植被生产力方面虽然存在一定的优势,例如,Nemani 等^[57]利用气象数据和遥感手段,研究得出由于全球变化降低了植物生长的几个重要限制因子对植被生长的限制力,1999 年与 1982 年相比,全球植被净初级生产力增加了 6%,即增加了 3.0 Pg 的碳;增加最多的是热带森林,亚马逊地区由于云覆盖的降低引起太阳辐射增强,亚马逊雨林的植物净初级生产力增长量约占全球总增长量的 42%。遥感技术很难直接获取土壤有机碳库和营养水平等参数。虽然,Asner 等^[58]研究草原碳平衡得出,植被地上生物量与土壤有机碳量都随着草场年龄的降低而减少,植被地上生物量与土壤有机碳量、营养水平之间表现为良好的相关性,由于遥感技术可以估测植被地上生物量,因此,遥感技术也可通过间接的方法获得有关土壤的一些参数,但是,这一方法的实际应用能力有待于进一步研究证实。

2.2 大气反演模型方法

大气反演模型是指利用实测大气中 CO_2 或其他气体成分浓度或变化规律,采用大气传输模型的反演技术,确定区域或全球水平的陆地碳源或碳汇及其量的大小,这类方法主要包括 3 种:

第 1 种用大气 CO_2 传输模型的反演模式(用测定的大气 CO_2 浓度计算最佳拟合的区域 CO_2 源或库)可估测区域或全球陆地的碳平衡状态。大气反演模型的误差源可分为两类^[7]:① 内部的,即模型处理程序本身引

起的误差;②外部的,即大气反演模型在估测陆地碳平衡时,对于模型所采用的大气数据,空间与时间分辨率,以及不同的模型方法非常敏感^[5],比如,Gurney等^[59]分析16种大气传输模型反演全球的碳平衡状况,结果表明,各种模型对于南半球高纬度海洋碳吸收量的估测量小于海洋的测量值,而且不同的模型结果较为一致;但是对于陆地碳平衡的估测却受不同模型或不同方法的影响。

第2种是通过测定大气中 O_2 的浓度变化速率(实际上一般用 O_2/N_2 值来表示)的方法。因为大气中 CO_2 浓度的增加主要是源于石油燃烧量的增加,石油燃烧释放 CO_2 ,同时会引起 O_2/N_2 值的降低。陆地植被的光合作用是一个吸收 CO_2 ,释放 O_2 的过程,这一过程会引起 O_2/N_2 值的升高。而海洋可能吸收 CO_2 ,这一过程不会引起 O_2/N_2 值的变化。因此,大气中 O_2/N_2 值的浓度变化速率可间接地估测陆地碳汇^[60~62]。这种方法可能的误差在于海洋也可能是一个大气 O_2 的源或汇,特别是在较短时期内,比如一年四季或数年内,但通过使用多年数据分析可降低这种误差^[63]。Battle等^[63]通过这种方法得出1991~1997年间,陆地与海洋每年的碳汇分别为 (1.4 ± 0.8) Pg C和 (2.0 ± 0.6) Pg C。

第3种是通过测定大气中同位素组成变化(^{13}C)的方法。石油中 ^{13}C 的丰度较空气低,陆地植被吸收这种 ^{13}C 丰度较低的 CO_2 ,从而有提高大气 ^{13}C 丰度的作用。而海洋与大气中 CO_2 的交换不会改变大气 ^{13}C 丰度。因此,大气中 ^{13}C 丰度的变化速率也可间接地估测陆地碳汇^[63,64]。这种方法的误差在于大气-陆地和大气-海洋间除了净 CO_2 通量之外,还有一个数量较大的总 CO_2 通量。陆地植被除了进行光合作用外,还进行呼吸作用(每年的总量约为50 Pg C),光合作用吸收的 CO_2 是现在空气中 CO_2 ,而呼吸作用释放的 CO_2 是过去空气中的 CO_2 (数天、数年或数十年)。同样,海洋中目前估测每年可净吸收 CO_2 约2 Pg C,但每年两个大气-海洋间的交换总量约为90 Pg C。海洋吸收的是现在空气中 CO_2 ,而释放的却是过去空气中的 CO_2 (也可能是数十年前)。这两种过程都可以削弱 ^{13}C 的这种指示作用。但是,当分析多年数据时,这两种误差源是相对稳定的,因此,可以通过一些技术处理降低这些干扰作用。

大气反演模型的优势在于可用于估测陆地-大气间 CO_2 的净通量,既包括了人类活动释放的 CO_2 ,也包括了自然过程引起的地-气 CO_2 的变化。但是,虽然目前全球分布了100多个观测站,但是分布并不均匀,相对缺少全球陆地,特别是热带地区的测定数据^[26]。

3 “自下而上”与“自上而下”法的比较与分析

一般而言,“自下而上”方法在研究相对较小范围内的地-气碳平衡及其对全球变化响应机理方面具有很强的优势,但是,由于任何一个地面实验都很难或者根本不可能代表区域或全球水平,这种基于地面实验方法最大的挑战在于将地面的研究成果扩展到区域甚至于全球水平。相反地,“自上而下”方法在定量化的估算大范围由于人类活动、生物物理、生物化学影响的碳平衡变化方面表现出很强的优势,但是,对于引起碳平衡变化的原因以及预测未来的发展趋势等方面却无能为力,而且这类方法的空间和时间分辨率较低^[49,65]。因此,基于不同的研究方法,区域和全球碳平衡的结果间存在较大的差异^[5,10,66]。

3.1 区域大气反演模型方法与实地调查方法

大气模型方法与实地调查方法估测区域或全球陆地与大气间碳通量的结果间必然存在较大的差异,其原因首先在于大气模型方法估测的碳通量有别于实地调查方法估测的碳通量。比如,大气模型方法估测的碳通量只考虑了 CO_2 形式的碳,但是由区域或全球陆地向大气释放的碳不仅以 CO_2 的形式,还以CO、甲烷以及其它的挥发性有机组分的形成释放到大气中。大气模型方法没有考虑这部分的碳通量,而实地调查方法中却包括了这部分碳通量。另外,大气模型方法中只考虑了石油燃烧释放的 CO_2 ,忽略了以CO形式释放到大气的那部分碳。Janssens等^[17]研究得出,如果在大气反演模型中同时纳入上述的这些碳通量,可以将大气反演模型方法与实地调查方法估测欧洲大陆的碳平衡间的差异缩小50%以上。基于上述原因,大气模型方法对区域或陆地碳汇的估测值一般都大于实地调查方法的估测值。但除了上述原因外,许多实地调查方法只考虑了地上部分生物量的变化量,没有考虑土壤对 CO_2 的净吸收作用,也是原因之一^[42],考虑这部分碳通量可提高大气

反演模型方法与清单方法估测值间的吻合程度^[26]。

相反地,也存在一些陆地生态系统-大气碳通量纳入了大气估测模型,但没有被纳入实地调查的估测模型。比如,区域间进行的碳产品贸易可以增加或减少区域向大气 CO₂ 的释放量;而且,陆地生态系统中的水体也可能是大气 CO₂ 源。

3.2 涡度相关技术方法与森林定点观测

通过森林实地观测得出,热带森林,特别是亚马逊森林在近几十年内充当碳汇作用^[67,68],但是,后来森林实地观测结果表明,热带森林的地上生物量在过去几十年内并没有出现增加的迹象^[69]。而且,一般来说,运用涡度相关技术获得的热带森林碳库量大于森林实地观测的数值^[70]。这一现象 Richey 等^[70]的研究结果给出了很好的解释,因为对于亚马逊的整个森林生态系统来说,除了通过植被呼吸和土壤呼吸向外释放 CO₂ 之外,河流和沼泽地也向外释放 CO₂ (这部分碳也来源于森林植被的光合作用,一般通过溶解在地下水中输出)。因此,对于植被本身来说,可以净吸收 CO₂,但对于整个生态系统来说,基本处于一种平衡状态。因此,涡度相关技术观测陆地-大气通量而忽视水体 CO₂ 通量的方法容易过高的估测森林对 CO₂ 的净吸收量^[20]。

4 结语

随着全球变化科学的发展,有关陆地碳循环及其对全球变化响应的研究,已取得了较大的进展,但是仍然存在许多的不确定性^[5,71~73],对于一些关键性的问题还存在争议,甚至完全相反的观点,例如,有关土壤微生物对有机碳的分解作用对升温的响应^[74~76],陆地碳库量对全球变化的响应^[77~80],影响森林碳平衡的主导因子^[10,57,42],以及陆地与海洋对吸收人类活动释放 CO₂ 的比例与份额^[59,81,82]等。正确地回答与解决这些问题,对于陆地碳平衡的估测预报,乃至整个全球变化科学的发展具有非常重要的意义。

从方法上来说,研究区域碳平衡主要通过两个途径:测量区域碳库的变化和实际测定碳通量。但是,由于实际操作过程中的差异性会引起很大的误差。因此,另有一些研究运用基于过程的模型方法,但是这些方法却又受人为因素的影响较大,而且有些参数很难确定。陆地生态系统是一个庞大而又复杂的动态变化着的系统,决定了陆地碳平衡问题的复杂性与不确定性,各种研究方法都存在各自的优势和劣势,而在实际的研究过程中,上述的多种研究方法在很多时候并不单独使用,比如,遥感资料往往作为清单方法的辅助工具^[26],或作为大气反演模型、基于过程模型的参数使用^[2,83]。但是,在对陆地碳循环和生态系统对全球变化响应的研究,由于不同的研究者在方法、时间与空间尺度的差异,使得研究结果和预测很难适用于更大范围内或全球水平^[11]。因此,在从事有关陆地碳平衡研究时,需要采用不同的方法,在对不同方法的优点与缺点进行充分分析的基础上,对通过不同途径所得结果进行比较与分析,并采用综合的研究方法,有利于进一步提高陆地碳平衡估测与预报的准确性与可靠性,使得陆地碳平衡的研究结果能够为政府制定相关的政策提供依据。例如,在大气传输模型中结合多种观测数据(土壤-植被-大气中的碳积累量变化、小范围的 CO₂ 通量等)可提高区域或全球碳平衡状况的估测精度^[84]。总之,在当前陆地生态系统碳平衡成为生态学中的前沿与热点问题的条件下,随着研究方法的改进和完善,对陆地生态系统的研究水平将得到不断的提高,陆地碳平衡的研究结果将会更能反映实际状况。

References:

- [1] Hoffert M I, Caldeira K, Benford G, *et al.* Advanced technology paths to global climate stability: Energy for a greenhouse planet. *Science*, 2002, 298: 981 ~ 987.
- [2] Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, *et al.* Consistent land- and atmosphere-based US carbon sink estimates. *Science*, 2001, 292: 2316 ~ 2320.
- [3] Thomas C D, Cameron A, Green R E, *et al.* Extinction risk from climate change. *Nature*, 2004, 427: 145 ~ 148.
- [4] Barford C C, Wofsy S C, Goulden M L, *et al.* Factors controlling long- and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 2001, 294: 1688 ~ 1691.
- [5] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, *et al.* Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, 414: 169 ~ 172.
- [6] Wang X K, Bai Y Y, Ouyang Z Y, *et al.* Missing sink in global carbon cycle and its causes. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22: 94 ~ 103.
- [7] Janssens I A, Freibauer A, Ciais P, *et al.* Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions. *Science*, 2003, 300: 1538 ~ 1542.
- [8] Körner C. Slow in, rapid out - Carbon flux studies and Kyoto targets. *Science*, 2003, 300: 1242 ~ 1243.

- [9] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, *et al.* Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304: 1629 ~ 1633.
- [10] Schimel D, Melillo J, Tian H Q, *et al.* Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science*, 2000, 287: 2004 ~ 2006.
- [11] Dunne J A, Saleska S R, Fischer M L, *et al.* Integrating experimental and gradient methods in ecological climate change research. *Ecology*, 2004, 85: 904 ~ 916.
- [12] Frank A B, Liebig M A, Hanson J D. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 1235 ~ 1241.
- [13] LeCain D R, Morgan J A, Schuman G E, *et al.* Carbon exchange and species composition of grazed pastures and exclosures in the shortgrass steppe of Colorado. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 93: 421 ~ 435.
- [14] Maljanen M, Komulainen V M, Hytönen J, *et al.* Carbon dioxide, nitrous oxide and methane dynamics in boreal organic agricultural soils with different soil characteristics. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36: 1801 ~ 1808.
- [15] Melling L, Hatano R, Kah J G. Soil CO₂ flux from three ecosystems in tropical peatland of Sarawak, Malaysia. *Tellus*, 2005, 57: 1 ~ 11.
- [16] Davidson E A, Savage K, Verchot L V, *et al.* Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 21 ~ 37.
- [17] 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: 479 ~ 492.
- [18] Hutley L B, Leuning R, Beringer J, *et al.* The utility of the eddy covariance techniques as a tool in carbon accounting: tropical savanna as a case study. *Australian Journal of Botany*, 2005, 53: 663 ~ 675.
- [19] Williams M, Schwarz P A, Law B E, *et al.* An improved analysis of forest carbon dynamics using data assimilation. *Global Change Biology*, 2005, 11: 89 ~ 105.
- [20] Fearnside P M. Are climate change impacts already affecting tropical forest biomass? *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 2004, 14: 299 ~ 302.
- [21] Curtis P S, Hanson P J, Bolstad P, *et al.* Biometric and eddy-covariance based estimates of annual carbon storage in five eastern North American deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 3 ~ 19.
- [22] Mao Z J. Summary of estimation methods and research advances of the carbon balance of forest ecosystems. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26: 731 ~ 738.
- [23] Tian H, Melillo J M, Kicklighter D W, *et al.* Climatic and biotic controls on annual carbon storage in Amazonian ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2002, 9: 315 ~ 335.
- [24] Clark D A, Brown S, Kicklighter D W, *et al.* Measuring net primary production in forests: concepts and field measurements. *Ecological Applications*, 2001, 11: 356 ~ 370.
- [25] Carey E V, Sala A, Keane R, *et al.* Are old forests underestimated as global carbon sinks? *Global Change Biology*, 2001, 7: 339 ~ 344.
- [26] House J I, Prentice I C, Ramankutty N, *et al.* Reconciling apparent inconsistencies in estimates of terrestrial CO₂ sources and sinks. *Tellus*, 2003, 55: 345 ~ 363.
- [27] Del Gado I, Six J, Peressotti A, *et al.* Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1204 ~ 1213.
- [28] Hagedorn F, Spinnler D, Bundt M, *et al.* The input and fate of new C in two forest soils under elevated CO₂. *Global Change Biology*, 2003, 9: 862 ~ 872.
- [29] Matamala R, Gonzalez-Meler M A, Jastrow J D, *et al.* Impacts of fine root turnover on forest NPP and soil C sequestration potential. *Science*, 2003, 302: 1385 ~ 1387.
- [30] O'Reilly C M, Alin S R, Plisnier P D, *et al.* Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. *Nature*, 2003, 424: 766 ~ 768.
- [31] Grünzweig J, Sparrow S D, Yakir D. Impact of agricultural land-use change on carbon storage in boreal Alaska. *Global Change Biology*, 2004, 10: 452 ~ 472.
- [32] Marie-Anne, Johan S, David H, *et al.* Decomposition of soil and plant carbon from pasture systems after 9 years of exposure to elevated CO₂: impact on C cycling and modeling. *Global Change Biology*, 2004, 10: 1365 ~ 1486.
- [33] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2000, 147: 13 ~ 31.
- [34] Tingey G L, Fahey T J. Fine root turnover in northern hardwood forest: a direct comparison of the radiocarbon and minirhizotron methods. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32: 1692 ~ 1697.
- [35] Murty D, Kirschbaum M F, Mcmurtrie R E, *et al.* Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology*, 2002, 8: 105 ~ 123.
- [36] Martens D A, Reedy T E, Lewis D T. Soil organic carbon content and composition of 130-year crop, pasture and forest land-use managements. *Global Change Biology*, 2004, 10: 65 ~ 78.
- [37] McCulley R L, Archer S R, Boutton T W, *et al.* Soil respiration and nutrient cycling in wooded communities developing in grassland. *Ecology*, 2004, 85: 2804 ~ 2817.
- [38] Smith D L, Johnson L. Vegetation-mediated changes in microclimate reduce soil respiration as woodlands expand into grasslands. *Ecology*, 2004, 85: 3348 ~ 3361.
- [39] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, *et al.* Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277: 494 ~ 499.
- [40] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The US carbon budget: Contributions from land-use change. *Science*, 1999, 285: 574 ~ 578.
- [41] Jackson R B, Banner J L, Jobbágy E G, *et al.* Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 2002, 418: 623 ~ 626.
- [42] Houghton R A. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? *Global Change Biology*, 2003, 9: 500 ~ 509.
- [43] Casperson J P, Pacala S W, Jenkins J C, *et al.* Contributions of land-use history to carbon accumulation in U.S. forests. *Science*, 2000, 290: 1148 ~ 1151.
- [44] Kauppi P E, Mielikäinen K, Kuusela K. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science*, 1992, 256: 70 ~ 74.
- [45] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292: 2320 ~ 2322.
- [46] Ogee J, Brunet Y, Loustau D, *et al.* MuSICA, a CO₂, water and energy multiplayer, multileaf pine forest model: evaluation from hourly to yearly time scales and sensitivity analysis. *Global Change Biology*, 2003, 9: 697 ~ 717.
- [47] Sitch S, Smith B, Prentice I C, *et al.* Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, 9: 161 ~ 185.
- [48] Hirsch A I, Little W S, Houghton R A, *et al.* The net carbon flux due to deforestation and forest re-growth in the Brazilian Amazon: analysis using a process-based model. *Global Change Biology*, 2004, 10: 908 ~ 924.

- [49] Wang S Q, Chen Y F. The study and trends on terrestrial carbon cycle models. *Progress in Geography*, 1998, 17 (4): 64 ~ 72.
- [50] Ni J. BIOME models: main principles and applications. *Acta Phytocologica Sinica*, 26 (4): 481 ~ 488.
- [51] Tian H Q. Dynamics of the terrestrial biosphere in changing global environments: data, models, and validation. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57 (4): 379 ~ 388.
- [52] Nabuurs G J, Pussinen A, Karjalainen T, *et al.* Stemwood volume increment changes in European forests due to climate change—a simulation study with the EFISCEN model. *Global Change Biology*, 2002, 8: 304 ~ 316.
- [53] Kramer K, Leinonen I, Bartelink H, *et al.* Evaluation of six process-based forest growth models using eddy-covariance measurements of CO₂ and H₂O fluxes at six forest sites in Europe. *Global Change Biology*, 2002, 8: 213 ~ 230.
- [54] Clein J S, Kwiatkowski B L, McGuire A D, *et al.* Modelling carbon responses of tundra ecosystems to historical and projected climate: a comparison of a plot- and global-scale ecosystem model to identify process-based uncertainties. *Global Change Biology*, 2000, 6 (suppl. 1): 127 ~ 140.
- [55] Achard F, Eva H D, Stibig H J, *et al.* Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science*, 2002, 297: 999 ~ 1002.
- [56] Imhoff M L, Bounoua L, Ricketts T, *et al.* Global patterns in human consumption of net primary production. *Science*, 2004, 429: 870 ~ 873.
- [57] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, *et al.* Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300, 1560 ~ 1563.
- [58] Asner G P, Townsend A R, Bustamante M M C, *et al.* Pasture degradation in the central Amazon: linking changes in carbon and nutrient cycling with remote sensing. *Global Change Biology*, 2004, 10: 844 ~ 862.
- [59] Gurney K R, Law R M, Denning A S, *et al.* Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, 2002, 415: 626 ~ 630.
- [60] Bender M I, Battle M O. Carbon cycle studies based on the distribution of O₂ in air. *Tellus*, 1999, 51: 165 ~ 169.
- [61] Prentice I C, Heimann M, Sitch S. The carbon balance of the terrestrial biosphere: Ecosystem models and atmospheric observations. *Ecological Applications*, 2000, 10: 1553 ~ 1573.
- [62] Plattner G K, Joos F, Stocker T F. Revision of the global carbon budget due to changing air-sea oxygen fluxes. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16: 1096.
- [63] Battle M, Bender M L, Tans P P, *et al.* Global carbon sinks and their variability inferred from atmospheric O₂ and delta C13. *Science*, 2000, 287: 2467 ~ 2470.
- [64] Lai C T, Ehleringer J R, Schauer A J, *et al.* Canopy-scale ¹³C of photosynthetic and respiratory CO₂ fluxes: observations in forest biomes across the United States. *Global Change Biology*, 2005, 11: 633 ~ 643.
- [65] Denning A S, Nicholls M, Prihodko L, *et al.* Simulated variations in atmospheric CO₂ over a Wisconsin forest using a coupled ecosystem-atmosphere model. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1241 ~ 1250.
- [66] Fan S, Gloor M, Mahlman J, *et al.* A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science*, 1998, 282: 442 ~ 446.
- [67] Phillips O L, Malhi Y, Higuchi N, *et al.* Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science*, 1998, 282, 439 ~ 442.
- [68] Malhi Y, Phillips O L, Lloyd J, *et al.* An international network to monitor the structure, composition and dynamics of Amazonian forests. *Journal of Vegetation Science*, 2002, 13: 439 ~ 450.
- [69] Chave J, Condit R, Lao S, *et al.* Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in Panama. *Journal of Ecology*, 2003, 91, 240 ~ 252.
- [70] Carswell F E, Costa A L, Palheta M, *et al.* Seasonality in CO₂ and H₂O flux at an eastern Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002, 107 (D20): 8076.
- [71] Richey J E, Melack J, Aufdenkampe A, *et al.* Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. *Nature*, 2002, 416, 617 ~ 620.
- [72] Goodale CL, Davidson EA. Carbon cycle: Uncertain sinks in the shrubs. *Nature*, 2002, 418: 593 ~ 594.
- [73] Caldeira K, Jain A K, Hoffert M I, *et al.* Climate sensitivity uncertainty and the need for energy without CO₂ emission. *Science*, 2003, 299: 2052 ~ 2054.
- [74] Fang C M, Smith P, Moncrieff J B, *et al.* Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. *Nature*, 2005, 433: 57 ~ 59.
- [75] Knorr W, Prentice I C, House J I, *et al.* Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 2005, 433, 298 ~ 301.
- [76] Powlson D. Will soil amplify climate change? *Nature*, 2005, 433: 204 ~ 205.
- [77] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, *et al.* Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science*, 2002, 298: 2173 ~ 2176.
- [78] Mack M C, Schuur E A G, Bret-Harte M S, *et al.* Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization. *Nature*, 2004, 431, 440 ~ 443.
- [79] Klironomos J N, Allen M F, Rillig M C, *et al.* Abrupt rise in atmospheric CO₂ overestimates community response in a model plant-soil system. *Nature*, 2005, 433: 621 ~ 624.
- [80] Schlesinger W H, Lichter J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. *Nature*, 2001, 411: 466 ~ 469.
- [81] Feely R A, Sabine C L, Lee K, *et al.* Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the Oceans. *Science*, 2004, 305: 362 ~ 366.
- [82] Takahashi T. The fate of industrial carbon dioxide. *Science*, 2004, 305: 352 ~ 353.
- [83] Cao M K, Prince S D, Li K R, *et al.* Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China. *Global Change Biology*, 2003, 9: 536 ~ 546.
- [84] Wang Y P, Leuning R, Cleugh H A, *et al.* Parameter estimation in surface exchange models using nonlinear inversion: how many parameters can we estimate and which measurements are most useful? *Global Change Biology*, 2001, 7: 495 ~ 510.

参考文献:

- [6] 王效科, 白艳莹, 欧阳志云, 等. 全球碳循环中的失汇及其形成原因. *生态学报*, 2002, 22: 94 ~ 103.
- [22] 毛子军. 森林生态系统碳平衡估测方法及其研究进展. *植物生态学报*, 2002, 26: 731 ~ 738.
- [49] 王绍强, 陈育峰. 陆地表层碳循环模型研究及其趋势. *地理科学进展*, 1998, 17 (4): 64 ~ 72.
- [50] 倪健. BIOME 系列模型: 主要原理与应用. *植物生态学报*, 2002, 26 (4): 481 ~ 488.
- [51] 田汉勤. 陆地生物圈动态模式生态系统模拟的发展趋势. *地理学报*, 2002, 57 (4): 379 ~ 388.