

全球碳循环中的失汇及其形成原因

王效科, 白艳莹, 欧阳志云, 苗 鸿

(中国科学院生态环境研究中心系统生态室, 北京 100085)

摘要:近 20 多年来, 大气碳收支不平衡, 即碳失汇 (Missing carbon sink), 一直是全球碳循环研究的核心问题之一。在总结全球碳失汇的主要研究成果基础上, 分析了碳失汇数量和可能分布地点, 并对形成的主要原因: CO₂ 施肥作用、氮沉降的变化、变暖促进氮矿化和早期破坏后的森林再生等, 进行了综述和分析, 指出了该问题的复杂性。

关键词:碳汇; 全球碳循环; 热带; 温带; CO₂; 氮沉降

Missing Sink in Global Carbon Cycle and Its Causes

WANG Xiao-Ke, BAI Yan-Ying, OUYANG Zhi-Yun, MIAO Hong (DSE, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (1): 94~103

Abstract: The global carbon cycle has drawn special attention by policy makers and scientists. In December 1997, the Kyoto Protocol has been proposed by Parties to Climate Change Frame of United Nations, in which 39 industrialized countries are asked to impletement the duties of reduction of CO₂ emission. Based on recent estimation of global carbon change in the atmosphere, and ocean, anthropogenic carbon emission to the atmosphere (7.1 Pg/a) is more than the sum of carbon accumulated in the atmosphere (3.3±0.2 Pg C) and absorbed by the ocean (2.0±0.8 Pg C). The surplus is about 1.8 Pg C/a, called missing carbon sink. If the missing sink were not quantified and located, the future CO₂ concentration in the atmosphere would not be predicted. So missing carbon sink has been a critical problem in study of global carbon cycle since 1970s. After investigating the major researches on the estimation of global carbon budgets, this review assessed the estimate of carbon missing sink and its potential location, and analyzed the contributes of carbon sink: climate change, CO₂ fertilization, N deposition, and regeneration of harvested forest.

In global scale, the amount of missing carbon is determined by four component: carbon accumulation in the atmosphere, carbon emissions from fossil fuel combustion and land use change, and carbon absorption by ocean. The amounts of the four components have been measured or estimated with different data source and period by different authors, which implies a missing carbon sink in range of 0~3.1 Pg/a. Carbon accumulated in the atmpshere were estimated in range of 2.9~3.4 Pg C/a based on ice core records before 1957, on atmospheric CO₂ measurement then. Now this estimation will based on global atmospheric CO₂ measurement network established. Carbon released from land use change has been focused on tropical rainforest, and was estimated to be 0.4~2.5 Pg C/a. This large variation is caused by uncertainty in harvested forest area and amount of biomass burned. Carbon absorbed by ocean is estimated to be about 2 Pg/a by oceanic circulation and biogeochemical models, which is very well in accordance with results obtained by measurement of CO₂ difference on sea-air interface.

Many studies have believed the carbon missing sink to be located in terrestrial ecosystems. Carbon ac-

基金项目: 中国科学院知识创新项目 (KZCX2-405), 中国科学院封丘农业生态实验站基金, 国家重点基础研究发展规划“973”项目 (G2000D46807), 国家自然科学基金重点 (30071036) 资助项目

收稿日期: 2000-13-01, 修订日期: 2001-08-25

作者简介: 王效科 (1964~), 男, 陕西人, 博士, 研究员。主要从事碳循环, 生物地球化学模型, 植物地理学研究。

cumulation in terrestrial ecosystems have been estimated from both analysis of CO₂ measurement in the atmosphere and the ocean, and investigation of forest inventory.

In global carbon cycle, tropical forest plays an important role, which has been extensively investigated. Houghton *et al.* estimated CO₂ release from forest harvest and fire in tropics in period of 1860~1980 and 1980s and concluded that tropical forest is a major atmospheric CO₂ source. Global atmospheric CO₂ and isotope measurement also implied there is a CO₂ source in tropics. However, some studies showed tropical forest be an atmospheric CO₂ sink, such as modeling terrestrial carbon in Brazil forest driving by interannual climatic variation by Tian, long-term plot experiment by Philips, and flux measurement by Grace.

Mid-latitude region of north hemisphere has been regarded as the most potential missing carbon sink since 1990 by Tans *et al.* according to global atmospheric CO₂ and isotope measurement. then it was confirmed by nearly all analysis on atmospheric CO₂, O₂/N₂和 $\delta^{13}\text{C}$ that there is a north mid-latitude carbon sink. The sink is attributed to nitrogen deposition, regrowth of early-harvested forest and climate change.

IGBP has concluded that in terrestrial ecosystems, carbon sink was $0.5 \pm 0.5 \text{ Pg/a}$ by forest regrowth in north hemisphere, $1.0 \pm 0.5 \text{ Pg C/a}$ by CO₂ fertilization, and $0.6 \pm 0.3 \text{ Pg /a}$ by N deposition.

The influences of climatic change on carbon sink in terrestrial ecosystems have been investigated in two aspects: one is the relationship between carbon sink and temperature change, another is interannual climatic change driving carbon sink. Terrestrial carbon sink is controlled by temperature through two processes: enhancing respiration to release more carbon, and speeding up N mineralization to stimulate plant growth to sequester more carbon. However, we have not enough evidences to verify the two processes function well.

By modeling carbon dynamic in Brazil forest and flux measurement in Harvard forest, it is found that carbon exchange between ecosystems and the atmosphere changes annually and was driven by climatic change. In hot and dry years, forest ecosystem may be a carbon source, in other years it may be a carbon sink.

CO₂ fertilization will stimulate plant growth and enhance ecosystem carbon storage. Friedlingstein *et al.* estimated carbon stored in terrestrial ecosystems was increased by $1.2 \sim 2.04 \text{ Pg C/a}$.

In most of terrestrial ecosystem, productivity was limited by shortage of N, so N deposition will increase plant photosynthesis. By combining atmospheric transport model projecting the distribution of N deposition, and biogeochemical model simulating soil, and plant carbon dynamics in terrestrial ecosystems, it was estimated that N deposition could enhance carbon storage by $0.5 \sim 1.50 \text{ Gt C/a}$. However, when soil N accumulated to saturation, carbon storage enhancement by N deposition will disappear.

In forest ecosystems, carbon storage will increase with plant growth. In eastern U. S. A, forest regenerated widely on early-harvested land or abandoned arable land, which is a carbon sink now. Dixon *et al.* had concluded estimates of carbon sink by regrowth in the world. Note that carbon sink due to regrowth is a result of many processes: natural growth, CO₂ fertilization and N deposition fertilization.

Because of complex of carbon cycles in ecosystems and limitation of methodology, there are many difficulties to confirm the existance of carbon sink, or to determine the location and causes of carbon sink. So it is needed to conduct more observation, measurement, and to collect more detail data of land cover, climate, vegetation and soil.

Key words: carbon sink; global carbon cycle; tropic; temperate; CO₂ fertilization; N deposition

文章编号:1006-3001(2006)01-0094-10 中图分类号:Q143 文献标识码:A

1997 年 12 月,联合国气候变化框架条约缔约国制定了《京都议定书》,要求发达国家履行削减 CO₂ 排放量的责任,包括减少矿物燃料的燃烧和森林的破坏,并建议发达国家可以通过在发展中国家进行植树造林等,增加陆地生态系统中的碳固定量。为此,各国都越来越重视全球碳循环的研究^[1,2],特别是加强了对大气碳收支不平衡的探讨。据估计,20 世纪 80 年代期间,人类平均每年向大气排放 CO₂ 约 7.1 Pg C,比每年大气中积累的碳(3.3±0.2 Pg C)和海洋吸收的碳(2.0±0.8 Pg C)之和要多 1.8 Pg C/a,即可能存在一个未知的碳汇,国外学者称其为失汇(Missing sink)。^[3]

从目前对大气 CO₂ 源汇研究结果来看,要找的碳失汇最有可能存在于陆地生态系统中。但是该汇的位置和强度,存在着很大的不确定性。近 10 多年,关于陆地生态系统碳汇的研究非常多,并且有许多发表在 Nature 和 Science 上。但是,在我国,陆地生态系统的碳汇问题只在个别文献中提到^[4,5],系统的研究还非常少。本文试图综述国际上与此有关的重要文献和观点,希望更多的生态学者投入到陆地生态系统碳循环的研究中,并能够通过分析中国陆地生态系统的碳循环规律,为建立精确的中国陆地生态系统的 CO₂ 清单和制定减缓 CO₂ 排放的措施提供科学根据。

1 碳失汇

1.1 全球碳平衡

全球大气碳平衡方程为:

$$\text{大气 CO}_2 \text{ 增加} = \text{矿物燃料释放} + \text{土地利用变化释放} - \text{海洋吸收} - \text{碳失汇} \quad (1)$$

在对全球碳平衡中各主要碳汇和源的估计,由于采用的方法和数据来源不同,不同作者给出的估计值有所不同(表 1)。

表 1 全球碳平衡的各项估计值(Pg C/a)

Table 1 The components of global carbon balance

矿物质燃烧 Fossil-fuel combustion	土地利用变化及 生物质燃烧 Land use change and biomass burning	大气中积累 Accumulation in the atmosphere	海洋吸收 Oceanic absorption	失汇 Missing carbon	参考文献 Reference
3.6		1.8	0.5~0.8	1.0~1.3	[6]
5.2	3.3	2.5	2.0	4.0	[7]
5.0	1.3	2.9	2.4	1.0	[8]
5.4	1.6	3.4	2.0	1.6	[9]
5.3	1.8	3.0	1.0~1.6	2.5~3.1	[10]
4.8~5.8	0.4~1.6	2.9	2.5~1.8	-0.2~2.7	[11]
5.4±0.5	0.6~2.5	3.2±0.2	2.0±0.6	1.8±1.3	[12]
5.5±0.5	1.6±1.0	3.2±0.2	2.0±0.8	2.1	[13]*

* 1980~1989 年平均 1980~1989 Average value

在工业化之前,大气中 CO₂ 基本保持平衡。南极冰芯的测定结果表明,在 1750 年以前,大气 CO₂ 浓度的平均值一直维持在 280μl/L,之后大气的 CO₂ 浓度才开始增加。从 1957 年在夏威夷的 Mauna Loa 开始了对大气中 CO₂ 浓度的精确观测。20 世纪 80 年代后期以来,随着对温室效应的关注,全球性的大气 CO₂ 浓度监测网逐渐建立了起来。大气 CO₂ 积累量就是根据大气中 CO₂ 浓度的变化得出的。该积累值在 20 世纪 70~80 年代较小,在 20 世纪 90 年代后积累值增大,估计值介于 2.9~3.4 Pg C/a。

在大气碳源中,矿物燃料燃烧释放的 CO₂ 的估算比较容易可靠,因为可以利用比较详细的经济统计数据,特别是能源消耗的统计资料。目前全球的估计值介于 3.6~5.5 Pg C/a。

土地利用变化引起的陆地生态系统 CO₂ 排放,目前主要考虑对热带雨林的砍伐。但由于热带雨林的砍伐面积的统计和燃烧量的估计存在较大误差,土地利用变化释放的 CO₂ 的估计值也就存在较大变异,介于 0.4~2.5 Pg C/a。

在可能的大气 CO₂ 汇中,海洋的吸收能力相对比较容易确定。现有的多种模型的估计值和海洋测定结

果已经比较接近,如根据海洋循环模型和生物地球化学循环模型(研究可溶性有机碳随时间的变化)以及海气界面 CO_2 分压差别的测量,估计在 20 世纪 80 年代,海洋吸收 CO_2 的能力为 2 Pg C/a。对海气界面 CO_2 交换通量空间格局的估计不同研究者得出的结论也基本一致^[14]。

尽管对各种碳汇和碳源估计值存在很大变异,但是表 1 中所列的各种全球碳平衡估计中,都指出了碳失汇的存在。

对于大气中碳失汇的最合理的解释是在陆地生态系统中。从全球范围内的南北半球的年平均 CO_2 浓度记录比较看,尽管 95% 的矿物燃料燃烧都在北半球,但南半球的年平均 CO_2 浓度高于北半球,并且这种差异随着矿物燃料燃烧排放量增加而增加,这说明北半球一定有未知的大气碳汇^[12],可能与北半球的陆地面积大有关。

在过去的几年里,许多基于大气和海洋数据的独立分析^[15~18]和一系列基于森林普查资料的碳平衡估计^[19~23],已经证明了陆地生态系统中存在碳积累。尽管在不同分析中,对陆地生态系统碳积累的多少和位置有所不同,但许多研究都指出了在北半球的中纬度地区的陆地生态系统中存在一个较大的碳汇,其强度最高可达 3.5 Pg C/a^[10,16]。也有一些研究指出了陆地生态系统的碳汇可能分布在北半球的中纬度地区和热带地区^[17,18]。还有研究发现热带陆地生态系统的碳基本是平衡的,即有一个热带碳汇来平衡热带森林砍伐释放出的碳^[24]。无论如何,目前能够证明这些可能碳汇的直接证据还不够充分。

1.2 热带森林的碳源和碳汇

由于目前全球仅存的森林中,热带雨林的面积大,生物量和生产力高,在全球碳循环中具有重要作用,因此热带森林的碳源和碳汇在较早期的研究中就受到重视(表 2)。Houghton 等估算了热带地区由于森林砍伐和火灾向大气中排放的 CO_2 量^[25,26]。他们的估算分两个时间段:从 1860 年到 1980 年和 20 世纪 80 年代。结果表明热带森林是大气 CO_2 的一个重要源,其源强最大为 2.0 Pg C 左右,约为全球矿物燃料燃烧释放的 CO_2 总量的 30%。对于全球大气 CO_2 浓度及其同位素的观测也表明热带地区是一个大气 CO_2 的重要源^[16]。但是 Tian^[27]等对年际间气候变化的模拟分析,说明了巴西热带森林生态系统有时也会变为大气的一个碳汇。Philips 等^[28]进行的长期实验调查和 Grace 等^[29]对没有干扰的热带森林的局部观测结果,都确定了热带碳汇的存在。如果基于观测塔的实验测定能够反映整个生物地理群区(Biome)的特征,就可以推断热带森林在不断的积累碳,并能够补偿热带森林面积减少造成的碳排放。但事实上,观测塔往往选择在近期没有受到任何干扰的地方,很难代表整个生物地理群区的特征^[30,31],因此,仅仅根据非常有限的实验观测数据是很难判定整个热带森林具有碳汇功能。如果进一步考虑土地利用的变化,问题将更为复杂。

热带地区的碳循环研究,主要集中在美洲的亚马逊热带雨林。Dale 等对东南亚地区的热带森林进行了研究^[32],估计该地区热带森林向大气排放的 CO_2 为 0.5~0.9 Pg C/a。对非洲的热带雨林与大气间的碳交换研究还未见报道。目前美洲和欧洲科学家正在亚马逊进行的大尺度生物圈和大气圈实验(LBA, lba.

表 2 热带地区陆地生态系统的碳汇估计

Table 2 Estimations of missing carbon sinks in tropics

时段 Period	汇强 Sink (Pg C/a)	资料基础 Method	参考文献 Reference
1980s	-1.6	土地利用变化	[25]
1992~1993	-1.7±1.6	CO_2 和 $\delta^{13}\text{CO}_2$ 数据	[16]
1980s	-1.65±0.40	森林和土地利用数据	[33]
1990s	0.62±0.3	湍流相关法测定	[28]
1982 or 1992	-0.2	气象数据和 TEM 模型	[27]
1981 or 1993	0.7	气象数据和 TEM 模型	[27]
1980~1994	0.2	气象数据和 TEM 模型	[27]
1970s	-0.1	遥感数据	[34]
1990s 早期	万方数据	森林和土地利用数据	[35]

cpctec.inpe.br/lba/indexi.html),将通过研究热带雨林的气候学、生态学、生物地球化学和水文学功能及人类活动的影响,为研究热带森林碳循环提供更多的资料。

1.3 北半球中纬度地区陆地生态系统碳源和碳汇

北半球的中纬度地区是人类活动最为集中的地方,也是全球矿物燃料燃烧排放 CO_2 数量最大的区域。但是,许多研究表明,陆地生态系统的最大碳汇存在于这个区域(表 3)。这些研究包括大气中 CO_2 、 O_2/N_2 和 $\delta^{13}\text{CO}_2$ 观测结果以及大气传输的数值模拟。研究结果还表明,大气和海洋 CO_2 观测数据和反算模型得出的中纬度地区的碳汇强度比根据森林清查资料和陆地生态系统机理模型估算出的值大。近

来 Pacala^[36]等和 Fang^[37]等分别利用森林普查资料对美国和中国森林生态系统的碳积累量的估计,证实了中纬度地区碳汇的存在。对这一地区碳汇形成的解释为(1)氮沉降促进植物生长;(2)早期砍伐的森林正在恢复生长;(3)大气 CO₂ 浓度和气候变化的影响。

表 3 北半球中纬度地区陆地生态系统的碳汇估计

Table 3 Estimations of missing carbon sinks in tropics

时段 Period	汇强 Sink (Pg C/a)	资料基础 Method	参考文献 Reference
1981~1987	2~3	CO ₂ 数据	[10]
1992~1993	2.5~3.5	CO ₂ 和 δ ¹³ CO ₂ 数据	[16]
1991~1994	1.9±0.9	CO ₂ 和 O ₂ /N ₂ 数据	[18]
1988~1992	1.4±0.2	CO ₂ 数据和模型	[38]
1988~1992	2.2±0.2	CO ₂ 数据和模型	[38]
1980s	0.5~0.8	森林普查资料	[39]
1980s	0.6~1.0	森林和土地利用数据	[33]
1980s	1.0~1.2	氮沉降模型	[40]
~1990	0.58	气候和生态系统模型	[41]

2 造成碳失汇的可能原因

大部分研究者认为,全球碳循环的碳失汇主要存在于陆地生态系统中。最近十几年的基于森林普查和大气观测资料的全球碳收支研究已经证实了这一结论,但要确定碳失汇形成的机制仍然有许多困难。IGBP 总结给出了陆地生态系统中一些碳汇的估计值^[1]:北半球森林生长形成的碳汇为 0.5±0.5 Pg/a, CO₂ 施肥作用为 1.0±0.5 Pg C/a, 氮沉降施肥作用为 0.6±0.3 Pg/a。有许多研究表明,在几年到几十年的短时期内可能影响陆地碳储存的过程主要有:气候变化^[42,43], CO₂ 施肥作用^[44~47], 化肥和工业排放等人类活动引起的大气氮沉降的增加^[48~51,36], 以及受干扰森林的恢复^[52~54]。

2.1 气候变化

气候变化对陆地生态系统碳汇的影响是多方面的,目前研究的重点主要集中在陆地生态系统碳汇与气温变化的关系和气候年际变化对陆地生态系统碳汇的影响。

2.1.1 陆地生态系统中的碳汇与气温的关系 Keeling 等^[55]的数据表明全球气温每升高 1℃, 大气 CO₂ 的浓度增加大约 3μl/L (6 Pg C)。这个变化格局与由于海洋表层水变暖 CO₂ 的释放增加(或吸收减少)、变暖后呼吸速率增加(包括土壤有机质腐烂速率加快)造成的陆地生态系统的 CO₂ 释放增加的趋势一致。近来 Trumbore 等^[56]的研究证实了土壤受气候强烈影响的潜力。土壤中大部分有机碳以年或 10a 的时间尺度周转,而且对温度很敏感。

Houghton 的分析认为^[24], 自从 1940 年陆地生态系统中碳积累的年变化与全球气温存在负相关,也就是说,温度的正偏差与陆地上年碳积累量的减少相对应。这种对应关系表明每升高 1℃, 减少吸收(或增加释放)3.4~6.4 Pg C, 但碳库变化滞后温度可达 7a。CO₂ 浓度的增加和温度的变异解释了 1940 年以来碳失汇的 84%~94%。温度好象比 CO₂ 更重要, 因为 1940~1970 年中期的气候变冷与碳贮量增加相对应, 有大约 7a 滞后。1940 年以前, 温度与陆地碳储量的变化并无关系, 也许是因为其它的因素决定了碳平衡, 或者可能因为从冰核得到的大气中 CO₂ 浓度记录中的误差掩盖了这一关系。1958 年以来, 基于直接大气观测的 CO₂ 浓度, 说明了陆地生态系统的碳平衡对温度的变化速度很敏感。

Sarmiento 等^[57]利用 CO₂ 浓度和温度控制的陆地生态模型去重建历史上的碳失汇的时候, 发现了全球气温和陆地碳储量之间的相关关系。

温度对碳汇的影响可以从以下两个过程加以解释:(1)提高呼吸作用释放更多的碳;(2)提高氮的矿化刺激植物生长获得更多的碳。这两个过程都是从温度升高出发, 却得出了关于碳储量的相反的结论。因为(1)土壤中的氮主要来自有机质的矿化;(2)可利用氮的增加通常能够促进植物生长;(3)木材中的碳氮比比土壤有机质中的高, 因此, 由于温度升高, 氮矿化速率提高, 植物生长加快, 根据化学当量计算可知, 同样的氮, 在木材中储存的碳比土壤有机质分解释放的碳要多^[42,43]。

氮矿化速率加快将促进植物生长的是基于 3 个假定: 第一, 矿化后的氮将不再保留在土壤中, 第二, 矿化后的氮将从生态系统中流失, 第三, 没有其它因素会限制木质组织的生长。但是, 遗憾的是这些假定的有效性目前还没有得到证明。

有证据表明, 矿化产生的可利用氮大部分不能被植物吸收, 而是被土壤微生物所保留, 或和土壤有机

质的非生物反应而固定在土壤中,或者通过淋溶或以气体的形式从生态系统中流失。一些观察已经证明了土壤中氮的固定。首先,运用 ^{15}N 示踪研究土壤施肥表明,加入的氮有70%~90%保留在土壤中,而只有10%~30%被林木吸收^[58~60]。第二,微生物和植物对氮的竞争已证明,微生物固定氮的速度明显超过了植物吸收的速度^[61~63],贮存在土壤有机质中的氮,大多已经经过生物硝化,通常超过植物生物量中贮存的氮。由于森林的破坏,微生物矿化过程和植物吸收过程分离,会造成生态系统中的氮的流失^[64,65]。生态系统中氮的流失的数量似乎是生态系统中氮循环速率的一个函数^[66,67],这意味着增加矿化将会增加氮的流失。

2.1.2 陆地生态系统中碳汇与气候年际变化的关系 从理论上说,陆地生态系统中碳汇应该等于生态系统的净生产力(NEP),可以用下式表示:

$$NEP = NPP - RS \quad (2)$$

式中, NPP 为生态系统的净初级生产力, RS 为土壤呼吸。由于动物等对初级生产力的消耗比较小,这里就不再计算。根据生态学原理, NPP 和 RS 要受到气候的影响。生态系统的净初级生产力 NPP 存在最适温度,并受到土壤水分的制约。土壤呼吸随着温度升高和土壤水分的增加而加快。土壤水分是由大气降水的多少决定的。因此气温和降水将会影响到陆地生态系统的碳汇。由于气温和降水这两个气候因子具有明显的年际变化,这种变化也会反映到陆地生态系统的碳汇的强度上。

Dai和Fung利用较简单的Miami模型和Raich模型^[68],分别建立了 NPP 和 RS 与气候因子(降水和温度)间的相关关系,并利用全球 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的各经纬网格的1940~1988年的月平均气温和降水资料,估计了全球各网格的 NEP 。结果表明,1950~1984年,陆地生态系统积累了 $20 \pm 5 \text{ Gt C}$,主要的碳汇分布在北纬 $30 \sim 60^\circ$ 。这相当全球碳失汇的一半。

Tian等^[27]利用TEM模型,研究了由于气候的变化和大气 CO_2 浓度的增加,1980~1994年间亚马逊热带原始雨林碳库的年际变化。在El Nino年,该地区气候干热,生态系统将是一个碳源(1987年和1992年达 0.2 Pg C)。其他年份,生态系统将是一个碳汇(1981和1993年达 0.7 Pg C)。Kinderman等^[69]和Braswell等^[70]也利用模型研究了陆地生态系统碳汇对气候变化的响应。

气候对陆地生态系统碳库的影响,也可以通过实际观测得到。Goulden等^[71]在美国新英格兰的Harvard森林站对温带落叶阔叶林与大气间的 CO_2 交换通量进行了5a的观测。观测方法为湍流相关法。结果表明,1991~1995年间,该生态系统每年从大气中吸收碳 $1.4 \sim 2.8 \text{ Mg Ch/m}^2$ 。1991和1995年该碳汇较大,主要是因为光合作用的增加和呼吸作用的减少。光合作用的年际变化是由于树叶的生长和凋落时间的变化。呼吸作用的年季变化与土壤温度的异常、冬季雪量和夏季的干旱有关。作者得出结论,北半球的陆地生态系统与大气间 CO_2 交换通量的变化幅度为 1 Pg C 左右。

2.2 CO_2 施肥作用(CO_2 fertilization)

植物的光合作用强度会随大气 CO_2 浓度的升高而增加,这已经被大量实验证明。对于 CO_2 浓度对生态系统生产力的影响也得到了广泛的重视。有不少模型被用于该研究中。但是,大多数模型是用来研究和预测大气 CO_2 浓度加倍后,全球或某一区域的陆地生态系统生产力的变化。自从工业化以来,大气中 CO_2 的浓度从 $280 \mu\text{L/L}$ 增加到现在的 $355 \mu\text{L/L}$ 。对于这一过程中陆地生态系统的碳汇作用很少研究。

对 CO_2 增产作用的研究,较多采用 β 因子法。即 CO_2 浓度增加对净初级生产力影响因子。该因子一般取 0.35 ^[56]。Friedlingstein等^[72]考虑了水分、养分等因子对 β 因子的影响,得出全球 β 因子的分布图,估计出1885~1980年间,因大气 CO_2 浓度增加陆地生态系统的碳汇增加总量为 $60 \sim 97 \text{ Pg C}$,是该时期未知碳汇的62%~100%。20世纪80年代,由于 CO_2 增加的陆地生态系统的碳汇为 $1.2 \sim 2.04 \text{ Pg C/a}$ 。

2.3 氮沉降施肥作用

氮沉降的施肥作用也可能形成陆地生态系统中的碳汇。这是因为大部分地区的陆地生态系统生产力是受到氮限制的。土壤中氮的不足,影响了植物的光合作用。大气的氮沉降,特别是在欧洲和北美,比较严重。氮沉降增加了土壤中的有效氮,这将刺激植物的生长,增加木材生产和土壤中有有机碳的积累。假如100%的氮沉降能被植物同化作用,则这一碳汇的全球估计值为 1.5 Pg C/a 。无论如何,只有1/3的氮沉降能够被植物利用,而其余将被固定在土壤有机质中。植物组织比土壤有较高的碳氮比^[14]。

Townsend 等^[52]最近的分析估算,由于燃烧化石燃料造成的可利用氮沉降,陆地碳的积累量是 0.74 Pg C/a,这个估计是与在北部森林观察到的生长加速的增长相一致的(0.6~0.8Pg C/a)^[33,33,39]。模型假定 20%的沉降氮流失,80%不先经土壤库或被土壤库保留而直接被植物吸收。如果假定,流失部分作为过去沉积速度的一个函数,按地理位置变化(在低沉降地区 20%流失到高沉降地区 100%流失去模拟氮饱和)^[73],估计的碳积累量是 0.44 Pg C/a 或者比估计流失 20%的地方要少 20%。Townsend 等^[51]清楚地表明了根据氮沉降计算的碳汇对假定分配给木材的初级生产力部分的高度敏感。他们没有考虑到氮将会在土壤中被固定这种可能性。许多微生物生态学的研究表明土壤微生物过程是沉降氮固定的重要机制。而且模型对沉降氮引起的碳积累的估计需要了解被植物吸收的那部分,但是由于人们不能很好了解植物和微生物竞争氮的过程,从而不能完全去模拟它们。一部分沉降氮可能被植物吸收,可能刺激一个陆地生态系统的碳汇,但是这部分碳汇的大小目前还没有可靠的估计。

Holland 等^[40]用 5 种不同的三维大气化学模型(GCTM、GRANTOUR、IMAGES、MOGUNITA 和 ECHAM)估计了全球的氮沉降分布格局,并作为输入,用生物地球化学模型 NDEP 估计了全球由于氮沉降而引起的陆地生态系统的碳汇及其分布格局。不同模型给出的全球氮沉降量为 35.3~41.2 Tg N/a,由此而增加陆地生态系统的碳吸收 0.52~0.61 Gt C/a。MOGUNITA 模型给出全球铵态氮的沉降值为 41 Tg N/a,由此而增加的碳吸收量为 0.52~0.84 Gt C/a。模型的研究还给出了该碳汇主要出现在北半球温带及其临近地区。

近来对由于人类活动引起的氮沉降增加而引发的碳汇的估计值为 0.5~1.50 Gt C/a^[40]。不同方法估计的陆地生态系统碳汇的差异大于 10%以上。这是由于以下几个方面的差异:(1)不同的土地类型的氮代谢模拟,(2)不同化学传输模型得出的氮沉降空间分布差异,(3)氮沉降和循环增加的长期累积效应的不同评价方法,(4)沉降的氮保留在土壤中的比例不同和(5)不同碳库的碳氮比。

对于氮沉降的实验研究发现,陆地生态系统对氮沉降的响应有一个过程,先刺激植物的生长,当氮积累到一定程度,会出现氮饱和(Nitrogen saturation),植物生长不再加快,甚至会出现减产^[59,73]。氮沉降对陆地生态系统碳汇的作用,也会由于氮饱和的出现而变小。

氮沉降引起的陆地生态系统对大气碳的固定能力,主要取决于森林生态系统所能吸收的碳以及木材所固定的量。这是因为木材具有较长的生命周期和较高的碳氮比(一般为 200~500)。在以上的大部分模型研究中,认为 60%以上的大气氮沉降被固定在森林中。而近来在北美和欧洲 9 个地点的 15N 同位素标记实验研究表明,大气的氮沉降只有 3%左右被固定在木材中,而其余大部分被固定在土壤中。由于土壤的碳氮比较低(一般为 10~30),其所能够固定的碳的能力将较为有限。按照这种结果估计,全球森林所能够固定的大气碳的能力仅仅只有 0.25 Pg C/a^[63]。其值接近现有的对氮沉降所增加陆地生态系统碳汇的能力估计值的最小值(0.1~0.3)。

2.4 植物生长

植物的生长,特别是森林生态系统中的林木的生长,会增加陆地生态系统的碳积累。早期砍伐的森林,如果不再有人类的破坏,其自然生长必然会固定大气中的碳。如美国的东部,由于农业和牧业生产基地已经西移到中西部地区,大片昔日的农场和牧场被森林替代,许多早期被砍伐的森林,也正处于恢复阶段,这将成为大气中一个重要的 CO₂ 汇。对于森林生长对碳汇的影响研究,主要是利用森林资源普查资料。Dixon 等^[33]对目前这一估计研究结果进行了总结。如苏联和美国的森林分别从大气中固定 0.3~0.5 Pg C/a 和 0.1~0.25 Pg C/a。这里需要特别说明的是,由于这些估计是基于对森林生态系统普查资料得出的,并没有严格区分出是由何种原因引起的森林生态系统的碳积累。这些引起的原因中,除森林植物生长外,CO₂ 和氮沉降的施肥作用都可能促进植物生长,引起森林生态系统的碳积累^[3]。

4 结论

陆地生态系统的碳汇研究对于全球碳循环研究以及预测未来全球的气候变化有非常重要的意义。从以上的分析可以清楚地看到,陆地生态系统中的碳汇存在和大气碳不平衡的事实已经为大家所接受。但是,影响陆地生态系统的碳源和碳汇的因素和过程是多样的和复杂的,要科学地寻找和证明陆地生态系统中碳

失汇的存在地点和精确估计其数量,目前仍存在相当大困难的,这是因为:

(1)从这几种机制的作用过程看,在生态系统中,碳、氮循环是耦合在一起的,两者都受到大气温度和降水的影响,但是影响的过程和程度是不同的。 CO_2 和氮沉降同时作用于生态系统的碳循环和氮循环,但是作用的机制是不一样的。大气中的 CO_2 、 NO_x 、温度和降水可能是同时变化的,因此要区分各种机制的作用程度是相当困难的。

尽管影响陆地生态系统碳汇的4种机制,即气候变化、 CO_2 施肥、氮沉降施肥和早期破坏后的森林的再生,都已被提出了,但是它们的相对重要性存在很大的不确定性。大约 $1/3$ 的碳失汇或 $0.6 \pm 0.5 \text{ Pg C/a}$ 已经在北部森林中观察到,但是北部森林固定碳的机制还不清楚。

(2)从研究方法看,可以用于研究陆地生态系统碳汇形成机制的方法有森林普查资料、样地调查、卫星遥感技术和计算机模拟技术。事实上,无论森林普查资料还是样地调查资料,所监测出的森林生态系统的碳积累已经不但包括了森林生长所积累的碳,而且也包括了氮沉降和气候变化所积累的碳。计算机模拟虽然从理论上能够区分出各种机制的作用,但是目前的模拟研究只是对单一机制的研究,并没有包括两种以上的机制,估算陆地生态系统的碳汇。

由于该问题的复杂性,以至有些科学家已经认为寻找陆地生态系统的碳失汇,平衡大气中的 CO_2 收支是不可能的。无论如何,如果陆地生态系统碳失汇问题没法回答,对未来由于大气 CO_2 浓度增加所引起的气候变化的预测将是缺乏根据的,因此,必须通过增加实验观测和获得全球的土地利用、气候、植被和土壤碳氮动态详细资料,将多种研究方法结合起来,各国科学家共同协作。

参考文献

- [1] IGBP Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto protocol. *Science*, 1998, **280**:1393~1394.
- [2] Lawler A. Research limelight falls on carbon cycle. *Science*, 1998, **280**:1683~1684.
- [3] Houghton R A, Davidson E A and Woodwell G M. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance. *Global Biogeochem. Cycles*, 1998, **12**:25~34.
- [4] Wang X, Zhuang Y and Feng Z. Carbon dioxide release due to change in land use in China mainland. *J. Environ. Sci.*, 1994, **6**(3):287~295.
- [5] Wang X and Feng Z. Atmospheric carbon sequestration through agroforestry in China. *Energy*, 1995, **20**(2):117~121.
- [6] Reiners W A. A summary of the world carbon cycle and recommendations for critical research. In: Woodwell G M and Pecan E V eds. *Carbon and Biosphere*. CONF72~0510, National Technical Information Service, Springfield, VA. 1973:368~382.
- [7] Woodwell G M. Biotic effects on the concentration of atmospheric carbon Dioxide: A review and projection, in *Changing Climate*. Natl. Acad., Washington, D. C.. 1983:216~241.
- [8] Trabalka J R ed. *Atmospheric Carbon Dioxide and the Global Carbon Cycle*, US Department of Energy, DOE/ER~0239, Washington DC. 1985.
- [9] Houghton J T, Jenkins G J and Ephraums J J. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. New York: Cambridge Univ. Press, 1990:283~310.
- [10] Tans P P, Fung I Y and Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO_2 budget. *Science*, 1990, **247**:1431~1438.
- [11] Sedjo R A. Temperate forest ecosystems in the global carbon cycle. *Ambio*, 1992, **21**:274~277.
- [12] Siegenthaler U And Sramiento J L. Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature*, 1993, **365**:119~125.
- [13] 13 IPCC. *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1994.
- [14] Fan S, Gloor M, Mahlman J, *et al.* North American carbon sink. *Science*, 1999, **283**:1815.
- [15] Fan S M, Wofsy S C, Bakwin P S, *et al.* Atmosphere-biosphere exchange of CO_2 and O_3 in the central Amazon forest. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**:16851~16864.
- [16] Ciais P, Tans P P, White J W C, *et al.* Partitioning of ocean and land uptake of CO_2 as inferred by d^{13}C measurements from the NOAA Climate Monitoring and Diagnostics laboratory global air sampling network. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**:5051~5070.
- [17] Enting I G, Trudinger C M and Francey R J. A synthesis inversion of the concentration and d^{13}C of atmospheric CO_2 . *Tellus, Ser. B*, 1995, **47**:35~52.
- [18] Keeling C D, Chin F S and Whorf T P. Increased activity of northern Vegetation inferred from atmosphere CO_2 measurements. *Nature*, 1996, **382**:146~149.

- [19] Kauppi P E, Mielikainen K and Kuusela K. Biomass and carbon budget of European forests, 1971~1990, *Science*, 1992, **216**:70~74.
- [20] Birdsey R A, Plantinga A J and Heath L S. Past and prospective carbon storage in United States forests. *For. Ecol. Manage.*, 1993, **58**:33~40.
- [21] Kolchugina T P, and Vinson T G. Carbon sources and sinks in forest biomes of the former Soviet Union. *Global Biogeochem. Cycles*, 1993, **7**:291~304.
- [22] Apps M J, and Kurz W A. The role of Canadian forests in the global carbon budget. In: M Kanninen. *Carbon Balance of World's Forested Ecosystems; Towards a Global Assessment*. Acad. Of Finland, Helsinki, 1994; 14~39.
- [23] Turner D P, Koerper G J, Harmon M E, *et al.* A carbon budget for forest of the conterminous United States. *Ecol. Appl.*, 1995, **5**:421~436.
- [24] Houghton R A. Effects of land-use change, surface temperature, and CO₂ concentration on terrestrial stores of carbon. In G M Woodwell and Mackenzie F T eds, *Biotic Feedbacks in the Global Climatic System; Will the Warming Feed the Warming?*, New York: Oxford Univ. Press, 1995; 333~350.
- [25] Houghton R A, and Hackler J L. Continental scale estimates of the biotic carbon flux from land cover change: 1850~1980. Rep. , ORNL/CDIAC-79, NDP-050, Oak Ridge Nat. Lab. , Oak Ridge, Tenn. , 1995.
- [26] Houghton R A. The flux of carbon from terrestrial ecosystems to the atmosphere in 1980 due to changes in land use: Geographic distribution of the global flux. *Tellus Ser B.* , 1987, **39**:122~139.
- [27] Tian H, Mellilo J M, Kichlighter D W, *et al.* Effects of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. *Nature*, 1998, **396**:664~667.
- [28] Philips O L, Malhi Y, Higuchi N, *et al.* Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. *Science*, 1999, **282**:5388~5389.
- [29] Grace J, *et al.* Carbon dioxide outpace by an undisturbed tropical rain forest in southwest Amazonia, 1992 to 1993, 1995, *Science*, 1995, **270**:778~780.
- [30] Keller M, Clark D A, Clark D B, *et al.* If a tree falls in the forest. *Science*, 1996, **273**:201.
- [31] Houghton R A. Terrestrial carbon storage: Global lessons for Amazonian research. *Ciencia e Cultura Sao Paulo.* , 1997, **49**:58~72.
- [32] Dale V H. Effects of Land-Use Change on Atmosphere CO₂ Concentrations; South and Southeast Asia as a Case Study. New York, USA; Springer-Verlag, 1994.
- [33] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, **263**:185~190.
- [34] Skole D, and Tucker C. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon; satellite data from 1987 to 1988. *Science*, 1993, **260**:1905~1910.
- [35] Fearnside P M. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia; net committed emissions. *Climate Change*, 1997, **35**:321~360.
- [36] Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, *et al.* Consistent land- and atmosphere-based U. S. carbon sink estimates. *Science*, 2001, **292**:2316~2320.
- [37] Fang J, Chen A, Peng C, *et al.* 2001, Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, **292**:2320~2322.
- [38] 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.
- [39] Houghton R A. Historic role of forests in the global carbon cycle. In Kohlmaier G H, Weber M and Houghton R A I eds, *Carbon Dioxide Mitigation in Forestry and Wood industry*. New York; Springer-Verlag, 1997.
- [40] Holland E A, *et al.* Variations in the predicted spatial distribution of atmospheric nitrogen deposition and their impact on carbon uptake by terrestrial ecosystems. *J. Geophys. Res.* , 1997, **102**:15849~15866.
- [41] Cao M And Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, **393**:249~252.
- [42] Rastetter E B, Ryan M G, Shaver G R, *et al.* A general biogeochemical model describing the responses of the carbon and nitrogen cycles in terrestrial ecosystems to changes in CO₂, climate, and nitrogen deposition. *Tree Physiology*, 1991, **9**:101~126.
- [43] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, *et al.* Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, **363**:234~240.
- [44] Strain B K and Cure J D eds. *Direct Effects on Increasing Carbon Dioxide on Vegetation, Rep.* DOE/ER-0238, U. S. Dep of Energy, Washington, D. C. , 1985.
- [45] Amthor, J S. Terrestrial higher-plant response to increasing atmospheric CO₂ in relation to the global carbon cycle. *Global Change Bio.* , 1995, **1**:243~274.

- [46] Wullschlegel S D, Post W M and King A W. On the potential for a CO₂ fertilization effect in forests: Estimates of the biotic growth factor, based on 58 controlled -exposure studies. In: Woodwell G M and Mackenzie F T eds. *Biotic Feedbacks in the Global Climatic System: Will the Warming Feed the Warming?* New York: Oxford Univ. Press, 1995:85~107.
- [47] Koch G W and Mooney H A Eds. *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems*. San Diego, Calif. : Academic Press, 1996.
- [48] Peterson, B J and Melillo J M. The Potential storage of carbon by eutrophication of fir biosphere. *Tellus. Ser. B*, 1985, **37**:117~127.
- [49] Schindler D W and Bayley S E. The biosphere as an increasing sink for atmospheric carbon: Estimates from increased nitrogen deposition. *Global Biogeochem. Cycles*, 1993, **7**:717~733.
- [50] Galloway J N, Schlesinger W H, Levy H, et al. Nitrogen fixation: Anthropogenic enhancement-environmental response. *Global Biogeochem. Cycles*, 1995, **9**:235~252.
- [51] Townsend A R, Braswell B H, Holland E A, et al. Spatial and temporal Patterns in terrestrial carbon storage due to deposition of fossil fuel nitrogen. *Ecol. Appl.*, 1996, **6**:806~814.
- [52] Houghton R A. Is carbon accumulating in the northern temperate zone?. *Global Biogeochem. Cycles*, 1993, **7**:611~617.
- [53] Houghton R A. Terrestrial sources and sinks of carbon inferred from terrestrial data. *Tellus. Ser B*, 1996, **48**:420~432.
- [54] Kurz W A, Apps M J, Beukema S J, et al. 20th century carbon budget of Canadian forests. *Tellus, Ser B.*, 1995, **47**:170~177.
- [55] Keeling C D, Bacastow R B, Carter A F, et al. A three-dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds. I. Analysis of observational data. In: Peterson D H. Aspects of Climate Variability in the Pacific and the Western Americas, Washington, D. C. : Geophys. Monogr Ser. , AGU, 1989, **55**:165~236.
- [56] Trumbore S E, Chadwick O A and Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science*, 1996, **272**: 393~396.
- [57] Sarmiento J L, Le Quere C and Pacala S W. Limiting future atmospheric carbon dioxide. *Global Biogeochem. Cycles*, 1995, **9**:121~137.
- [58] Binkley D. Forest Nutrition Management, New York: John Wiley, 1986.
- [59] Aber J D, Magill A, McNulty S G, et al. Forest biogeochemistry and primary production altered by nitrogen saturation. *Water Air Soil Pollut.*, 1995, **85**:1665~1670.
- [60] Nadelhoffer K J, Downs M R, Fry B, et al. The fate of 15N-Labelled nitrate additions to a northern hardwood forest in eastern Maine, USA. *Oecologia*, 1995, **103**:292~301.
- [61] Jackson L E, Schimel J P and Firestone M K. Short-term partitioning of ammonium and nitrate between plants and microbes in an annual grassland. *Soil Biol. Biochem.*, 1989, **21**:409~415.
- [62] Schimel J P, Jackson L E and Firestone M K. Spatial and temporal effects on plant-microbial competition for inorganic nitrogen in a California annual grassland. *Soil Biol. Biochem.*, 1989, **21**:1059~1066.
- [63] Zak D R, Groffman P M, Pregitzer K S, et al. The venial dam plant-microbe competition for nitrogen in northern hardwood forests. *Ecology*, 1990, **71**:651~656.
- [64] Bomann, F H and Likens G E. Pattern and Process in a Forested Ecosystem, New York: Springer-Verlag, 1979.
- [65] Swank W T, Waide J B, Crossley Jr D A L, et al. Insect defoliation enhances nitrate export from forest ecosystems. *Oecologia*, 1981, **51**:297~299.
- [66] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, et al. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **8**:279~293.
- [67] Davidson E A. Linkages between carbon and nitrogen cycling and their implications for storage of carbon in terrestrial ecosystems. In Woodwell G M and Mackenzie F T eds. *Biotic Feedbacks in the Global Climatic System: Will the Warming Feed the Warming?*, New York: Oxford Univ. Press, 1995:219~230.
- [68] Dai A And Fung I Y. Can climate variability contributes to the "missing" CO₂ sinks. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**:599~609.
- [69] Kindermann J, Wurth G, Kohlmaier G H, et al. Interannual variation of carbon exchange fluxes in terrestrial ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**:737~755.
- [70] Braswell B H, Schimel D S, Linder E, et al. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature. *Science*, 1997, **278**:870~872.
- [71] Goulden M L, William Munger J, Fan S M, et al. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: Response to interannual climate variability. *Science*, 1996, **271**:1576~1578.
- [72] Friedlingstein P, Fung I, Holland E, et al. On the contribution of CO₂ to the missing biospheric sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**:541~556.
- [73] Aber J D, Nadelhoffer K J, Steudler P, et al. Nitrogen saturation in Northern forest ecosystems. *BioScience*, 1989, **39**:378~386.