

过去陆地生态系统碳储量估算研究

遇蕾^{1,2}, 任国玉¹

(1. 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 准确估算陆地生态系统碳储量并认识其空间分布和时间演变规律是碳循环研究的关键问题。本文回顾了全球与中国陆地生态系统在碳储量估算研究方面的若干进展, 包括基于各种方法和资料的主要估算结果及其尚存在的不确定性。重点评述了末次盛冰期和中全新世两个时期陆地生态系统碳储量的变化及其影响因素, 对 8.2kaB.P. 以来全球大气 CO₂ 浓度呈现升高的现象及其可能原因进行了讨论。全新世中晚期全球大气 CO₂ 浓度逐渐升高与旧大陆地区陆地生态系统碳储量减少的事实是一致的, 新石器时期特别是农业文明开始以后人类活动对陆地植被的持续干预可能是造成陆地生态系统碳储量减少的原因之一。

关键词: 陆地生态系统; 碳储量; 末次盛冰期; 全新世; 中国

1 引言

陆地生态系统碳循环和碳储量研究是全球变化科学的一个重要组成部分。陆地生态系统碳储量既是陆地生态系统与大气碳交换的基本参数, 也是估算陆地生态系统吸收和排放含碳气体数量的关键要素^[1]。相对于大气、海洋、岩石圈等碳库而言, 陆地生态系统碳库的估算结果存在较大争议, 有很大的不确定性^[2-5]。因此, 准确了解当前陆地生态系统碳储库的大小、位置, 碳排放和碳吸收通量, 切实评估不同类型植被和土壤的碳存储能力, 对于通过增加陆地碳存储量减缓可能的人为气候变化^[3]、减少全球碳循环通量与收支评价的不确定性以及了解碳循环动态的控制与反馈机制, 均具有重要意义^[4,6]。

过去全球变化研究为深入了解地球系统的演化机制和演变历程提供了科学基础。作为全球碳循环中重要的碳库——陆地生态系统碳库, 其碳储量的过去变化是了解碳循环中地-气相互作用的关键问题之一。由于代用资料和研究技术的局限性, 对晚第四纪陆地生态系统碳储量的估算, 目前主要集中在末次盛冰期(20~18kaB.P.)和中全新世(8~6kaB.P.)两个时期。末次盛冰期(LGM)以来, 陆地生态系统碳储量存在较大幅度的变化^[7-15], 这种变化会通过碳循环中的地-气相互作用系统对大气中含碳气体的浓度变化产生影响。在全新世(Holocene)阶段, 冰芯记录^[16-18]表明, 大气 CO₂ 和 CH₄ 浓度也存在一定变化, 有些学者^[16,18-21]将这种变化归因于陆地生态系统碳储量的变化, 但目前对其解释还没有达成共识。因此, 陆地生态系统碳储量的时间演变规律将对解释大气中含碳气体的这种变化特征提供参考依

收稿日期: 2007-01; 修订日期: 2007-05.

基金项目: 科技部“十五”科技攻关项目课题“全球与中国气候变化的检测和预测”。

作者简介: 遇蕾(1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事古气候与气候变化研究。E-mail: yuleilucky@gmail.com

通讯作者: 任国玉, E-mail: guoyoo@cma.gov.com

据。探究末次盛冰期以来尤其是全新世大气中 CO_2 浓度与陆地生态系统演化之间的关系, 对于科学地预测未来大气 CO_2 浓度变化具有实际意义。

本文评述了全球和中国陆地生态系统碳储量估算的主要结果。对于现代陆地生态系统碳储量的研究进展, 已有学者作了详细的总结^[22-27], 本文只做简要评述。我们重点回顾国内外学者对末次盛冰期(LGM)和中全新世(MH)两个时期碳储量变化及其影响因素的若干研究进展, 并对 8.2kaB.P. 以来全球大气 CO_2 浓度的升高现象及其可能原因进行初步探讨。

2 现代陆地生态系统碳储量

2.1 全球陆地生态系统碳储量估算

已有的研究表明^[28-38], 现代全球植被碳储量的估计范围在 500~800Gt, 全球土壤碳储量为 700~2 500Gt, 全球陆地生态系统碳储量为 1 500~2 900Gt(图 1)。土壤碳库大致是植被碳库的 1.5~3 倍, 而凋落物碳库只占其中的很小一部分。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告^[33]给出的现代陆地生物圈植被和土壤碳储量分别为 658Gt 和 2 322~2 559Gt, 介于上述估计的范围之内。从全球不同植被类型的碳储量情况来看, 陆地生态系统碳储量主要在森林地区^[39]; 从不同的气候带来看, 碳储量主要在热带地区, 其次为温带森林和草地, 以及北方森林、冻原、湿地、耕地及荒漠和半荒漠地区^[40], 这与全球碳密度的空间分布格局相一致。

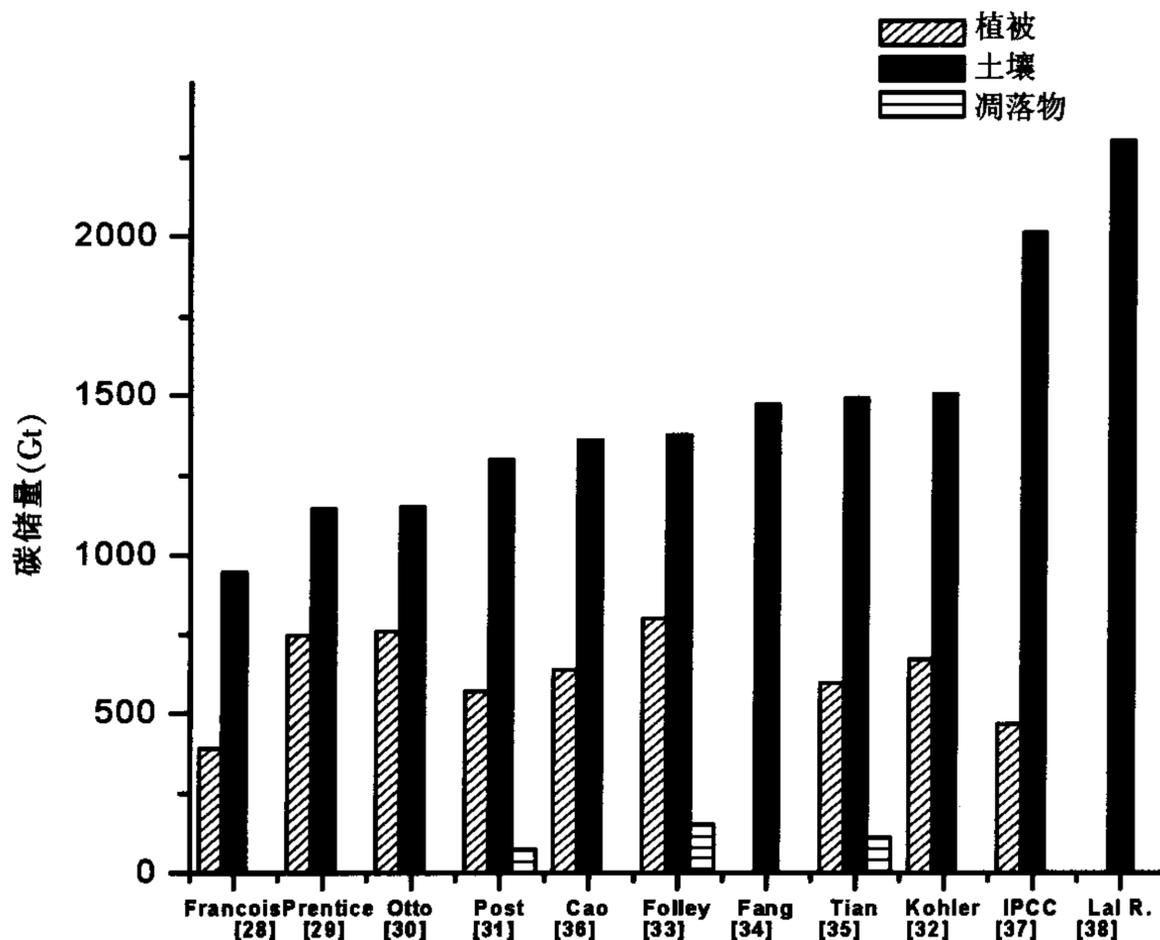


图 1 不同作者给出的现代全球陆地生态系统碳储量

Fig.1 Estimates of the global terrestrial carbon storage given by different authors

(横坐标为文献作者及参考文献, 纵坐标为计算的碳储量, 按照土壤数值大小排列)

一般认为陆地生态系统中, 土壤碳库估算存在较大的不确定性, 主要源于土壤母质(粘

土含量、土壤排水层次、矿物结构等)理化结构的复杂和土壤参数(容重、深度、面积等)选取的不同,另外土壤有机碳密度的空间变异很大,很难确定不同区域和不同类型的代表值^[41];同时对土壤形成阶段、时间、条件等因素考虑的不充分,所得结果与实际也有很大的差异;受温度、降水等气候因素的影响,仅仅以有限的样地对其他地区进行外推估计,所得到的碳密度精度不高,很难用于全球或区域尺度的计算。工业革命以来,由于人类在农业、林业等方面的活动,陆地生态系统土壤碳库有机碳流失严重,这部分碳经由不同过程进入大气、海洋,导致碳通量和碳收支的变化,引起大气中含碳气体浓度的变化。此外,人类活动还可通过影响其他自然因子(气候、地形、母质)而对土壤碳存储产生作用。但是,确定时间内植被的恢复以及人类活动对土壤碳库的影响很难量化,这在很大程度上增加了陆地碳储量估算的难度。

2.2 中国陆地生态系统碳储量估算

中国陆地生态系统碳储量的研究方兴未艾,并取得了若干重要成果。方精云等^[38]认为,中国陆地植被总碳量仅为 6.1Gt,而土壤有机碳库则高达 185.7Gt,其中 21%在青藏高原;Ni^[42]基于对植被和土壤碳密度的估计,得到中位水平植被生物量为 35.23Gt,土壤有机碳库为 119.76Gt,认为草地、疏林和灌丛、高山植被等植被类型的土壤有机碳库在碳储存方面作用显著;王效科^[43]以各林龄级森林类型为统计单元,得出中国森林生态系统的植物碳储量为 3.26~3.37Gt,同时发现中国森林生态系统植物碳密度与所在省份的人口密度呈显著负相关;潘根兴^[44]根据二次土壤普查的全国 2500 个土样分析数据,估算我国土壤总的有机碳含量为 50Gt;李克让^[45]应用 0.5 度经纬网格分辨率的气候、土壤和植被驱动的大气碳交换(CEVSA)模型得到土壤碳量为 82.65Gt,与金峰^[46]按照土壤类型估算结果 { 1.77Gt 相接近;而解宪丽^[47]基于中国第二次土壤普查资料,估算出各植被类型下的 1m 和 20cm 土层剖面的土壤碳储量分别为 69.4Gt 和 23.8Gt,低于李克让的结果;王绍强^[48-50]使用实测生物量和植被分布数据对中国陆地自然植被碳密度和碳储量空间分布进行了研究,认为:中国陆地总体上表现出东部地区植被碳密度和碳储量随纬度增加而降低的趋势,但东北地区的寒温带、温带山地针叶林植被碳密度和碳储量很高;北部地区植被碳密度和碳储量具有随经度减小而递减的趋势,与前人的结论相一致。最近,周国逸^[51]在对鼎湖山国家自然保护区内成熟森林(林龄>400 年)土壤有机碳进行的观测的结果显示,该森林 0~20cm 土壤层的有机碳贮量以平均每年每公顷 0.61t 的速度增加。这表明成熟森林可持续积累碳,因此可能是重要的碳汇。

表 1 列出了中国学者给出的陆地生态系统碳储量估算结果。总体来看,各个研究组的估算结果还存在较大差异,说明距离精确估计中国现代陆地生态系统碳储量还有一定差距。造成估算差异的主要原因是样地自然地理状况的差异性、植被类型划分及土壤界限的不统一、基础数据测量和使用的差异以及不同项目研究的目的和方法的不同等。由于估算范围较大,目前还无法充分认识中国陆地生态系统碳储量对全球变化的重要性。

3 末次盛冰期和中全新世陆地生态系统碳储量

3.1 估算方法及其可靠性

估算过去的碳储量主要有以下三种方法:(1)利用古生态数据重建陆地植被从而得到碳

表 1 中国陆地生态系统碳储量估算结果比较

Tab.1 Comparison of estimates of the terrestrial carbon storages in China

作者	研究方法	植被碳储量 (Gt)	土壤碳储量 (Gt)
王效科 ^[43]	基于生物量和蓄积量的关系	森林生态系统碳库: 3.26~3.73	
周玉荣 ^[52]		森林生态系统植被碳库: 6.20	森林生态系统土壤碳库: 21.02 森林生态系统凋落物层碳库: 0.89
方精云 ^[38]	材积普查方法及土壤碳量的计算公式	草地生态系统植被碳库: 1.23	草地生态系统土壤碳库: 74.74
Li ^[53]	反硝化分解模型 (DNDC)		农田生态系统土壤碳库: 2.9~8.9
王绍强 ^[48]	基于生物量和蓄积量的关系	东北地区植被碳库: 2.81	东北地区土壤碳库: 26.43
李克让 ^[36]	大气碳交换模型 (CEVSA)	13.33	82.65
Ni ^[42]	陆地生物圈模型(BIOME3)	中位水平的植物生物量: 35.23	119.76
Peng ^[54]	古植被图+OBM (Osnabruck 生物圈模型)	57.9	100.0
方精云 ^[55]	材积普查方法及土壤碳量的计算公式	6.1	185.7
于东升 ^[56]	基于土壤类型和碳密度资料估计		89.14
王绍强 ^[50]	同上		61.5~121.1
潘根兴 ^[44]	同上		50

储量^[10-13,57]。通过对孢粉、古土壤、湖泊沉积及其他沉积物的古生态重建,利用其组合定量和半定量估算当时的植被和土壤碳含量,并外推到整个陆地生态系统。其基本原理与估算现代碳储量的碳密度方法相一致,但一般不考虑生态系统在不同生长环境的地域差异和随时间演变的生理变化。从全球来看,由于末次盛冰期以来的古环境代用资料比较贫乏、分散,采用这种方法对全球陆地生态系统碳储量进行估算还存在着较大的不确定性;但对于古生态资料丰富的地区,用这种方法估算区域生态系统碳储量还是较理想的。(2)基于大气环流模式模拟出古气候状况,并运用生物-气候方法或与模型耦合,重建古植被的时空分布,进而计算碳储量^[14,15,30,57,58]。虽然在全球或大尺度的计算上优于第一种方法,而且能够模拟出生态系统对温度和 CO₂ 浓度倍增的响应,但是模式参数(如 SST、SSH、CO₂ 的浓度等)的设置与选取,与实际情况并不完全相符合,只能得到给定情景下碳储量的估计结果。(3)根据海-陆碳同位素平衡的原理估计陆地生态系统碳储量^[9,59]。考虑到地质时期碳平衡关系可能与目前有所不同,同时由于海洋生物循环过程的复杂性,估算的结果也可能存在较大的偏差。

3.2 末次盛冰期和全新世中期陆地生态系统碳储量的估算

表 2 列出末次盛冰期、中全新世和现在三个时期的全球陆地生态系统碳储量的比较。采用各种估算方法所获得的结果相差很大。末次盛冰期阶段陆地生态系统碳储量比现代小得多,估算的现代与 LGM 的差值一般处于 600~1 300GtC 间;全新世中期(MH)陆地植被覆盖一般较现代好,大部分碳储量的估算结果也比现在略高,但也有部分学者获得相反结果^[60],差值在-130~350GtC 之间。中国与全球碳储量的变化趋势大体是一致的。Peng^[54]基于古植被图和模型的结果显示,现代陆地生态系统碳储量高于末次盛冰期 90Gt,低于中全新世 25.5Gt。

表 2 末次盛冰期以来全球陆地生态系统碳储量估算

Tab.2 Estimates of terrestrial carbon storage changes since the Last Glacial Maximum

方法	碳储量的变化 (差值 Gt)		作者 (发表年份)
	现在-末次盛冰期	现在-全新世中期	
古生态、古环境	1350		Adams (1990) ^[8]
	750~1050		Crowley (1995) ^[9]
同位素分析	1708	-27	Adams (1998) ^[10]
	270~720		Bird (1994) ^[59]
生物气候方法	610		Crowley (1995) ^[9]
	±50		Prentice (1990) ^[28]
CARAIB	612±105		Friedlingstei (1995) ^[14]
	-710~70	-132~92	Francios (1999) ^[61]
GCM+	828~1106		Otto(2002) ^[35]
	DEMETER		Foley(1995) ^[62]
Bern CC	600		Kolher(2004) ^[36]
DGVM	821	347	Kaplan(2002) ^[63]
LPJDGVM	820	-40	Joos(2004) ^[60]
HadSM3_TRIFFID	540		Crucifix(2005) ^[64]
一维的海洋模式	630		Ikeda(2002) ^[65]

GCM: 大气环流模式; DEMETER: 地球陆地生态系统与资源的动力和能量模式; CARAIB: 生物圈碳同化作用模式; Bern CC: Bern 碳循环气候模式; DGVM(LPJDGVM/HadSM3_TRIFFID): 全球动态植被模式

3.3 末次盛冰期以来陆地生态系统碳储量估算的影响因子

3.3.1 植被演变

末次盛冰期以来植被的自然演变是影响陆地生态系统碳储量变化的主要原因之一。Foley^[30]基于 GENESIS 大气环流模式,利用 DEMETER 生态模式模拟得到全新世中期(MH)和现代不同植被类型和气候条件下的陆地碳储量变化,认为植被碳库和凋落物碳库的碳量分别大于现在的 4%和 10%,土壤碳量则略小于现在,其主要原因是北方森林和草原取代了原本生产力较低的苔原和荒漠;20 世纪 90 年代以来,在全球研究的基础上,国家和区域尺度的研究也有了长足的进步。Velichko 等^[13]利用植被的碳密度方法计算了欧亚大陆北部 LGM 和 MH 时期的碳储量,结果分别为 29.9Gt 和 131.4Gt,他们也把冰期和间冰期陆地生态系统碳储量的变化归结为植被分布的变化;用同样的方法,Lioubimtseva 等^[11]对撒哈拉地区陆地生态系统碳储量的变化进行了估算,认为 LGM 阶段碳储量比现代低 47~70Gt,MH 时期则比现代高 78~143Gt;Mayle 等^[66]在对亚马逊流域碳储量的研究中得到,LGM 时期碳储量为 135 Gt,不足现在的一半,而 MH 时期则增加到 227Gt,这是因为全新世时期热带常绿林取代了 LGM 时期的落叶林。

产生植被演变的原因包括气候变化影响和人类活动干预。Crucifix^[64]运用 HadSM3-TRIFFID 模型研究认为,C₃和 C₄植物的生长及对水分有效吸收率的差异是末次盛冰期至前工业革命时期陆地生态系统碳储量变化的主要原因。Ni 等^[67]基于 FOAM 模型所输出的现代(0ka)、全新世中期(6ka)和全新世早期(11ka)气候数据,利用 LPJ-DGVM 模型对中国东北部、中部、南部三个主要森林覆盖区和北非的萨赫尔地区进行了模拟,认为气候对于植被的

动力演变起着重要的作用,主要体现在增加水分的有效吸收率会造成中国地区的树木演变为草原来缓解干旱所带来的压力,而对萨赫尔地区则减少自然火的出现,有助于草木生长。因此,在降水发生变化的情况下,森林和草原的面积会产生相应的变化,陆地生态系统碳储量也随之变化。这与早先的研究结果^[68]相一致。何勇等^[69]利用 AVIM 模式模拟中国陆地植被 NPP 的分布,认为 21kaB.P.的主要影响因子是温度,而降水是影响 6kaBP 及现代植被 NPP 的主要因子。植被这种生物效应,对利用干燥地区和半湿润地区等受水分影响较大区域的降水重建序列作为进行碳储量估算的古气候背景时,会产生不可避免的误差。

以上研究似乎表明,在从冰期向间冰期转换阶段,热带地区碳储量的变化比中高纬度陆地要明显。Brovkin 等^[70]用 CLIMBER-2 模式估算全新世暖期全球陆地生态系统碳储量,结果比现在高 90Gt,认为源于北半球副热带地区的植被变化发挥了重要作用;Manslin 等^[71]认为,在 LGM 向 MH 过渡的过程中,全球陆地植被的变化至少会产生 1000GtC 的碳储量变化,但目前的研究还很难给出精确的估算结果。因此,对于千年尺度的陆地生态系统碳储量的变化而言,植被演变在大气和陆地之间碳交换的过程中发挥了重要作用。已有的研究表明^[70,71],森林的演变是碳储量变化的关键,但具体是全球哪个位置的森林植被演变对全球的碳储量起到主要作用还没有达成共识。

3.3.2 土壤因子

土壤有机质是陆地生态系统碳储量的主要构成部分,LGM 以来陆地土壤有机质含量的变化也是确定无疑的。但由于古土壤代用资料比植物花粉资料还缺乏,目前重建末次盛冰期以来全球大陆古土壤有机质序列是不切实际的,一般只能通过模型模拟来推断。模型本身有很大局限性,很难模拟出长期气候变化和人类干预条件下的真实土壤状态。现代土壤受人类耕种的影响更加严重^[72],对于具有相同土壤性质和气候条件的同一地区的耕地土壤和非耕地土壤样本进行配对检验表明,土壤有机碳储量存在很大差异。

在区域尺度上,建立土壤有机碳储量时间序列也有很大难度。中国的黄土-古土壤序列记录了晚中新世以来的气候变化和生态演化历史^[73,74],但还没有建立完整的古土壤有机碳含量时间序列数据库。我国北方科尔沁沙地^[75,76]、浑善达克沙地和毛乌素沙地等地也有大量全新世沙丘古土壤序列记录,但获得整个沙地的近 1 万年来土壤有机碳储量时间序列同样存在困难。有学者以贵州喀斯特原始森林保护区为例进行了探索^[77],在贵州茂兰喀斯特原始森林保护区内农林生态系统发生转变的地域,利用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法测定未受人类干扰情况下的古土壤有机质含量,可以把时间推至千年以前,作为估算过去土壤碳密度的参考。这比直接利用现代碳密度估算过去土壤碳储量方法所得结果更有说服力,但仍无法推断更早时期情况。

鉴于以上分析,研究陆地生态系统碳储量时间演变规律的关键在于提高对古土壤碳储量估算的精度;在方法上要重点考虑对古环境的恢复、实验技术的提高以及与模型模拟的配合。这也是对千年尺度以上生态系统碳储量进行精确估算的关键所在。

3.3.3 其它因子

CO₂“施肥”效应:观测和模型研究表明^[78,79],CO₂的“施肥”效应很明显。随着大气中CO₂浓度增高,植物的光合作用加强,陆地植被获得较高的生产力,从而导致陆地生态系统碳储量

的增加。从末次盛冰期到全新世,由于 CO₂ 的这种“施肥”效应可能引起陆地生态系统碳储量 160~500Gt 的增加^[14,61]。但是,依据植被-气候关系方法的估算结果一般没有考虑这部分碳,这导致对全新世中期陆地生态系统碳储量的估计结果偏小。

泥炭发育:泥炭是 LGM 以来陆地生态系统碳储量变化的一个重要分量。北方泥炭形成一般始于早、中全新世,有研究认为其储量约为 165~540Gt^[10,16,39,80]。近几千年以来,北半球泥炭或是陆续被埋藏,或是继续发育,一些地区发育速度更快。泥炭有机碳的含量随深度存在很大的变化^[81],加之过去泥炭发育的历史不是很清楚,因此很难对泥炭的贡献进行精确的定量评价。泥炭的这部分碳量及其变化未纳入陆地碳储量演化的估算中,或者对其描述不准确,势必会造成额外的误差。

4 8.2kaB.P.以来全球大气中 CO₂ 浓度升高的可能原因

研究过去大气成分的组成,尤其是含碳气体的浓度变化,是为更好地探究其目前变化的规律和科学预测其未来变化的基础。冰芯研究是认识过去大气成分的有效方法之一。冰芯记录表明^[82],冰期时大气中 CO₂ 浓度低,一般仅有 180ppm 左右;而间冰期时大气中 CO₂ 浓度高,一般可达 280ppm 左右。长期以来对过去大气中温室气体浓度变化的研究多集中在万年时间尺度上^[8,41,83-86],一般认为千年尺度上的变化不明显。

但是,Indermuhle et al^[6]的研究发现,全新世大气中 CO₂ 浓度也存在明显的变化,由 10.5 kaB.P.的 268ppm 缓慢减少到 8.2kaB.P.的 260ppm 后,突然开始增加,直至 1kaB.P.的 280ppm 左右,随后的一千年里上下平稳波动直至工业革命前的 285ppm,这一现象是传统理论所难以解释的。他们用 Bern CC 模型的模拟表明,7 kaB.P.~1 kaB.P.之间,气候变化和人类活动导致全球陆地生态系统的生物量减少了 200Gt 左右,认为这是 8ka 以后大气中 CO₂ 浓度升高的主要原因之一。其后,不同学者就 8.2kaBP 以来大气中 CO₂ 浓度变化的原因展开了研究。其中主要分为三种观点:其一,认为气候长期变化及其陆地生态系统生物量(可换算成碳储量)的自然减少^[6,30,62];其二,认为可能是海洋过程中碳循环的变化引起的^[63,87],这两种解释已有传统理论的支持;第三种解释认为人类的活动,尤其是前工业时期人为因素引起欧洲和亚洲等地区森林的退化,可能是造成陆地生态系统碳储量减少的主要原因,并可能是近 8 千年来大气中 CO₂ 浓度缓慢上升的原因^[88,89]。Ren 等^[20,21,89]根据全新世花粉等代用资料分析,认为中晚全新世中国陆地植被演变的时空分布图式与农业文明的演进和扩散一致,说明人类活动的干扰是中国近 6 千年来植被变化的主要原因,并可能对陆地生态系统碳储量以及全球大气中 CO₂ 浓度增加具有一定贡献。此外,还有学者认为全新世大气中 CO₂ 浓度变化可能与珊瑚礁的堆积^[90]、CaCO₃ 沉积^[91]、太阳辐射参数变化^[79]、北纬高纬度地区泥炭的发育^[92,93]等因素有关。尽管意见不一致,但全新世中晚期全球大气中 CO₂ 浓度的逐渐升高与旧大陆地区陆地生态系统碳储量的减少是一致的,说明旧大陆地区植被和土壤的退化可能是非常重要。关于旧大陆植被和土壤逐渐退化原因,人类活动及其对陆地植被干预不容忽视^[88,89],气候变化可能也是重要的。二者哪个是主要的,哪个是次要的,以及旧大陆哪些地区的碳储量变化起到更为关键的作用,对于这些问题,还需要进一步的研究。

5 结论、讨论与展望

末次盛冰期以来全球陆地生态系统碳储量的估算,不仅要关注植被碳库和土壤碳库的变化,还要充分考虑到其他因素的影响。LGM 阶段全球陆地生态系统碳储量很低,可能比目前低 600~1300GtC;多数研究者认为全新世中期全球陆地生态系统碳储量比目前高,但给出的估算结果相差很大。尽管陆地生态系统碳储量的变化对从冰期到全新世初期大气中含碳气体浓度的变化贡献微小,但对全新世期间特别是中晚全新世大气中 CO₂ 浓度变化具有举足轻重的作用,需要给予足够的关注。

全新世陆地生态系统及其碳储量变化的原因主要有气候变化和人类活动影响。人类活动对千年时间尺度的陆地生态系统碳储量变化的影响不应该忽视。人类活动的强烈影响可能不仅局限于西方工业革命以来的几百年或者最近的几十年。在中国北方,这种影响可能早在 6000 多年前的仰韶文化时期就已经开始,今天北方的植被面貌是历史上几千年人类活动干预长期累积效应的结果。旧大陆的其他地区森林清除的历史也比较古远,过去几千年森林覆盖率一般呈不断下降趋势。因此,全新世中晚期全球大气中 CO₂ 浓度的升高可能是近 8000 年来旧大陆人类活动对植被持续干预的结果。同时在世界很多地区,气候变化、冰川退缩和海平面上升以及生态系统内部动力过程也是全新世陆地植被和生态系统碳储量演化的重要因素,同样需要给予极大关注。

陆地植被随气候变化和人类活动影响而发生演替。深入了解不同植被类型的主要建群种在气候变化和人类干预情况下的历史演化规律,以及不同植被类型或区域土壤有机质含量的历史变化规律,是过去陆地生态系统碳储量估算和碳循环研究中急需解决的关键科学问题。Biome6000 及其他相关研究计划在重建晚第四纪古植被方面的成果^[94-97],有助于推动全球陆地过去生态系统碳循环研究。

因此,将来还需要进一步开展全球和区域陆地古植被和古土壤的精细重建研究,特别要关注全新世期间的陆地生态系统演变历史,同时发展能够描述和处理自然和人为扰动、植被演替及能量和碳循环之间相互作用的新一代大气-海洋-陆地耦合模式,开展过去陆地生态系统碳储量变化模拟研究,了解过去全球碳循环演化机理,为科学预测未来全球陆地生态系统碳储量和大气中 CO₂ 浓度变化奠定基础,同时为制订国家 CO₂ 管理政策提供科学依据。

参考文献

- [1] Robin W S. Murray & M. Rohweder. Pilot analysis of global ecosystem: grassland ecosystems. Washington, DC: World Resource Institute, 2000,49~53.
- [2] Fung I. Variable carbon sinks. Science, 2000, 290(17):1313~1334.
- [3] Valentini R. Respiration as the main determination of carbon balance in European forest. Nature, 2000,401: 861~864.
- [4] 卡纳戴尔. 全球碳计划——科学框架与实施. 北京:气象出版社, 2004.
- [5] 吴海斌, 郭正堂, 彭长辉. 末次间冰期以来陆地生态系统的碳储量与气候变化. 第四纪研究, 2001,21(4):366~376.
- [6] Houghton J T, Ding Y, et al., (Eds). Climate change 2001: The Scientific Basis. Intergovernmental Panel On Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001, 185~237.
- [7] Foley J A, Kutzbach J E, Coe M T et al. Feedbacks between climate and boreal forests during the mid-Holocene. Nature, 1994, 371:52~54.
- [8] Adams J M, Faure H, Faure-Denard L et al. Increase in terrestrial carbon storage from the last glacial maximum to the

- present. *Nature*,1990,348:711~714.
- [9] Crowley T J. Ice age terrestrial carbon change revised. *Global Biogeochemical Cycle*,1995,9:377~389.
- [10] Adams J M, Faure H. A new estimate of changing carbon storage on land since the last glacial maximum, based on global land ecosystem reconstruction. *Global and planetary Change*,1998,(16~17):3~24.
- [11] Lioubimtseva E, Simon B, Faure H et al. Impacts of climatic change on carbon storage in the Sahara-Gobi desert belt since the last glacial maximum. *Global and planetary Change*,1998,(16~17):95~105.
- [12] Zelikson E M, Borisova O K, Kremenetsky C V et al. Phytomass and carbon storage during the Eemian optimum, Late Weichselian maximum and Holocene optimum in Eastern Europe. *Global and planetary Change*,1998,(16~17):181~195.
- [13] Velichko A A, Zelikson E M and Borisova O K. Vegetation, phytomass and carbon storage in Northern Eurasia during the last glacial - interglacial cycle and the Holocene. *Chemical Geology*,1999,159:191~204.
- [14] Friedlingstein C, Prentice K C, Fung I Y. Carbon-biosphere-climate interaction in the last glacial maximum climate. *Journal of Geophysical Research*,1995,100:7203~7221.
- [15] Prentice I C, Sykes M T, Lautenschlager M. Modelling the increase in the terrestrial carbon storage after the last glacial maximum. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 1993, 3: 67~76.
- [16] Indermuhle A, Stocker T, Joos F. Holocene carbon-cycle dynamics based on CO₂ trapped in ice at Taylor Dome Antarctica. *Nature*,1999, 398(11):121~126.
- [17] Blunier T, Chappella J, Stauffer J, et al. Variations in atmospheric methane concentration during the Holocene epoch. *Nature*,1995,374:46~49.
- [18] Ruddiman, W F, Raymo M E. A methane-based time scale for Vostok ice. *Quaternary Science Review*, 2003,22:141~155.
- [19] Ni J, Harrison Sandy P, Prentice I Colin, Kutzbach John E., Sitch Stephen. Impact of climate variability on present and Holocene vegetation: A model-based study. *Ecological Modelling*,2006,191 : 469~486.
- [20] Ren G. and Beug H-J. Mapping Holocene Pollen and Vegetation of China. *Quat. Sci. Rev.*, 2002, 21: 1395~1422.
- [21] Ren G. Decline of the mid- to late Holocene forests in China: climate change or human impact? *Journal of Quaternary Science*,2000, 15(3): 273~281.
- [22] 陶波等. 陆地生态系统碳循环研究进展. *地理研究*,2001,20(5):564~575.
- [23] 曹明奎等. 陆地生态系统碳循环的多尺度试验观测和跨尺度机理模拟. *中国科学(D辑地球科学)*, 2004,34(增刊II): 1~14.
- [24] 张新时等. 中国全球变化与陆地生态系统关系研究. *地学前沿*, 1997,4(1~2):137~144.
- [25] 黄耀. 关于中国陆地生态系统碳循环研究的几点思考. *世界科技研究与发展*, 2001,23(1):66~68.
- [26] 于贵瑞等. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展. *中国科学(D辑地球科学)*, 2004,34(增刊II):15~29.
- [27] 曲建生,孙成权,张志强等. 全球变化科学中的碳循环研究进展与趋势. *地球科学进展*, 2003,18(6):980~987.
- [28] Prentice K, Fung I Y. The sensitivity of terrestrial carbon storage to climate change. *Nature*,1990,346:48~50.
- [29] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, et al. The global carbon cycle. *American Scientist*, 1990,78:310~326.
- [30] Foley A J. The sensitivity of the terrestrial biosphere to climatic change: a simulation of the middle Holocene. *Global Biogeochemical cycles*,1994,8(4):505~525.
- [31] 田中正之. 地球在变暖. 北京气象出版社, 1992.
- [32] Cao Mingkui, Woodward F Ian. Dynamic response of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(21):249~252.
- [33] IPCC. Land use, land-use change, and forestry. A special report of the IPCC, Cambridge University Press, 2000.
- [34] Francois L M, Delire C, Warnant P. Modelling the glacial-interglacial changes in the continental biosphere. *Global and Planetary Change*, 1998,(16~17):37~52.
- [35] Otto D, Rasse D, Kaplan J, et al. Biospheric carbon stocks reconstructed at the Last Glacial Maximum: comparison between general circulation models using prescribed and computed sea surface temperatures. *Global and Planetary Change*, 2002, 33:117~13.
- [36] Kohler Peter and Fischer Hubertus. Simulating changes in the terrestrial biosphere during the last glacial/interglacial transition. *Global and Planetary Change*, 2004, 43:33~55.

- [37] Lal R. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect. *Progress in Environmental Science*, 1999, 1: 307~326.
- [38] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统碳库. 王如松, 方精云, 高林, 冯宗炜主编. 现代生态学的热点问题研究. 中国科学技术出版社, 北京, 251~276.
- [39] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system. *Science*, 2000, 290:291~296.
- [40] Watson R T, Verardo D J. *Land - use change and forestry*. Cambridge University Press, 2000.
- [41] Schimel, D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1995, 1:77~81.
- [42] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystem of China: estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change. *Climatic Change*, 2001, 49: 339~358.
- [43] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. *应用生态学报*, 2001, 12 (1): 13~16.
- [44] 潘根兴, 曹建华, 周运超. 土壤有机碳及其地球表层系统碳循环中的意义. *第四纪研究*, 2000, 20(4): 325~334.
- [45] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(1): 72~80.
- [46] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 赵其国. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. *土壤学报*, 2001, 38(4): 522~528.
- [47] 解宪丽, 孙波, 周慧珍等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35~44.
- [48] 王绍强, 周成虎, 刘纪远等. 东北地区陆地碳循环平衡模拟分析. *地理学报*, 2001, 56(4): 391~400.
- [49] 王绍强, 刘纪远, 于贵瑞. 中国陆地土壤有机碳蓄积量估算误差分析. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 787~802.
- [50] 王绍强, 周成虎, 罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分步特征探讨. *地理科学进展*, 1999, 18(3): 238~244.
- [51] Zhou et al. Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science*, 2006, 314(5804): 1417.
- [52] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳储量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518~522.
- [53] Li C, Zhang Y, Frohking S, Galloway J and Harriss R, et al. Crop residue management and changing SOC in agricultural soils of China. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 327~336.
- [54] Peng Michael J Apps. Contribution of China to the global carbon cycle since the Last Glacial Maximum reconstruction from palaeovegetation maps and an empirical biosphere model. *Tellus*, 1997, 49B: 393~408.
- [55] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义. 见: 王庚辰, 温玉璞主编. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996, 129~139.
- [56] 于东升, 史学正, 孙维侠等. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2279~2283.
- [57] Prentice K, Fung I Y. The sensitivity of terrestrial carbon storage to climate change. *Nature*, 1990, 346: 48~50.
- [58] Peng C H, Guiot J, Van Campo E, et al. The variation of terrestrial carbon storage at 6000 years B.P. in Europe: reconstruction from pollen data using two empirical biosphere models. *Journal of Biogeography*, 1995, 22: 581~589.
- [59] Bird M I, Lloyd J, Farquhar G D. Terrestrial carbon storage at the LGM. *Nature*, 1994, 371: 566.
- [60] Joos Fortunat, Gerber Stefan, Prentice I C, Bette L. Otto-Bliesner, and Valde, Paul J. Transient simulations of Holocene atmospheric carbon dioxide and terrestrial carbon since the Last Glacial Maximum. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18, GB2002, 1~18.
- [61] Francois L M, Godderis Y, Warnant P. Carbon stocks and isotopic budgets of the terrestrial biosphere at mid-Holocene and Last Glacial maximum times. *Chemical Geology*, 1999, 159: 163~189.
- [62] Foley J A. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget. *Tellus*, 1995, 47: 310~479.
- [63] Kaplan Jed O, Prentice I C, Knorr W, et al. Modeling the dynamics of terrestrial carbon storage since the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(22): 31-1~4.
- [64] Crucifi michel, Betts Richard A. and Hewitt Christopher D.. Pre-industrial-potential and Last Glacial Maximum global vegetation simulated with a coupled climate-biosphere model: Diagnosis of bioclimatic relationships. *Global and Planetary Change*, 2005, 45: 295~312.
- [65] Ikeda Takashi, Tajika Eiichi. Carbon cycling and climate change during the last glacial cycle inferred from the isotope records using an ocean biogeochemical carbon cycle model. *Global and Planetary Change*, 2002, 35: 131~141.
- [66] Mayle F. and Beering D J. Late Quarternary changes in Amazonian ecosystem and their implications for global carbon cy-

- cling. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeocology*, 2004, 214:11~25.
- [67] Nijian et al. Impact of climate variability on present and Holocene vegetation: a model-based study. *Ecological Modelling*, 2006, 469~486.
- [68] 杨 昕,王明星. 末次冰期极盛时陆地生态系统碳库的模式研究. *自然科学进展*,2001,1074~1080.
- [69] 何 勇,丹 利,董文杰,季劲均,秦大河. 末次盛冰期以来中国陆地植被净初级生产力的模拟. *科学通报*,2005,50(11): 1119~1124.
- [70] Brovkin Victor, Bendtsen Jorgen, Claussen Martin, Ganopolski Andrey, Kubatzki Claudia, Petoukhov Vladimir, and Andreev Andrei. Carbon cycle, vegetation, and climate dynamics in the Holocene: Experiments with the CLIMBER-2 model. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002,16(4):1139~1152.
- [71] Maslin M., and Ellen Thomas. Balancing the deglacial global carbon budget: the hydrate factor. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22:1729~1736.
- [72] 周 涛,史培军,王绍强. 气候变化及人类活动对中国土壤有机碳储量的影响. *地理学报*,2003,58(5):727~743.
- [73] 刘东生. *黄土与环境*,北京:科学出版社,1985,1~81.
- [74] 吴锡浩,安芷生. 黄土高原黄土—古土壤序列与青藏高原隆升. *中国科学(D)*, 1996,26(2)103~110.
- [75] 李取生. 东北泥炭和沙地古土壤发育的对比与全新世干燥度变化. *科学通报*, 1993,38(12),1109~1111.
- [76] 任国玉. 我国东北沙地埋藏土壤的成因和环境指示意义. *干旱区地理*, 1997,20 (2), 73~79.
- [77] 刘启明, 王世杰,朴河春, 欧阳自远. 稳定碳同位素示踪农林生态转换系统中土壤有机质的含量变化. *环境科学*, 2002, 23(3):75~78.
- [78] Kicklighter D W, Bruno M, Donges S, et al. A first-order analysis of the potential role of CO₂ fertilization to affect the global carbon budget: a comparison of four terrestrial biosphere models. *Tellus*,1999,51B:343~366.
- [79] Gerber S, Joos F, Brugger P. Constraining temperature variations over the last millennium by comparing simulated and observed atmospheric CO₂. *Climate Dynamics*,2003,20:281~299.
- [80] Laiho Raija. Decomposition in peatlands :Reconciling seemingly contrasting results on the impacts of lowered water levels. *Soil Biology and Biochemistry*,2006,38,2011~2024.
- [81] Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications* ,1991, 1,182~195.
- [82] Fischer H, Wahlen M, Smith J, et al. The ice records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations[J]. *Science* ,1999, 283:1712~1714.
- [83] Barnola J M et al. CO₂-climate relationship as deduced from the Vostok ice core :a re-examination based on new measurements and on a re-evaluation of the air dating. *Tellus B*,1991,43:83~90.
- [84] Stauffer, B et al. Atmospheric CO₂ concentration and millennial-scale climate change during the last glacial period. *Nature*, 1998,392:59~62.
- [85] Smith, H et al. The CO₂ concentration of air trapped in GISP2 ice from the Last Glacial Maximum-Holocene transition. *Geophysical Research Letters*, 1997,24:1~4.
- [86] Raynaud D et al. The ice record of greenhouse gases: a view in the context of future changes. *Quaternary Science Reviews*, 2000,19:9~17.
- [87] Broecker W S, J Lynch-Stieglitz, E Clark, I Hajdas, and G Bonani. What caused the atmosphere's CO₂ content to rise during the last 8000 years? *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2001,2, 177.
- [88] Ruddiman W F. The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climate Change*, 2003, 61:261~ 293.
- [89] Ren G. Changes in forest cover in China during the Holocene, *Vegetation History and Archaeobotany*, 2007, 16:119~126.
- [90] Ridgwell A, et al. Implications of coral reef buildup for the controls on atmospheric CO₂ since the Last Glacial Maximum. *Palaeoceanography*, 2003,18(4):1083~1093.
- [91] Matsumoto K, J L Sarmiento, and M A Brzezinski], Silic acid leakage from the Southern Ocean: A possible explanation for glacial atmospheric pCO₂. *Global Biogeochem. Cycles*, 2002,16, 1029,~1041.
- [92] Gajewski K, A Viau, M Sawada, D Atkinson, and S Wilson. Sphagnum peatland distribution in North America and Eurasia during the past 21,000 years, *Global Biogeochem. Cycles*, 2001,15:297~310.

- [93] Gajewski K, A Viau M Sawada, D Atkinson, and S Wilson. Area and carbon content of Sphagnum since Last Glacial Maximum, in Trends: A Compendium of Data on Global Change, Carbon Dioxide, 2002, Inf. Anal. Cent., Oak Ridge, Tenn.
- [94] Houghton R A, Hackler K C, F ung I Y. The U.S. carbon budget: Contribution from land-use change. Science, 1999, 285: 574~578.
- [95] 于 革. 花粉植被化与全球古植被计划研究. 地球科学进展, 1999, 14(3): 306~311.
- [96] 中国第四纪孢粉数据库小组. 中国全新世和末次盛冰期生物群区的重建. 植物学报, 2000, 42(11): 1201~1209.
- [97] 吕厚远, 刘东生, 郭正堂. 黄土高原地质、历史时期古植被研究状况. 科学通报, 2003, 48(1): 2~7.

Recent Progresses in Studies of the Terrestrial Carbon Storage Change for the Past 20k Years

YU Lei^{1,2}, REN Guoyu¹

(1. Laboratory for Climate Studies, CMA, National Climate Center, Beijing

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 10008)

Abstract: Estimating carbon storage of terrestrial ecosystem and understanding its spatial distribution and temporal evolution are the key to the carbon cycle study. This article summarizes some major results of the estimations of terrestrial ecosystem carbon storage in globe and China, including the existing problems and uncertainties in the studies. Progress in studies of the carbon storage change since the Last Glacial Maximum (including the Mid-Holocene) and the influencing factors, especially the potential relationships between the changes and the anomalous increase of the atmospheric carbon dioxide since 8.2 ka B.P. is evaluated. A main conclusion that could be drawn from the overview is that the increase in atmospheric carbon gases (CO₂, CH₄) concentrations seems coincident with the decline of the terrestrial carbon storage during the mid to late Holocene, and these might have been caused by the impact of anthropogenic activities on terrestrial vegetation during the agricultural era in the old continents.

Key words: terrestrial ecosystem; carbon storage; LGM; Holocene; China