

过去 300 年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究

葛全胜^①, 戴君虎^{①*}, 何凡能^①, 潘嫻^①, 王梦麦^{①②}

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: dajh@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2007-07-23; 接受日期: 2008-01-03

中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX2-YW-315-4)、国家科技支撑计划重大项目(批准号: 2007BAC03A11))和国家自然科学基金(批准号: 40471047, 40471007)资助

摘要 历史时期的土地利用与土地覆被变化是影响陆地生态系统碳循环的重要因素。过去 300 年间, 我国土地利用与覆被发生了较大变化, 林地面积迅速减小, 垦殖扩张明显, 均对陆地生态系统的碳循环产生了重要的影响。采用通过第一手历史文献资料重建的历史土地数据, 分析了过去 300 年我国土地利用变化的主要特征, 研究表明: 在研究时段, 耕地面积持续增加, 从清前期 1661 年的 $60.78 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 增加到 20 世纪末的 $96.09 \times 10^6 \text{ hm}^2$; 森林面积从 1700 年的 $248.13 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 降至 1949 年的 $109.01 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。受土地利用与覆被变化影响, 全国陆地生态系统的碳储量也随之变化。其中, 地上植被破坏引起的碳排放大约为 3.70 Pg C ; 土壤有机碳排放介于 $0.80 \sim 5.84 \text{ Pg C}$ 之间, 最适估计为 2.48 Pg C ; 植被和土壤变化引发的碳排放总计达 $4.50 \sim 9.54 \text{ Pg C}$, 最适估算为 6.18 Pg C 。这远小于国外学者估算所得的 $17.1 \sim 33.4 \text{ Pg C}$ 的排放量。碳排放的空间分异明显, 由于东北地区和西南地区的植被破坏相对较大, 过去 300 年间这两个地区受土地利用与覆被变化影响的碳排放也较大, 其余排放量从大到小依次为内蒙古地区、华南西部地区、新疆和青藏高原区; 而作为历史上传统农区的华北地区和华东地区, 土地利用与覆被变化对陆地生态系统碳储量影响相对较小。但是近年有关研究显示, 目前全国自然植被活动增强, 土地利用活动, 特别是农林活动正对陆地生态系统碳储量产生比较明显的积极作用。

关键词

陆地生态

土地利用与覆被变化
碳循环

土地利用与覆被变化是人类改变陆地生态系统生物量(biomass)生产的主要方式之一, 是影响陆地生态系统碳循环过程, 引起碳源、汇变化的重要原因^[1]。过去 300 年, 世界人口增长迅猛, 农业垦殖空前扩张, 自然植被面积锐减^[2-4], 过去 250 年间, 大气 CO_2 浓度增加 $31(\pm 4)\%$, 其中主要是人类活动排放所致, 土地

利用与覆被变化是其主要方面^[5]; 过去 150 年, 化石燃料燃烧和水泥生产等活动以 CO_2 形式共向大气释放 $270(\pm 30) \text{ Pg C}$; 同时期, 土地利用变化向大气释放 $136(\pm 50) \sim 156 \text{ Pg C}$, 占人类总排放量 1/3 以上^[1,6]。近年来, 全球土地利用与土地覆被变化在陆地与大气碳交换中起着碳源作用^[7-13]。

目前,土地利用变化与碳循环关系研究特别重视历史时期的变化。IPCC关于气候变化的第三次科学报告多处引用有关历史时期土地利用变化引起碳排放的研究结果^[5,14-16]。Schimel等^[12]认为,历史过程是未来碳循环研究的关注焦点。2006年,Kaupf等^[17]采用“森林恒等式”(forest identity)方法,根据联合国粮农组织公布的数据,综合衡量森林面积和密度两项指标,分析了全球森林覆被的变化历史及其对陆地生态系统碳储量的影响。

在历史土地利用变化与生态系统碳循环关系研究中,Houghton等采用“簿记”模型(Bookkeeping Model)的估算影响较大^[14,18,19]。他们最早于1983年开始构建“簿记”模型,简要估算了工业革命以来全球土地利用与覆被变化所引起的碳排放^[18]。多年来,他们对这项全球研究又进行过多次修改与完善^[20,21],将上述模型应用于赤道热带地区^[22]、赤道亚洲^[23]、美国^[24]以及中国^[19]等地,估算了历史土地利用变化对陆地碳循环的影响。

历史时期土地利用变化与陆地碳储量关系研究的关键是基础土地利用变化数据和资料的准确性和完备性。在短时间尺度上,土地调查和对地遥感观测数据均可满足研究需要^[7]。就历史时期而言,资料匮乏却是全世界学者共同面临的难题,制约了许多研究的深入开展。近年来,在IGBP的BIOME300,LUCC,GCTE,GLP(Global Land Project)和iLEAPS等研究计划共同推动下,重建过去环境,特别是重建过去300年全球土地覆被的工作取得重大进展^[25]。其中,荷兰环境评价局(Netherlands Environmental Assessment Agency)所建的“全球历史环境数据集”(Historical Database of the Global Environment, HYDE)和美国威斯康星大学全球环境和可持续发展中心(SAGE)所建的“全球土地利用数据集”(Global Land Use Database)都是较重要的尝试^[26,27]。在此基础上,有人对原始土地利用数据进行加工,又得到“土地利用转型”数据集(Land Use Transformation Database)^[28]。这些数据集的主要资料来源于遥感观测、土地清查和人口普查等。在没有直接土地利用资料的情况下,根据人口与环境要素之间的关系,通过数量化模型方法回推历史时期的土地利用数据^[27]。而且上述数据集都是具有地理属性的格网化数字产品,能够反映全球大势,但

相对比较粗略。比如,其中的中国区域数据便与实际情况相差甚远。这是由于这些数据库的大部分土地数据都是由人口、消费等社会经济参数间接推导而来,推理过程中有许多假设,增加了数据集的主观性,这是同类工作所应特别注意的地方。

除土地数据之外,陆地生态系统碳循环研究还涉及森林等生态系统的生物量碳密度和土壤碳密度数值^[19]。生物量碳密度和土壤碳密度是植被生态和土壤有机碳含量的重要指标,受许多自然和人文因素影响,存在较大的时空差异。植被碳密度在国外的规模研究,始于上世纪中期国际生物学计划(IBP)对各地森林生物量的调查和研究^[29]。同类研究在我国起步较晚,但是进展很快,研究成果既包括由野外植被生态调查所推算的各类生物群区(biome)的生物量^[30],也含根据森林清查数据按行政单位总结的区域生物量密度^[31-33]。Fang等^[31-34]采用生物量转换因子法,在各类实测和清查资料的基础上推算出各地森林的生物量碳密度^[35]。土壤碳密度与地面植被关系密切,主要由土壤有机碳含量、土壤容重和土体中>2 mm石砾的体积分数共同确定。

中国是一个传统的农业大国和人口大国,土地垦殖扩展是全球关注的焦点。近年来,国外学者从不同角度出发,估算了历史时期中国土地利用变化及所引起的碳排放。但是,由于资料匮乏,加之他们对中国情况掌握极其有限,其研究很大程度上不能反映客观实际。

有鉴于此,笔者在多年对历史时期中国土地利用与覆被变化研究的基础上^[36-38],根据已掌握史实,剖析了中国近300年土地利用变化的基本特征,并采用模型方法估算了该时段土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响,试图为更加客观地说明该时段土地利用变化的原貌,为科学分析其环境效应提供理论依据。

1 资料和方法

1.1 资料来源

资料来源是土地利用变化与陆地生态系统碳循环研究的根本,换言之,准确评估土地利用与覆被变化是深入剖析陆地碳储量变化的基础;而精确的碳密度测度则是估算陆地生态系统碳储量变化的重要

环节.

1.1.1 土地利用与覆被变化数据

与国外情况不同的是, 过去 300 年间中国记述农业、林业的各种历史文献林林总总, 直接或间接地记录了当时土地利用与覆被变化的详细过程. 300 年间, 三种不同的政权形式使土地政策、农业经济和赋税制度等方面的记录各不相同, 给统计分析带来了很大困难. 针对各时期特点, 本文所涉资料主要源于以下几个方面:

(1) 清代部分: 主要引自清朝官修正史、地方志、类书、游记、文人笔记、官府文书和名家文集等. 此外, 还参考前人相关研究论著所考证的清代土地利用资料和数据^[39-41]. 其中, 耕地数据主要来自葛全胜等^[36]“过去 300 年中国耕地资源数量变化及驱动因素分析”一文的估算, 对于 18 行省以外的部分, 采用了李文治^[42]和 Perkins^[43]的有关研究成果进行插补. 对于清前期的森林面积变化, 除上述原始文献以外, 主要还参考了凌大燮^[44]、樊宝敏等^[45]、陈嵘^[46]和马忠良等^[47]的研究成果, 数据主要来自何凡能等^[38]“近 300 年来中国森林的变迁”一文.

(2) 民国时期: 耕地方面主要采用了国民政府相关部门与金陵大学农业经济系的调查统计数据, 综合了当时关于土地利用研究的主要观点, 涵盖 Baker^[48]、Buck^[49]、张心一¹⁾、乔启明等^[50]的研究成果, 同时兼备统计局等部门的诸多统计材料. 此外, 李文治^[42]、何秉棣^[51]等学者关于这一时期土地利用的观点也是本文的重要参考. 林地方面, 除上述总论性质的林地面积讨论方面的研究外, 还特别采用了民国政府实业部统计年鉴关于林地的数据和民国年间的森林史研究成果^[39].

(3) 现代部分: 1949 年以后的耕地数据主要采用由国家统计局发布的各省系列耕地面积数据, 该数据与国土资源部(含原国家土地局)的数据虽然统计口径有别, 但两者之间相关性很强. 由于前者系统性好, 统计时间较长, 而被本研究所采用.

这一时期的林地数据主要采用林业部门对全国进行的林业资源清查数据. 这些数据的获取从方法

上说比较严谨, 所查项目较多, 信息量很大^[35]. 我国学者曾采用该系列数据研究过相关时段中国森林植被碳储量等问题, 取得良好效果^[34].

上述各时段的多种资料可归为三类: 其一是清朝、民国史料, 主要包括清代和民国时期的各种史书、方志和传诸后世的文人作品, 这是获取本文各种数据的基础资料. 其二是政府清查和统计资料, 是民国时期及此后耕地和林地变化研究的主要数据来源; 其三, 前人相关领域的研究文献. 其中, 主要土地资料的耕地数据基本系等间距地自历史文献资料考订而来, 300 年间相邻耕地数字的平均时间间距为 26 年; 林地数据是以基础年份的数字为标准, 按照资料插补和数据回溯方法依次按每 50 年的间隔估算得来. 空间上, 这些数据主要以省域单元统计, 但是特别考虑了主要林区 and 主要垦殖活动的影响.

1.1.2 植被和土壤碳密度资料

本文计算中的植被碳密度数据采用了 Fang 等^[31]根据林业部门 1949~1998 年间七次清查数据所推算的各地历次清查时段森林生物量碳密度的平均值(如图 1(a)所示). 土壤碳密度采用了 Wang 等^[52]和刘纪远等^[53]基于全国第二次土壤普查的 2473 个土壤剖面资料, 应用地理信息模型估算的各地地表 0~100 cm 范围内森林土壤的碳密度数值. 这是关于我国土壤碳储量和碳密度研究的代表性工作. 本文土壤碳密度估算是在上述研究基础上, 由土壤有机碳含量剖面资料的原始数据按行政区域合并计算得到(如图 1(b)所示).

1.2 研究方法

与现代土地利用变化资料不同, 历史时期各种土地数据之间存在统计口径、数字性质、丰富程度等方面的巨大差异, 因此资料同化、订正和处理方法是研究过程中不可避免的问题. 就土地利用变化与陆地生态系统碳循环关系的研究而言, 在众多处理方法中, Houghton 等^[18]所建立、并在多处应用的“簿记”模型得到普遍认可, 影响较大.

(1) 资料处理方法. 为了得到一套统计一致、质

1) 张心一. 中国农业概况估计. 南京: 金陵大学农业经济系, 1933

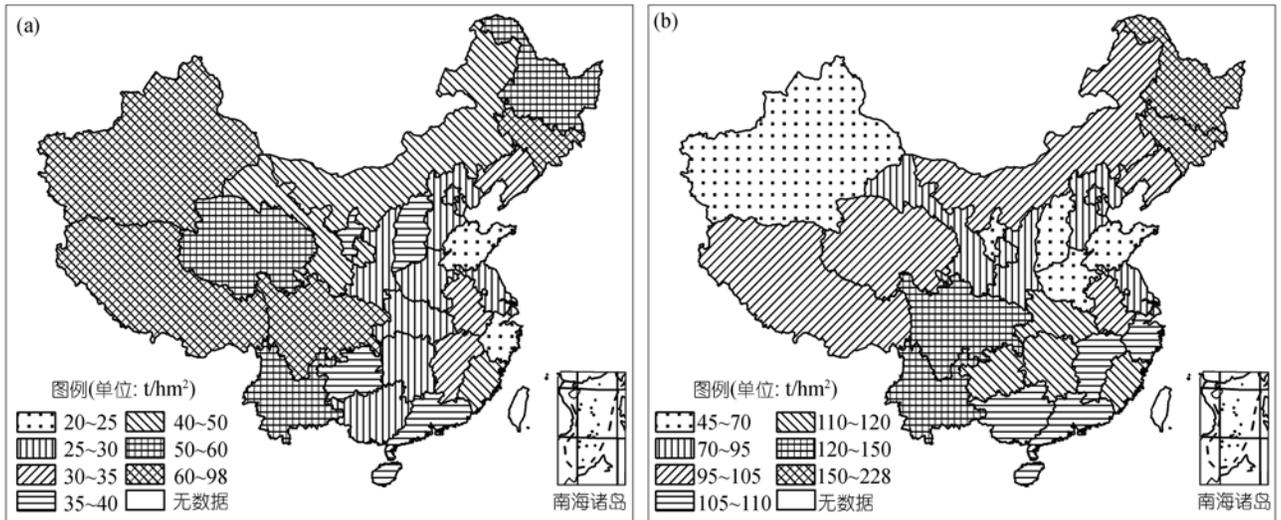


图 1 中国陆地生态系统碳密度示意图

(a) 森林碳密度; (b) 土壤碳密度

量较高、便于对比分析的土地利用变化的数据系列, 本文在各类资料的同化、衔接等处理上采用了以下方法。

第一, 类比法和代用资料法: 本文引用了较长时间尺度、不同性质的多种数据资料, 采用类比分析方法对同类数据进行比较, 以突出其联系和区别。耕地数据的获取采用了代用资料法。这是因为, 原始田亩数据实际等同于赋税记录, 欲将其变成实际耕地面积数量还需进行相关折合。由于个别年份原始数据缺失, 估算中使用类似数字作为代用资料, 如民国政府主计处统计局所估算出的清末、民初的耕地面积指数^[54]就被用于插补缺失年份的耕地面积数据; 而且, 这组无量纲的耕地面积指数也是清朝、民国和新中国等几种性质不同的耕地数据之间的纽带, 将其科学地衔接起来。

第二, 断面定量比较与多时段数据整合的信息对称校正法: 该方法通过寻找共同研究区间、进行同类数据的标准化处理等方法, 将不同时期、不同类型和不同性质的各种土地利用、农业垦殖等数据同化、加工成一组计量一致、性质相同的数据系列, 用于研究土地利用与覆被变化与陆地碳循环之间的关系^[36-38]。

(2) 土地利用及土地覆被变化与碳循环关系研究方法。陆地生态系统碳循环的研究方法主要有三类。其一是通过土地利用变化来估算不同时期、不同

土地利用类型的面积和碳密度动态, 推算陆地生态系统碳收支; 其二是采用森林清查资料的估算途径。由于森林是地表的主要碳库, 森林植被是陆地生物圈的主体, 约有 85% 的陆地生物量集中在森林植被^[55]。通过森林清查的详细数据可以了解陆地生态系统碳循环动态的主要方面。其三是采用各种环境参数模型方法, 利用环境因子与陆地植被生产力之间的相互作用关系, 建立模型, 间接地推算陆地植被生物量和碳储量变化。但是, 不同模型的估算结果差别极大, 而且任何此类模型对于全球范围的碳平衡估算都达不到所需精度, 一般不采用这类模型方法进行宏观尺度的碳平衡估算^[19]。因此, 依据土地利用与土地覆被变化来估算陆地生态系统碳储量变化便成为全球和洲际尺度研究的重要方法。Houghton 等采用“簿记”模型所做工作是这类研究的代表^[14,18,24]。

1.3 “簿记”模型

“簿记”模型曾经被作者用于估算世界九个国家或地区的土地利用变化与管理差别所引起的碳源、汇的动态特征^[14,18,19,24]。模型主要需要两类数据: 一类是土地利用与覆被变化数据, 另一类是因土地利用和土地管理方式不同而引起的碳密度变化数据。

“簿记”模型追踪活质生物体、枯枝落叶、木材产品和不同土地类型土壤碳的储量及其变化, 被认为是探究陆地生态系统各碳库碳从“摇篮”到“坟墓”全

过程行之有效的办法, 据此最终确定陆地与大气碳交换的数量, 将全部受土地利用变化影响的陆地生态系统生物量碳都考虑了进去, 其中包括活质生物体、土壤、枯枝落叶以及木材产品等要素及其变化。比如, 植株枯死以后的腐化时间、森林再生等陆地生态系统过程均是其研究对象。该模型虽然是一个计数模型, 但是蕴含许多基础生态过程, 将这些过程表达成各式干扰曲线, 具有生态过程模型的许多特征。本文利用上文所述的过去 300 年中国分各省区耕地与林地变化数据, 采用“簿记”模型方法, 在适当假设的基础上, 估算了近 300 年中国土地利用变化对陆地碳储量的影响。

(1) 土地利用变化引起的地上植被的碳储量变化。本文所述的土地利用变化主要指各类毁林活动和随之而来的土地垦殖。被毁森林经过人类活动干扰后, 一部分生物量以枯枝落叶的形式留在了原地, 另一部分生物量被取作他用, 或用于建筑工程, 或用于家具制作, 或用作薪炭燃料等。计算采用 Houghton 等 [18,23] 的方法, 设留在原地的生物量碳占总被毁森林生物量碳的 40%, 这部分生物量以 0.1 a^{-1} 的速率进入土壤。虽然被取走生物量碳最终都进入大气, 释放二氧化碳, 但是这些生物量中不同用途部分具有不同的氧化速率。其中, 20% 以 1 a^{-1} 速率迅速被氧化, 30% 被制成非耐用品以 0.1 a^{-1} 的速率被氧化, 其余 10% 以 0.01 a^{-1} 的速率缓慢被氧化。最终上述被氧化部分累加得到森林破坏所引起的地表植被碳排放总量。

(2) 土地利用变化引起的土壤碳储量变化。森林被破坏及其引起的土壤有机碳变化实际是一个非常复杂的土壤学和生态学过程, 多项相关研究的结果各不相同, 有的相差甚远。研究表明 [56,57], 森林破坏之后将引起大量土壤有机碳损失。如果森林转化为牧场, 那么 5 年内土壤有机碳含量将减少 20%; 如果森林转化为农田, 5 年内土壤有机碳会减少 40%。换言之, 森林利用现状的改变一般会造成 20~50 年内多至 20%~50% 的有机碳损失。其中, 大部分损失源于地表有机质被侵蚀。表面上看, 森林采伐本身对土壤有机碳含量似乎影响不大, 但因为砍伐和毁林事件改变了林下的生物地球化学循环, 影响到土壤生态系统的碳循环过程。而此后土地利用方式的改变

对土壤有机碳含量的影响更大, 因此, 应该将采伐活动影响和采伐之后的垦殖影响分别对待。

本文在计算土壤碳储量变化过程中, 参考 Houghton 等 [22,24] 关于毁林后林下土壤有机碳损失的分析方法, 同时结合近年土壤碳循环研究的最新成果, 分两步进行估算: 首先, 森林毁坏 50 年后, 林下土壤有机碳会有大量减少, 与干扰前相比可减少 20%~50%。再按照中国区域土壤碳损失的实际情况, 按照三种方案进行计算, 即与起始阶段土壤碳含量相比, 毁林使 50 年后土壤碳分别损失 20%, 30% 和 50%。其次, 森林砍伐后立即进行的农业垦殖又平均使土壤有机碳在 50 年内减少 20%。最后, 将这两部分汇总得到土壤损失有机碳的总量, 再与毁林后地上森林枯枝落叶逐年进入土壤所增加的土壤有机碳合并考虑便得出森林破坏对土壤有机碳含量的实际影响。

2 研究结果

过去 300 年间, 特别是清前期, 因清政府农业政策刺激、人口快速增长等因素对土地利用活动都产生了巨大影响, 土地利用与土地覆被发生明显变化 [36]。其中, 耕地面积的急剧增加和森林面积持续下降是这一时期土地利用变化的主要方面。由于耕地和林地与人们生活关系最为密切, 前人关于土地利用的各种文献中, 这两方面资料也最为丰富, 为本研究奠定了坚实基础。而且, 耕地和林地变化也是影响陆地生态系统碳循环的主要原因, 因此本文将重点分析过去 300 年间耕地和林地两种土地利用类型变化所引起的陆地生态系统碳储量的变化情况。

2.1 过去 300 年中国耕地变化的主要特点

史籍所载的清代全国耕地面积一直是学界激烈争议的一个研究课题, 其偏差和复杂性很大 [51]。很多学者深入研究过这个问题, 至今仍众说纷纭, 尚无定论。但是通过对众多资料的甄别和分析表明, 清代全国的耕地面积研究上有两个值得密切关注的事实。其一, 两组反映清代耕地面积大致比例关系的耕地面积指数参考价值很高, 即 1661~1887 年 [42] 和 1873~1933 年 [54] 的耕地面积指数, 它们曾被多处引用, 特别是 Perkins [43] 对此进行了较为详尽的解析。其二是几个标准年份的耕地面积数据基本可靠, 比如

1661 年、1766 年、1873 年、1933 年和 1957 年的耕地面积数据。于是可根据上述比例关系和特征年份的具体数字将过去 300 年间的耕地面积数据衔接起来, 得到一组相对比较符合实际的基础数据系列(见图 2)。

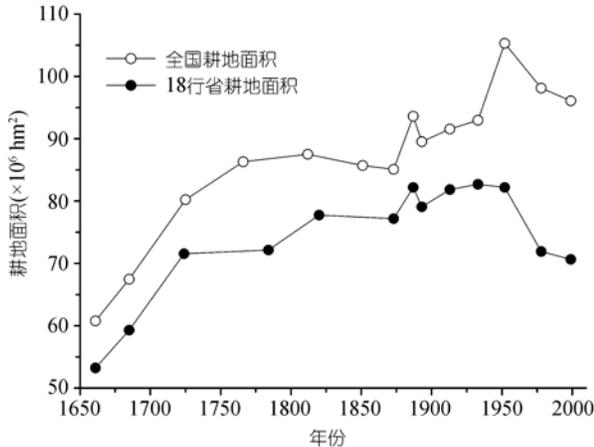


图 2 1661~2000 年 18 行省和全国耕地面积变化

18 行省数据来源于葛全胜等^[36]; 全国数据中 1661~1887 年间数字据李文治^[42]; 1933~1957 年数字据 Perkins^[43]; 1957 年之后的数据根据国家统计局有关统计^[60]

过去 300 年, 中国耕地面积有持续、快速增长的变化趋势, 可从全国和内地 18 省的耕地面积变化上得到证明(见图 2)。特别是在 20 世纪中叶以前, 这种趋势更为明显^[36]。咸丰年间(1821 年), 清代人口超过 4 亿^[58], 由于前所未有的口压力, 农业垦殖也在这一时期达到顶峰。山地垦殖是当时农业活动的主要特征。政府对深山老林的封育禁令不如此前严厉, 新品种引种也为垦殖扩张提供了条件^[59]。19 世纪中叶之后至新中国成立阶段, 受战争、社会动荡以及人口波动等影响, 垦殖活动才渐显停滞趋势。新中国成立之后, 由于植树造林等农、林业政策的实施, 林地面积增加较快, 而同期的耕地面积增加减缓, 甚至有些时段还有所减少。过去 300 年间, 传统农区耕地变化的时空差异详见葛全胜等^[36]的有关工作。

2.2 过去 300 年间林地面积变化

历史时期的森林面积减少是我国过去自然环境变迁的重要内容, 清代以来, 森林面积的减少趋势在整个中国历史上都比较罕见。我国是一个有悠久垦殖历史的文明古国和农业古国, 长期的人类垦殖活

动是森林面积减少的主要原因之一。其中, 清代的森林面积减少达到历朝历代的高峰, 尤以乾隆、嘉庆两朝最甚^[59]。过去 300 年间, 中国森林面积的总体趋势表现为 1949 年之前的锐减和之后的较快恢复(见图 3“总值”)。据估算, 1700 年全国森林面积达 $248.13 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 但是截至 1950 年, 森林面积仅余 $109 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 降至 300 年来的最低值, 共减少了一半以上^[38]。此后受政府植树造林和森林保护等政策影响, 森林才有所恢复, 植物活动有所增强。至 2000 年, 森林面积恢复到 $189.34 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。特别值得一提的是, 1949 年之前, 全国除京津冀地区外, 省域森林面积均呈现持续下降趋势(图 3)。这对自然环境产生了重大影响, 引起陆地生态系统碳储量剧烈下降。

2.3 耕地与林地面积变化之间的关系

分析表明, 研究时段的森林和耕地面积变化是相互关联的, 常常表现出此消彼长的关系。在清前期耕地面积迅速增加的时期, 恰好是林地面积锐减的时期。新中国建立之后, 森林和耕地面积的变化则呈现相反的趋势。这可以从以下 2 个方面得到深刻反映。

首先, 在过去 300 年中, 省域范围耕地面积的增加和林地面积减小经常具有较好的相关关系。图 4 反映了过去 300 年山西和京津冀地区耕地面积与林地面积的相互变化关系。

其次, 根据最近林珊珊^[61]采用地理信息手段的估算, 过去 300 年耕地面积的增加和林地面积的减少常常都发生在海拔较高(如图 5(a))和坡度(如图 5(b))较大的区域。这说明, 虽然新增耕地不全来源于原有林地, 但是耕地面积的增加还是以牺牲高山陡坡所分布的部分林地作为代价。而且越是后期, 这种高山陡坡开发越明显。

2.4 土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响

过去 300 年, 中国土地利用与土地覆被变化较大, 并已经引发重大环境效应。其中, 对陆地生态系统碳循环的影响是一个非常重要的方面。根据上文所述, 土地利用与覆被变化主要通过 3 个过程影响陆地生态系统的碳储量。其一是森林破坏后损失生物量氧化所释放的碳。这与地表森林类型、森林长势和碳密

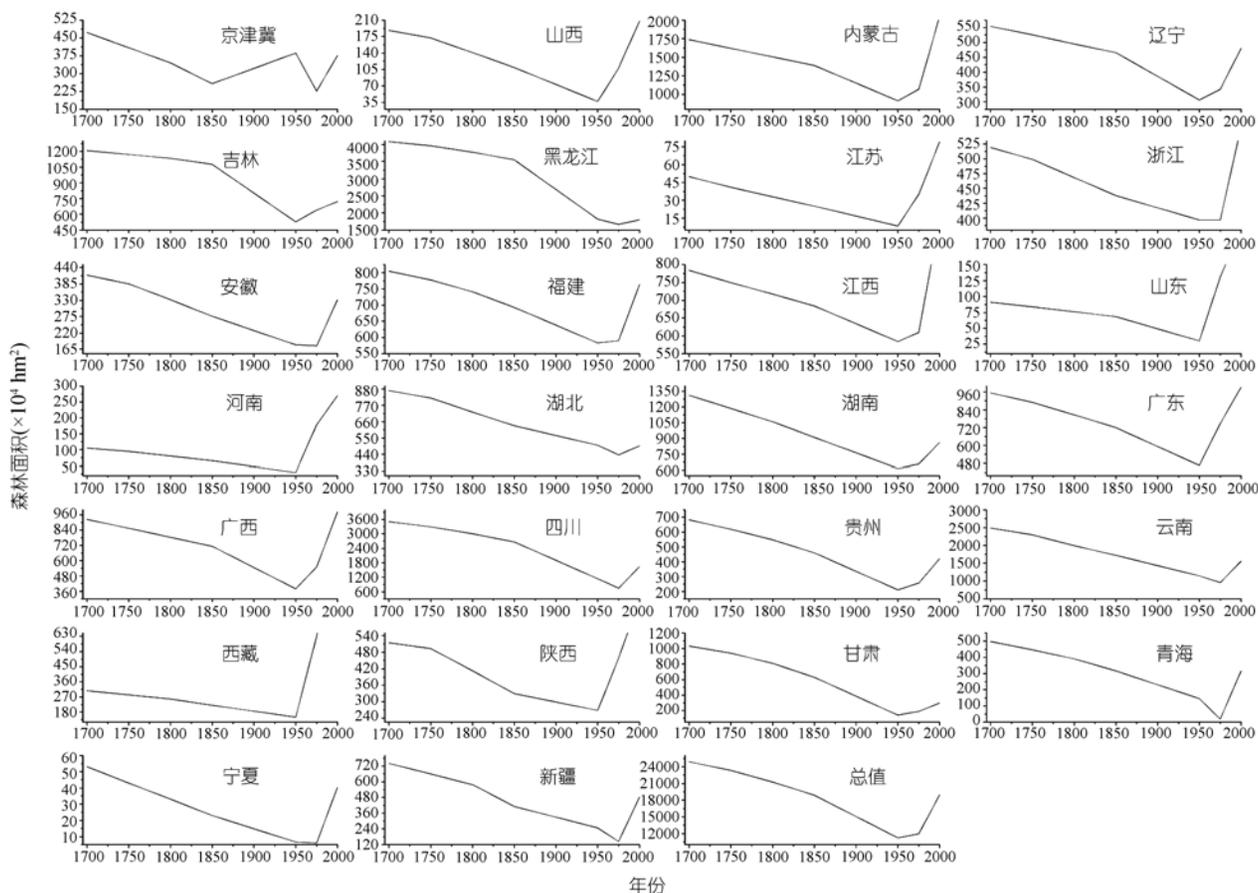


图 3 过去 300 年中国林地面积变化示意图

数据来源: ①文献 [38]; ② 第 1-6 次全国森林资源清查数据

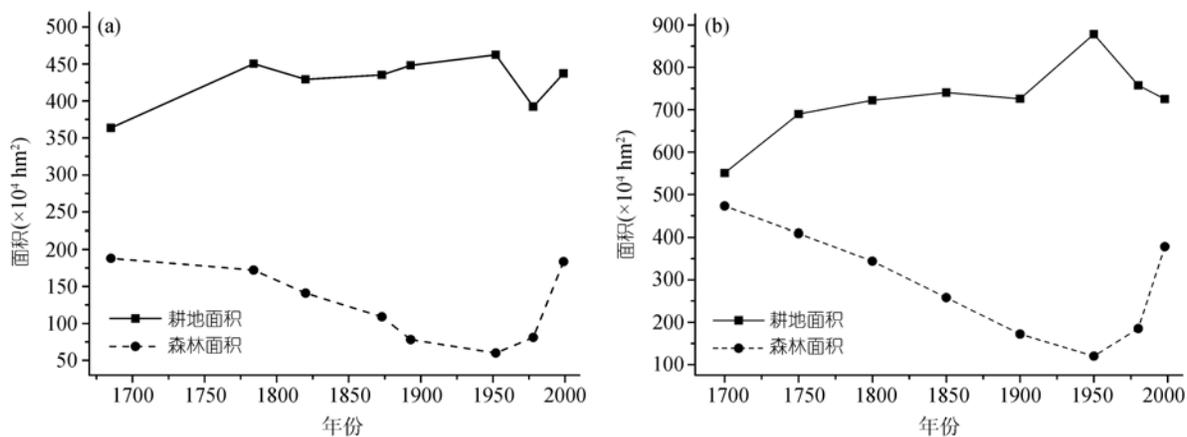


图 4 过去 300 年山西省(a)和京津冀地区(b)耕地面积和森林面积的变化示意图

度等植物生态学特性, 以及被毁森林树木的不同用途及其氧化速率有关; 其二, 森林破坏之后的耕作影响, 主要是通过耕作翻搅等活动影响土壤生态系统

的碳储量; 其三, 在森林破坏后, 一部分树木以枯枝落叶的方式将一部分生物量按照一定的速率逐渐腐殖质化, 最终将有机碳归还给土壤系统。

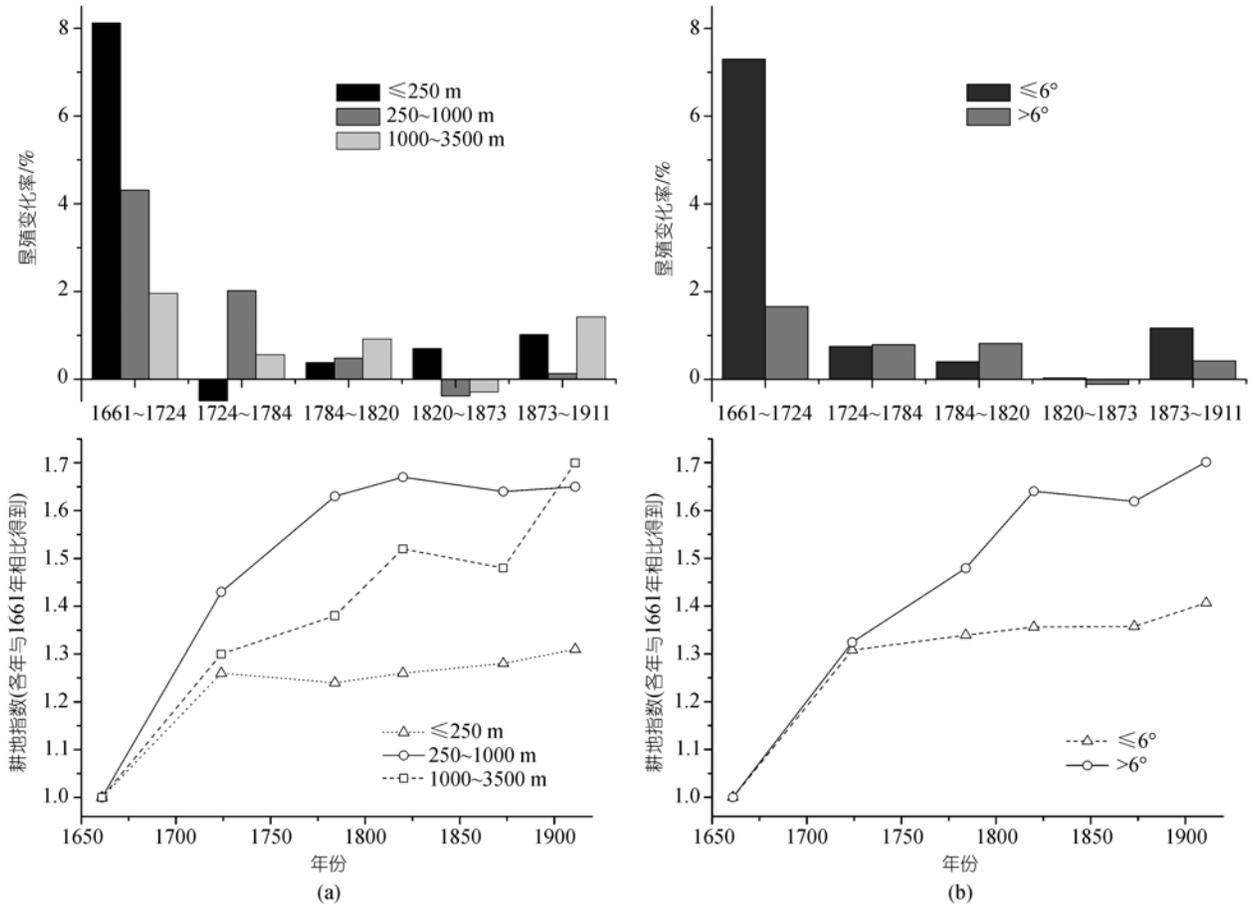


图 5 中国传统农区过去 300 余年增加耕地与海拔高度(a)和坡度(b)的关系示意图 [61]

本文首先分别考虑地表植被和地下土壤的碳储量变化, 然后将两者归并, 得出过去 300 年中国土地利用与覆被变化所引起的中国区域(台湾岛和南海诸岛因数据缺乏除外) 陆地生态系统碳储量的变化. 由于 1949 年之后的垦殖活动与森林变化对陆地生态系统碳储量影响的事实相对比较清楚, 因此本研究估算截至 1949 年.

(1) 地表植被破坏所引起的生物量碳释放. 按照上文所述, 地表植被破坏释放碳的方式主要有 3 个途径, 即其一一是直接氧化释放, 占总生物量碳的 20%; 其二是以非耐用品方式氧化释放, 占总生物量碳的 30%, 氧化速率为 0.1 a^{-1} ; 其三是以耐用品方式氧化释放, 占总生物量碳的 10%, 氧化速率为 0.01 a^{-1} . 本文按照森林破坏后树木的不同用途及其氧化速率, 推算了相应情形下生物量的氧化过程及其所引起的碳储量变化, 将各过程合并, 得到地表生物量碳释放

的总量(见表 1 各时段“植被”栏). 过去 300 年, 中国土地利用变化, 特别是森林破坏引起植被碳的总排放量约为 3.70 Pg C . 研究时段上的植被碳排放逐渐加快, 后期的排放远大于前期.

(2) 土壤生态系统碳排放. 植被破坏后土壤碳储量的变化主要包括 2 个过程, 即森林破坏引起土壤侵蚀和耕作活动对于土壤翻搅引起土壤碳释放, 但是森林破坏之后, 枯枝落叶归还土壤又使土壤碳储量趋于增加. 将 2 个过程分别计算, 然后合并, 最终得到整个土壤生态系统由于土地利用与覆被变化而引起的碳排放(见表 1 各时段“土壤”栏). 基于毁林 50 年后土壤碳损失 20%~50% 的事实, 分别计算 50 年后, 土壤碳储量损失 20%, 30% 和 50% 三种情景. 结果表明, 在这三种情景下, 土壤碳排放量差别极大. 当毁林 50 年后土壤碳损失 20% 时, 过去 300 年间土壤碳损失 0.80 Pg C ; 当毁林 50 年后土壤碳损失 30%

表 1 过去 300 年土地利用变化所引起的地表植被和地下土壤碳储量变化(单位: Pg C)^{a)}

时段	1700~1750		1750~1800		1800~1850		1850~1900		1900~1949		合计
地区	植被	土壤									
京津冀	-0.0081	-0.0058	-0.0096	-0.0083	-0.0127	-0.0102	-0.0132	-0.0110	-0.0155	-0.0126	-0.1070
山西	-0.0030	-0.0003	-0.0064	-0.0009	-0.0072	-0.0012	-0.0072	-0.0013	-0.0091	-0.0014	-0.0380
内蒙古	-0.0238	-0.0114	-0.0278	-0.0169	-0.0288	-0.0168	-0.0528	-0.0283	-0.0593	-0.0350	-0.3009
辽宁	-0.0048	-0.0037	-0.0058	-0.0054	-0.0059	-0.0053	-0.0062	-0.0055	-0.0225	-0.0182	-0.0833
吉林	-0.0113	-0.0056	-0.0139	-0.0086	-0.0202	-0.0115	-0.0275	-0.0159	-0.1533	-0.0790	-0.3468
黑龙江	-0.0323	-0.0469	-0.0507	-0.0815	-0.0656	-0.1040	-0.1022	-0.1589	-0.3567	-0.5361	-1.5349
沪宁	-0.0011	-0.0007	-0.0012	-0.0010	-0.0012	-0.0009	-0.0013	-0.0010	-0.0012	-0.0009	-0.0105
浙江	-0.0022	-0.0036	-0.0038	-0.0068	-0.0040	-0.0073	-0.0030	-0.0056	-0.0027	-0.0049	-0.0439
安徽	-0.0043	-0.0036	-0.0087	-0.0081	-0.0099	-0.0095	-0.0100	-0.0095	-0.0079	-0.0077	-0.0792
福建	-0.0054	-0.0032	-0.0084	-0.0058	-0.0112	-0.0076	-0.0143	-0.0097	-0.0124	-0.0090	-0.0870
江西	-0.0052	-0.0051	-0.0059	-0.0068	-0.0061	-0.0068	-0.0087	-0.0093	-0.0091	-0.0102	-0.0732
山东	-0.0008	-0.0005	-0.0011	-0.0007	-0.0011	-0.0008	-0.0011	-0.0008	-0.0037	-0.0022	-0.0128
河南	-0.0015	-0.0006	-0.0025	-0.0011	-0.0025	-0.0012	-0.0028	-0.0013	-0.0035	-0.0016	-0.0186
湖北	-0.0069	-0.0082	-0.0137	-0.0177	-0.0150	-0.0201	-0.0127	-0.0171	-0.0098	-0.0131	-0.1343
湖南	-0.0154	-0.0223	-0.0183	-0.0302	-0.0217	-0.0341	-0.0222	-0.0355	-0.0219	-0.0348	-0.2564
广东	-0.0125	-0.0073	-0.0184	-0.0128	-0.0201	-0.0140	-0.0241	-0.0163	-0.0333	-0.0222	-0.1810
广西	-0.0093	-0.0111	-0.0111	-0.0153	-0.0116	-0.0154	-0.0246	-0.0308	-0.0267	-0.0362	-0.1921
四川	-0.0660	-0.0297	-0.0979	-0.0537	-0.1200	-0.0651	-0.1407	-0.0762	-0.3641	-0.1787	-1.1921
贵州	-0.0119	-0.0090	-0.0151	-0.0136	-0.0191	-0.0164	-0.0201	-0.0176	-0.0328	-0.0272	-0.1828
云南	-0.0566	-0.0145	-0.0993	-0.0327	-0.0966	-0.0355	-0.1075	-0.0364	-0.0977	-0.0355	-0.6123
西藏	-0.0115	0.0024	-0.0139	0.0020	-0.0203	0.0032	-0.0213	0.0029	-0.0205	0.0027	-0.0743
陕西	-0.0030	-0.0014	-0.0124	-0.0062	-0.0142	-0.0083	-0.0055	-0.0041	-0.0070	-0.0034	-0.0655
甘肃	-0.0218	-0.0017	-0.0364	-0.0053	-0.0500	-0.0075	-0.0635	-0.0097	-0.0753	-0.0119	-0.2831
青海	-0.0128	-0.0028	-0.0165	-0.0052	-0.0214	-0.0063	-0.0254	-0.0077	-0.0260	-0.0081	-0.1322
宁夏	-0.0018	0.0002	-0.0022	0.0001	-0.0022	0.0001	-0.0022	0.0001	-0.0016	0.0000	-0.0095
新疆	-0.0264	0.0097	-0.0308	0.0095	-0.0589	0.0193	-0.0370	0.0095	-0.0335	0.0095	-0.1291
总计	-0.3598	-0.1866	-0.5317	-0.3328	-0.6474	-0.3833	-0.7569	-0.4969	-1.4071	-1.0778	-6.1803

a) 表中负号表示碳储量减少, 反之亦然

时, 过去 300 年间土壤碳损失 2.48 Pg C; 当毁林 50 年后土壤碳损失 50% 的情景下, 过去 300 年间土壤碳损失 5.84 Pg C. 由于中国大部分地区处于亚热带及以北气候带, 第二种情景比较符合土壤活动的实际, 因此认为过去 300 年间受土地利用变化影响, 土壤碳总计损失约 2.48 Pg C 的估算结果最为适中.

(3) 土地利用、土地覆被变化与生态系统碳排放. 土地利用与覆被变化引起的陆地生态系统碳排放主要包括上述地表植被破坏所引起的碳排放和土壤变化碳排放两个方面. 显而易见, 将上述 2 部分陆地生态系统碳排放量相加, 便得到过去 300 年间土地利用与覆被变化对陆地生态系统碳循环的影响. 过去 300 年间, 受土地利用变化影响, 中国陆地生态系统植被和土壤总计排放碳 4.50~9.54 Pg C, 最适估计为 6.18

Pg C. 最适估算下, 各时段碳排放的区域差别见图 6(a)~(e), 全国总排放的区域差异见图 6(f). 1700~1949 年之间每 50 年的碳排放及土壤与植被排放对比如图 7 所示.

3 结论与讨论

在过去 300 年, 特别是清时期, 中国社会经历了由盛而衰的发展过程, 有清前期“康雍乾盛世”的空前繁荣、清中期社会经济发展的相对停滞和清后期的迅速衰退, 而且饱受战乱和各种社会动荡危害. 这些对全国的农业生产和土地利用与管理都有较大影响. 在前期的经济快速发展和人口高增长水平下, 土地垦殖扩张成为必然. 人口膨胀更是深刻影响到清代及此后的农业垦殖和社会经济结构, 改变了自然生

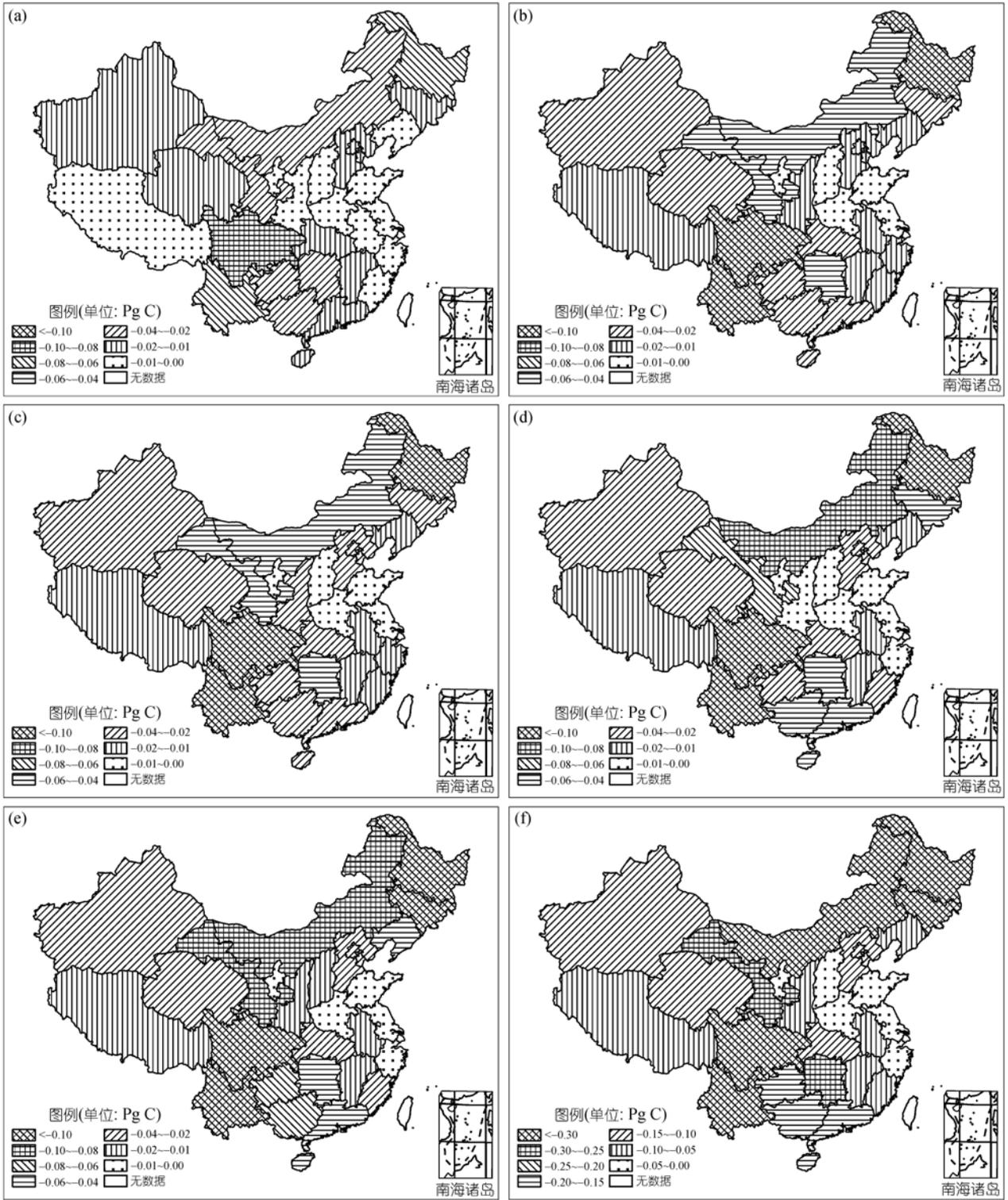


图 6 1700~1949 年土地利用与覆被变化引起的碳排放

(a) 1700~1750; (b) 1750~1800; (c) 1800~1850; (d) 1850~1900; (e) 1900~1949; (f): 1700~1949

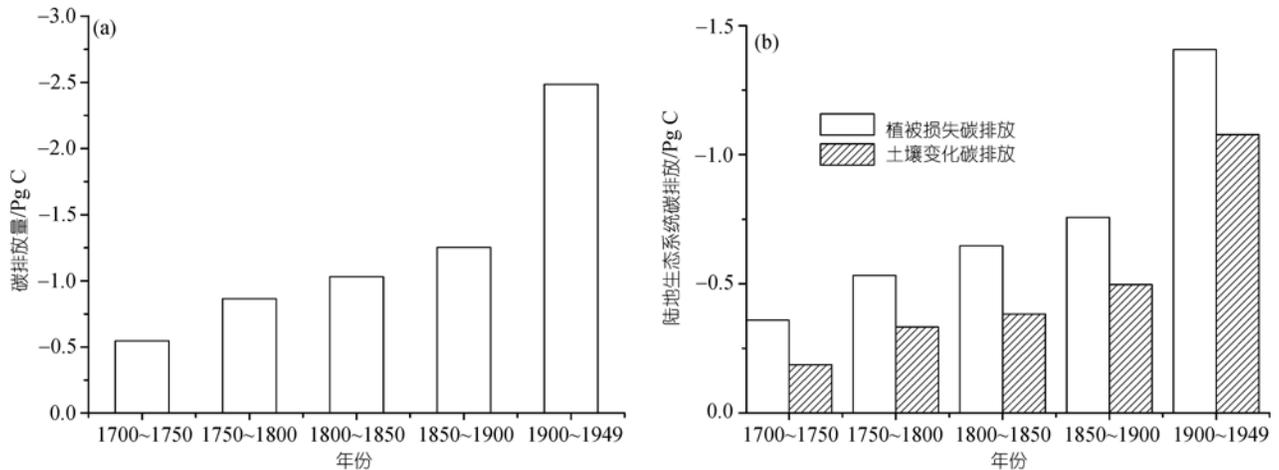


图 7 1700~1949 年土地利用与覆被变化引起的碳排放

(a) 总体排放; (b) 植被、土壤对比

态系统的许多环节及其碳循环机制。其中, 森林破坏和耕作扩展是引起陆地生态系统碳排放的主要原因。本文从原始土地利用资料入手, 分析了过去 300 年全国土地利用与覆被变化的主要特征, 估算了陆地生态系统碳储量的动态, 主要得到以下结论。

3.1 森林面积变化

研究时段的土地利用与覆被变化主要反映在森林面积的急剧减少和耕地面积的快速增加。其间, 全国范围的森林面积在 1700 年为 $248.13 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 此后开始持续降低, 截止 1949 年降至 $109.01 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。这是全国陆地生态系统碳储量减少的主要原因之一。

3.2 耕地面积变化

据推算, 过去 300 年全国耕地面积增长比较迅猛, 从 1661 年的 $60.78 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 增加到 20 世纪末的 $96.09 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。而且, 后期增加主要反映在东北、内蒙和新疆等边远地区的快速开垦上。

3.3 陆地生态系统碳循环变化

(1) 总体变化: 清代以来, 受土地利用与覆被变化影响, 全国地上植被破坏引起的碳排放大约为 3.70 Pg C; 土壤碳排放介于 0.80~5.84 Pg C 之间, 最适估计为 2.48 Pg C, 300 年间陆地生态系统碳排放共计 4.50~9.54 Pg C, 最适估计为 6.18 Pg C。由图 6, 7 可见, 研究时段中国陆地生态系统碳排放呈加速变化趋势。后期变化逐渐增加, 最大值出现在 1900~1949 年之间。

而在各时段内, 植被排放均大于土壤排放。但是, 全球土壤碳库约是陆地生物物质碳库的 2~4 倍^[62,63], 土壤碳储量变化值得密切关注。而且, 土壤变化过程比植被的更复杂, 存在较为明显的滞后效应, 因此, 越是后期, 土壤碳排放与植被排放就越接近。

(2) 碳排放时空差异: 由于各地土壤和植被碳密度以及土地利用与覆被变化的情形均不相同, 由此引起的陆地生态系统碳排放也具有比较明显的时空差异。

从图 6 可知, 1700~1750 年, 土地利用与覆被变化对陆地生态系统影响较小, 碳储量减少不十分明显。该时期, 东北地区北部和西南地区碳储量有所减少。传统农区的华北地区和华东地区改变不大。1750~1800 年, 东北地区北部和西南地区的植被破坏加重, 陆地生态系统碳储量减少加快。1800~1850 年, 四川和东北地区的陆地生态系统碳排放进一步加大, 内蒙古地区碳排量较多。1850~1949 年, 东北地区 and 西南山地的植被破坏进一步加剧, 碳排放随之增加。由此可见, 研究时段后期全国山地比重较大省份的生态系统碳排放明显增大, 这正是大规模山地垦荒的严重后果。

过去 300 年间, 东北地区北部受土地利用与覆被变化影响的碳排放量最大, 其他碳排放较大的区域依次是西南地区的四川和云南、内蒙古、华南西部地区、华中地区。同时期, 新疆、华东地区和青藏高原地区的陆地生态系统碳排放相对较少, 这是由于这

些区域的自然植被本底较差, 或者以往开发程度已经很高, 清代以来的开垦潜力不大所致。

3.4 近年土地利用与覆被变化与陆地生态系统碳循环

上述估算截至 1949 年, 近年来, 我国学者关于全国陆地生态系统碳循环研究取得丰硕成果, 有关结论具有较高的引用价值。Fang 等^[34]研究表明, 1949~1980 年中国森林变化继续引起碳排放, 总计大约排放 0.68 Pg C, 但是 1980~1998 年, 森林恢复更加明显, 造林和再造林(afforestation and reforestation)引起陆地生态系统吸收大约 0.45 Pg C^[34]。最近 20 年以来, 中国土壤有机碳呈现比较明显的增加趋势, 大约增加 311.3~401.4 Tg C^[64]。因此近期的土地利用与覆被变化引起中国陆地生态系统碳储量增加, 而且趋势明显。

3.5 讨论

(1) 近年来, 我国碳排放已经引起了国外有关方面的密切关注, 国外学者也进行了大量中国土地利用与覆被变化以及对生态系统碳储量关系方面的研究。其中, Houghton 等^[19]估算的影响较大, 具有代表性。其研究表明, 过去 300 年间, 我国由于土地利用与覆被变化引起的陆地生态系统碳排放量在

17.1~33.4 Pg C 之间。这与本文估算结果相差甚远。

究其原因, 两项研究存在以下主要差别。第一, 研究单元差异较大。Houghton 等^[19]以大区为单位进行讨论, 将我国划分为东北、华北、西北、东部平原、西南、东南等六大区。本文从省域尺度进行估算和分析, 比前者在空间尺度上更为精细。第二, 对于基础时段的森林面积估算有较大差别, 他们认为 1700 年左右中国的森林面积达 $322 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 比本文估算偏大约 1/3。该估算是基于国外有关全球变化的土地利用数据库而来, 整体比较粗糙, 对中国区域的估算更是偏差太大。而本文是在掌握大量历史文献资料基础上完成的, 因此两者的数据质量差异非常明显。第三, 两项研究对生物量碳密度和土壤碳密度基础数据的引用上有一定差别。虽然都是采用相似出处, 但是本文由原始数据推算而来, 这在根本上保证了估算精度较高。

(2) 近年来, 笔者在历史土地利用与覆被变化研究领域进行了大量探索, 尤其是对历史时期耕地变化和森林变化的研究更是得到普遍认可。但是, 对其他土地利用类型变化的研究也是我们所面对的重大历史任务。其中, 草地、荒漠等生态系统类型变化对陆地生态系统的碳循环也有一定影响。这是笔者下一步要深入开展的工作。

致谢 王绍强博士提供了中国土壤密度计算的原始资料; 匿名审稿人认真审阅并提出了建设性意见和建议, 在此一并致谢。

参考文献

- 1 IPCC. Land-use, Land-use Change and Forestry. In: Watson R T, Noble I R, Bolin B, et al, eds. A Special Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- 2 Klein Goldewijk K, Ramankutty N. Land cover change over the last three centuries due to human activities: the availability of new global data sets. *Geo J*, 2004, 61: 335—344
- 3 Ramankutty N, Foley J A. Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992. *Glob Biogeochem Cycle*, 1999, 13(4): 997—1027 [\[DOI\]](#)
- 4 Klein Goldewijk K. Three centuries of global population growth: a spatial referenced population density database for 1700~2000. *Popul Environ*, 2005, 26 (5): 343—367 [\[DOI\]](#)
- 5 IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al, eds. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- 6 Houghton R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850~1990. *Tellus*, 1999, 51B: 298—313

- 7 DeFries R S, Field C B, Fung I, et al. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity. *Glob Biogeochem Cycle*, 1999, 13(3): 803—815[DOI]
- 8 McGuire A D, Sitch S, Clein J S, et al. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: analyses of CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models. *Glob Biogeochem Cycle*, 2001, 15(1): 183—206[DOI]
- 9 Pacala S W, Hurtt G C, Moorcroft P R, et al. Carbon Storage in the US Caused by Land Use Change. Present and Future of Modeling. In: Matsuno T, Kida H, eds. *Global Environmental Change: Toward Integrated Modeling*, 2001. 145—172
- 10 Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, et al. Consistent land and atmosphere-based U S. carbon sink estimates. *Science*, 2001, 292(5525): 2316—2340[DOI]
- 11 Houghton R A. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? *Glob Change Biol*, 2003, 9: 500—509[DOI]
- 12 Schimel D S, House J I, Hibbard K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2000, 414: 169—172[DOI]
- 13 IPCC. Good Practice Guidance for Land Use. In: Jim P, Michael G, Taka H, et al, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2003
- 14 Houghton R A, Hackler J L. Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia. *Glob Change Biol*, 1999, 5: 481—492[DOI]
- 15 Houghton R A, Hackler J L. Changes in terrestrial carbon storage in the United States. 1: The roles of agriculture and forestry. *Glob Ecol Biogeogr*, 2000, 9: 125—144[DOI]
- 16 Farquhar G D, Fasham M J R, Goulden M L, et al. The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- 17 Kaupp P E, Ausubel J H, Fang J, et al. Returning forests analyzed with the forest identity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2006, 136: 17574—17579[DOI]
- 18 Houghton R A, Hobbie J E, Mellilo J M, et al. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to atmosphere. *Ecol Monogr*, 1983, 53(3): 235—262[DOI]
- 19 Houghton R A, Hackler J L. Sources and sinks of carbon from land-use change in China. *Glob Biogeochem Cycle*, 2003, 17(2): 1034[DOI]
- 20 Houghton R A, Hackler J L. Continental scale estimates of the biotic carbon flux from land cover change: 1850~1980, ORNL/CDIAC-79, NDP-050, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, 1995. 144
- 21 Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850~2000. *Tellus Ser B-Chem Phys Meteorol*, 2003, 55: 378—390[DOI]
- 22 Houghton R A. Tropical deforestation and atmospheric carbon dioxide. *Clim Change*, 1991, 19(1-2): 99—118[DOI]
- 23 Houghton R A, Hackler J L. Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia. *Glob Change Biol*, 1999, 5: 481—492[DOI]
- 24 Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. *Science*, 1999, 285(5427): 574—578[DOI]
- 25 Lucc Scientific Steering Committee. Key findings of Lucc on its research questions. *Glob Change Newsltt*, 2005, 63: 12—14
- 26 Klein Goldewijk K. Estimating global land use change over the past 300 years: the HYDE database. *Glob Geobiochem Cycle*, 2001, 15: 417—433[DOI]
- 27 Ramankutty N, Foley J A. Characterizing patterns of global land use: an analysis of global croplands data. *Glob Biogeochem Cycle*, 1998, 12(4): 667—685[DOI]
- 28 Hurtt G C, Frolking S, Fearon M G, et al. The underpinnings of land-use history: three centuries of global gridded land-use transitions, wood-harvest activity, and resulting secondary lands. *Glob Change Biol*, 2006, 12: 1208—1229[DOI]
- 29 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社, 1999. 1—50
- 30 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
- 31 Fang J Y, Wang G G, Liu G, et al. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship. *Ecol Appl*, 1998, 8(4): 1084—1091
- 32 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. *植物学报*, 2001, 43 (9): 967—973
- 33 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. *地理科学*, 2004, 24(1): 50—54
- 34 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[DOI]

- 35 方精云, 陈安平, 赵淑清, 等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文 (Science, 2001, 291: 2320—2322) 的若干说明. 植物生态学报, 2002, 26 (2): 243—249
- 36 葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 等. 过去 300 年中国部分省区耕地资源数量变化及驱动因素分析. 自然科学进展, 2003, 13: 825—832
- 37 葛全胜, 戴君虎. 20 世纪中前期中国农林土地利用变化及驱动因素分析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(1): 54—63
- 38 何凡能, 葛全胜, 戴君虎, 等. 近 300 年来中国森林的变迁. 地理学报, 2007, 62(1): 30—40
- 39 梁方仲. 中国历代户口、田地、田赋统计. 上海: 上海人民出版社, 1980. 380—422
- 40 陈登元. 中国土地制度. 北京: 商务印书馆, 1931. 290—295
- 41 陈登原. 中国田赋史. 上海: 商务印书馆, 1936. 194—262
- 42 李文治. 中国近代农业史资料. 第一辑(1840~1911). 北京: 生活、读书、新知三联书店, 1958
- 43 Perkins D M. Agricultural Development in China. Chicago: Aldine Publishing Company, 1969. 1368—1968
- 44 凌大燮. 我国森林资源的变迁. 中国农史, 1982, 2: 26—36
- 45 樊宝敏, 董源. 中国历代森林覆盖率的探讨. 北京林业大学学报, 2001, 4: 60—65
- 46 陈嵘. 中国森林史料. 北京: 中国林业出版社, 1982. 71—152
- 47 马忠良, 宋朝枢, 张清华. 中国森林的变迁. 北京: 中国林业出版社, 1997. 120—132
- 48 Baker O E. Land Utilization in China. In: Condliffe J B, ed. Problems of the Pacific: Proceedings of the Second Conference of the Institute of Pacific Relations, Honolulu, Hawaii, July 15 to 29, 1927. Chicago: University Of Chicago Press, 1928. 324—338
- 49 Buck J L. 中国土地利用统计资料. 上海: 商务印书馆, 1937. 21—30
- 50 乔启明, 蒋杰. 中国粮食与食粮问题. 上海: 中华书局, 1937
- 51 何炳棣. 中国古今土地数字的考释和评价. 北京: 中国社会科学出版社, 1988. 61—100
- 52 Wang S Q, Tian H Q, Liu J Y, et al. Pattern and change of soil organic carbon storage in China: 1960~1980s. Tellus, 2003, 55B: 416—427
- 53 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 等. 1990~2000 年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化. 地理学报, 2004, 59(4): 483—496
- 54 民国政府主计处统计局. 中国土地问题之统计分析. 南京: 正中书局, 1936. 1—49
- 55 Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. New York: Springer-Verlag, 1975
- 56 Palm C, Sanchez P, Ahamed S, et al. Soils: a contemporary perspective. Ann Rev Environ Res, 2007, 32: 99—129[DOI]
- 57 Detwiler R P. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils. Biogeochemistry, 1986, 2: 67—93[DOI]
- 58 曹树基. 清时期. 见: 葛健雄, 主编. 中国人口史. 上海: 复旦大学出版社, 2001. 1—16
- 59 赵冈. 中国历史上生态环境之变迁. 北京: 中国环境科学出版社, 1996
- 60 国家统计局国民经济综合统计司. 新中国五十年统计资料汇编. 北京: 中国统计出版社, 1999
- 61 林珊珊. 中国传统农区清代耕地数据网格化重建研究. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2007
- 62 Lal R. World soils and the greenhouse effect. Glob Change Newslett, 1999, 37: 4—5
- 63 Watson R T, Noble I R. Carbon and the Science-Policy Nexus: the Kyoto Challenge. In: Steffen W, Jager J, Carson D, et al, eds. Challenges of a Changing Earth. Proceedings of the Global Change Open Science Conference. Berlin: Springer, 2001. 57—64
- 64 黄耀, 孙文娟. 近 20 年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势. 科学通报, 2006, 51(7): 750—763s