

文章编号: 1000-5862(2013) 01-0093-08

土地利用变化的碳排放机理及效应研究综述

张 婷¹, 蔡海生^{2*}, 王小明

(1. 江西农业大学江西省鄱阳湖流域农业与生态工程技术研究中心, 江西 南昌 330045;

2. 江西农业大学南昌市鄱阳湖生态重点实验室, 江西 南昌 330045)

摘要: 就影响陆地生态系统碳储量的主要生态机制(CO_2 施肥效应、氮沉降增加、污染、全球气候变化、土地利用变化和土地管理) 阐述了土地利用变化对陆地生态系统结构和功能产生的影响, 以及对系统造成的碳储量变化. 主要从土地利用变化和土地管理两方面对土地利用碳排放效应进行论述: 森林砍伐后变为农田和草地, 使生态系统中植被和土壤碳储量大大降低; 农田和草地弃耕恢复为森林, 以及农田保护性管理措施的利用, 能够使大气中的碳在植被和土壤中得到汇集; 森林恢复过程中植被可以大量汇集大气中的碳, 而由于农田耕种历史不同以及土壤空间异质性, 导致土壤碳汇集速率差异极大; 保护性农田管理措施(诸如免耕、合理的种植制度、化肥的施用等) 可以影响土壤理化特性、作物根系生长以及残茬数量和质量、土壤微生物数量和活性, 维持和提高土壤碳含量水平. 土地利用碳排放核算主要从陆地生态系统的植被碳和土壤碳入手, 综述了目前国内外的研究进展.

关键词: 土地利用变化; 碳排放; 机理; 效应

中图分类号: F 301 **文献标志码:** A

0 引言

20 世纪 70 年代以来, 人类开始普遍关注有关全球碳循环的研究, 特别是导致全球变暖和碳排放增加的人类活动, 如化石燃料的燃烧和土地利用活动对碳排放的影响^[1]. 其中对陆地生态系统碳循环影响最大的人为驱动因素之一要算土地利用方式的变化, 其对大气 CO_2 浓度急剧增加的影响仅次于人类燃烧化石燃料^[2]. 土地利用变化对土壤的影响表现在两方面: 一是直接影响土壤有机碳的分布及含量, 二是间接影响土壤有机碳的含量和分布, 间接影响是通过影响与土壤有机碳的形成和转化有关的因子^[3]. 不合理的土地利用会导致大气 CO_2 浓度的增加, 其主要是因为土地利用方式不合理会导致土壤中的碳素释放到大气中, 从而导致土壤储存的碳和植被生物量减少, 而大气 CO_2 浓度的增加又会进一步影响全球变暖和与大气 CO_2 浓度增加有关的气候变化^[4]. 因此, 土地利用变化的碳排放机理和效应成为当今的一个研究热点问题.

1 土地利用碳排放机理

对陆地碳汇形成机制的影响可分为两大类^[5]: 第一类是影响光合作用、呼吸作用、生长以及腐烂分解速率的生理代谢机制, 包括有效营养物质的增加、大气 CO_2 浓度增加、气温升降、降雨变化, 以及能够提高森林生长速率的任何生态机制, 而这些机制往往受到人类活动的间接影响; 第二类是干扰和恢复机制, 包括自然干扰和土地利用变化和管理的影响^[6].

1.1 生理代谢作用及生态机制

1.1.1 CO_2 施肥作用 主要在热带的全球 CO_2 施肥作用形成了 $0.5 \sim 2.0 \text{ Pg C/年}$ 的碳汇^[7]. 然而有研究表明, 温度的升高会抵消甚至超过 CO_2 施肥作用带来的 NPP 增加, 因为在某种程度上温度的升高可能导致微生物异养呼吸作用的增强^[8]. 一些实验研究结果表明, 由于营养物质的限制, 在未来 50 年内当 CO_2 浓度增加至 $550 \sim 650 \text{ mg/kg}$, NPP 将在超过目前 $10\% \sim 20\%$ 的水平上保持稳定^[9]. 大气 CO_2 浓度升高对土壤碳循环的影响主要体现于以下 4 个

收稿日期: 2012-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(40861029), 江西省社会科学研究“十二五”规划课题(11YJ12, 11Y13), 江西省教育厅科技课题(GJJ12218), 江西省软科学课题(20111BAA10010) 和江西省高校人文社科课题(GL1030) 资助项目.

作者简介: 蔡海生(1972-) 男, 江西万年人, 教授, 博士, 主要从事土地生态和土地经济研究.

方面:(1) CO_2 浓度的升高对气候变化有驱动作用,这就加速了土壤有机碳的分解^[10];(2) CO_2 浓度升高会刺激土壤微生物种群的增长,主要是因为 CO_2 浓度的升高增加了微生物的碳供应和根系的碳通量;(3) 大气 CO_2 浓度通过影响地表植被的生长来影响土壤碳的归还量,特别会对凋谢物的分解速度造成影响^[11];(4) 大气 CO_2 浓度的升高促进光合作用的进行,然而光合作用产物主要分布在植物根系的生长和分泌物的增加这两种形式,这就导致了土壤碳的积累和循环过程会受到根系生长和吸收能力变化的影响^[12]。

1.1.2 氮沉降作用 生态系统 NPP 增加有很多限制因子,其主要限制因子是有效态 N 的不足^[13]。森林氮沉降的这种施肥作用不仅能延长土壤有机质的滞留时间,还可以促进 NPP 的增加^[14]。全球人为氮沉降的增加导致了约 0.2 ~ 2.0 Pg C/年碳汇的增加(主要发生在北半球)^[7]。然而沉降的氮很大一部分并没有为植物所用,其可能被固定在土壤中,也可能流失到生态系统之外^[5]。此外,生态系统的氮积累有一定的限度,如果到达了一定程度,就可能出现氮饱和现象^[10],也有可能在超过某个临界值后,生态系统的氮积累会引起生态系统退化,从而减少碳储量^[15]。

1.1.3 污染 如 SO_2 和臭氧等诸多污染物质会直接影响到光合速率,其主要是通过增长叶面积来减缓光合速率,或是通过进入气孔来破坏光能合成组织^[13]。降雨会导致 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 沉降,沉降又进一步引起土壤酸化,土壤酸化再次造成以下 3 种影响:(1) 削弱了有效营养元素(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+)的吸收;(2) 增强了 Al 的流动性和毒性;(3) 增加了森林土壤中 N 和 S 的储量^[16]。臭氧浓度的升高会减缓森林生长速率^[17-18]。臭氧对森林 NPP 的危害比例将呈现增长趋势,可能从 1990 年的 25% 增加到 2100 年的 50%^[19]。尽管臭氧和酸雨对 NPP 的影响通常是引起其减少,但这两者对陆地生态系统碳汇的实际影响程度目前人们还不能确定。如果它们减少有机质分解的作用大于减少 NPP 的作用,也许能引起碳储量的增加^[5-6]。

1.1.4 气候变化 UNFCCC 将气候变化定义为经过相当一段时间的观察,在自然气候变化之外由人类活动直接或间接地改变全球大气组成所导致的气候改变^[20]。气候变化(例如温度、湿度和辐射变化等)通过影响光合作用(碳的输入)和呼吸作用(碳的输出),进而影响陆地生态系统的碳汇形成机制^[6]。而且全球气候变化也会通过影响土壤呼吸,进而影响土壤碳储量,这种影响包括短期影响和长期影响。短期内的气候变暖会降低土壤的碳储量,因

为它能够引起异养呼吸增加,然而生态系统的呼吸作用对温度变化的适应程度很强,因此长时间尺度内呼吸速率并不是温度的线性增函数^[13]。而且在温度升高的同时,土壤中有有机营养元素(有机氮等)的矿化速率加快,这有助于植物中有效营养的吸收和 NPP 增加^[21-22]。除一些沙漠外,土壤呼吸随温度的升高而增强,这可以从集中于土壤变暖的研究中找到依据^[23-26]。温度每升高 10 °C,土壤呼吸的增加值,即 Q_{10} 关系值大约为 2.0^[27-29]。研究表明,土壤 CO_2 的排放率与地表温度之间具有极显著的指数函数关系^[30]。几乎所有全球气候变化的模型都预测土壤碳的损失是全球气候变暖的原因之一^[31-32],而全球变暖将促进土壤碳素损失,尤以热带生态系统为敏感^[33]。

1.2 干扰和恢复机制

导致陆地碳循环变化的一个主要因素是土地利用方式的变化,土地利用类型的变化、退化生态系统的恢复以及土地利用的管理方式等途径可以改变植被和土壤的碳库。

1.2.1 土地利用变化 土地利用变化有渐变和变换型之分^[34]。土地利用渐变是指对生态系统过程、群落结构、种群动态产生明显影响,但不发生土地利用类型的变化以及植被类型的变化,如天然林向人工林的转变、传统粗放农业向现代集约农业的转变、草场过度放牧引起的生态系统退化等。土地利用变换型是指由一种土地利用类型转变为另一种土地利用类型,这就会引起附着在土地上的植被功能型发生变化,如林地(森林生态系统)向草地(草地生态系统)的转换。渐变型土地利用方式通过不断地积累也可导致变换型的发生。总体来看,土地利用变化对陆地碳贮量的影响取决于生态系统类型(植被类型)和土地利用类型的变化(地类的变化)^[35]。

1.2.2 土地利用管理和退化生态系统恢复 生态系统的恢复、保护与管理实践可以储存、维持和增大土壤碳库^[36]。人为干扰因素(如森林砍伐与土地开垦)对土壤生态因子的影响较大,随着干扰程度的加剧,土壤理化性质将会变差,进而引起土壤有机质含量的下降,最终会导致土壤稳定性团聚体减少 30%^[37]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)的《土地利用、土地利用变化和林业》特别报告中指出,森林砍伐会导致 CO_2 排放量的增加,而通过造林和再造林措施可以降低 CO_2 排放量,其量从 1.79 Pg C/年降低到 1.20 ~ 1.59 Pg C/年^[6]。退化生态系统的恢复以及土地利用管理水平的提高会增强陆地生态系统的碳汇,据估计由于提高土地利用管理水平,2010 和 2040 年将分别达到 1.3 和 2.5 Pg C/年^[38]。

2 土地利用碳排放效应

20世纪80年代,由于土地利用的变化造成陆地生态系统向大气输入的净碳通量为2 Pg/年,其中绝大部分来自热带地区,其中由林地转化成农田和草地的释放量约占85%,森林砍伐后收获木材及木材加工品释放的碳约占15%^[39]。1850—1990年,由于土地利用变化而引起的CO₂释放到大气中约124 Pg C,大概相当于同时期化石燃料燃烧释放量的一半,其中主要是来自森林生态系统(约为108 Pg C,其中热带森林占2/3,温带和极地森林约占1/3),其余少量的释放主要是中纬度草地的过度放牧和农田耕种引起的^[40]。总的来看,土地利用对陆地生态系统碳贮量的影响取决于陆地生态系统类型和土地利用类型的变化^[35]。

2.1 森林、草地、湿地、农田等土地覆被类型间的转换

许多研究表明,林地转变为耕地后会导致有机碳的损失,主要表现在20~30年内,而损失量多达20%~50%,其中大部分的损失来自于地表有机质的侵蚀,而在这期间变化速率最大的时候是在用地类型转变的最初几年里^[41-42]。之后变化速率会逐渐降低,降低至一定水平会逐渐达到平衡(大约是原来森林的50%),主要是在20年内,并且随着时间的推移,林地转变为耕地后有机碳的损失依自然植被类型、气候变化、土壤类型、管理方式和时间的变化而变化^[43-44]。就全球尺度而言,森林转变为农田土壤有机碳储量平均下降幅度为20%~40%^[41,44-45]。天然林向耕地转变对土壤有机碳的影响表现在两方面:(1)由于植被面积的减少,造成陆地表层的土壤有机质输入量减少;(2)人类活动对陆地生态系统表层土壤的产生干扰,从而减少了表层土壤有机碳的输入,例如人类在对耕地的管理过程中除草活动^[46-47]。同时翻耕改变了土壤温度、湿度、空隙状况和土壤微生物的生长环境,这样会使土壤变得疏松,增强微生物活性,从而加快土壤有机质的分解与消耗速率^[48]。有研究结果显示,在林地转变为草地12~25年左右土壤有机碳含量将减少4%~22%^[49-51],也有研究发现林地向草地转变会导致有机碳蓄积量增加9%~10%^[52-57],有的研究假设热带森林转变为草地和牧场时,发现土壤碳将损失大约25%^[58-59]。

据估计,草地中的碳量存储在土壤中的量占总量的90%,其余10%存储在生物量中,在草地中贮存的碳总量约为266.3 Pg,占陆地生态系统的12.7%^[60]。大多数研究表明:草地开垦为农田会使

土壤碳素总量损失30%~50%^[61]。与森林转变为农田引起土壤有机质损失的机制相似,草地转变为农田也表现在2个方面:(1)草地开垦为农田过程中的挖掘和耕耘等活动会导致草地贮存在土壤中有有机碳的大量释放;(2)开垦活动改善了土壤的温度和湿度条件,这在一定程度上促进了土壤的呼吸作用,加速了土壤有机质的分解^[2]。

农田转变为森林或草地,或是通过土地撂荒和自然演替转变为牧场等,一般会导致土壤有机碳增加^[2]。有研究人员以中国黄土高原地区为例,对其退耕还林后土壤有机碳储量进行分析,结果发现实施退耕还林后,黄土高原地区的土壤有机碳储量将明显增加,如果对其实施分步优化退耕,30年后,黄土高原土壤有机碳储量可增至1266.8 Tg,而整个地区的有机碳储量总体可增长19.21%^[62]。耕地转变为草地对土壤有机碳蓄积量增加的作用主要来源于生物量以及凋落物^[2]。耕地和草地转化为林地的初期土壤有机碳含量会降低,然而随着人工林的恢复,土壤有机碳也能够逐渐恢复平衡态,而且新的土壤有机碳达到平衡的时间会因地区以及树种的不同而表现出差异性^[63]。

湿地转变为农田和林地会导致土壤碳储量的降低,据估计,在过去近200年中,湿地开垦后土壤碳素损失约为4.1 Gt^[64]。宋长春等^[65]对三江平原开垦后土壤碳变化的研究证实了湿地及垦殖后农田土壤呼吸通量与土壤温度(0~5 cm)呈正相关关系,但也有研究者认为温度与土壤CO₂通量呈弱的相关关系,但受光照辐射条件的影响较大^[66]。

2.2 农用地、未利用土地等向建设用地的转化

导致植被中碳储量减少的原因中耕地向建设用地转化是主要的,然而在不同区域耕地转化为建设用地对植被碳储量变化的影响不同,且不同土地利用类型上也存在显著差异^[67]。农用地和未利用地向建设用地的转化也会对土壤碳库产生影响,土地转化为聚居地的过程中,会带来之前用地类型上城镇的发展和扩展,从而引起土壤中的机械性扰乱、发展中土壤的掩埋或收集等现象,进而影响土壤碳库。例如,近年来江苏省建设用地对碳排放的贡献率达到很到的水平,最高甚至达到96%以上,据统计,江苏省建设用地的碳排放每年可达0.109 Pg C^[68]。

2.3 农业生产活动对碳循环的影响

翻耕强度的加剧会加速土壤呼吸速率,并且在耕后的很短时间会激发土壤CO₂通量的释放高峰^[69]。高强度的农业生产活动(例如翻耕等)会导致土壤呼吸强度增加,加速土壤有机质的分解,从而使贮存在土壤中的有机碳减少^[70]。同样传统的耕作

方式也会导致土壤碳的流失,有数据显示传统耕作每年导致了土壤中碳流失大约为 $0.8 \text{ Pg}^{[71]}$ 。

施肥对土壤碳的影响表现在单施肥、配合施肥、施肥类型以及土壤类型等,研究发现单施化肥或配施有机肥均表现为碳的净固定,而不施肥则表现碳的净排放^[72]。对于红壤旱地,如果坚持长期有机肥料与无机肥料配合施用,土壤有机质会从开始的 11.5 g/kg 上升到 $24.3 \text{ g/kg}^{[73]}$ 。对于玉米和小麦轮作植物,轮作期内土壤年呼吸总量在施用有机肥时显著高于单施化肥,土壤呼吸量不会因为有机肥施用量的不同而产生显著差异^[74]。在免耕农田施加氮肥,其土壤呼吸速率会因为微生物的活性减小而减缓,天然草场的土壤呼吸速率也可能在施肥后有所降低^[75]。因此,不同地区、不同植被类型、不同肥料类型、施肥方式的不同和施肥时间的长短等都会对土壤呼吸产生不同的效果,施肥对土壤呼吸的影响也不一样^[76]。

轮作是保持和提高农业生态系统持续性的重要管理措施^[77]。粮草轮作以及在轮作中增加有较高生物量产出和较高秸秆碳氮比的作物的种植,结合秸秆还田可以有效地降低传统种植制度对土壤有机碳的衰减效应;栽培作物的顺序不同也会影响作物根系和作物残体的数量和质量,从而对土壤有机碳产生影响^[78]。

2.4 土地利用管理对碳存储的影响

森林生态系统的恢复以及管理作为陆地碳汇形成原因之一,近年来得到了越来越多的重视。造林对陆地碳汇最明显的影响是在人工林生物量中积累碳,与生物量相比,积累在土壤中的碳要少得多。人工造林的碳汇作用在很大程度上取决于对木材的末端应用^[77]。所以,目前碳循环研究开始从原来的对植被碳和土壤碳研究转向包括木材产品中的碳研究,许多计算造林碳吸收模型都包含了对木材产品中的碳模拟^[78-79]。

从时序上看,中国土壤有机碳库损失的主要途径有生态退化、土壤侵蚀和湿地开垦 3 大类,从区块上看,中国土壤有机碳库损失可能主要发生在生态系统严重退化的地区^[80]以及湿地开垦地区^[81]。城市绿化以及农业四旁绿化实际上具有相当的碳汇能力,然而这类研究往往被忽略。在过去的几十年里,随着中国农田防护林建设以及四旁绿化造林活动的增加,植被表现出来的碳汇相当可观^[82]。而且城市森林的生物量和生长量比草坪、花坛和灌丛要大得多,就以广州市城市森林生态系统为例,研究发现建成区的林地净固碳以地上植被部分为主,而土壤固碳量不足前者 $1/5^{[83]}$ 。

3 土地利用碳排放核算

与陆地碳循环密切相关的土地利用方式的变化包括:林地、草地和农田的相互转化;旱地与湿地的相互转化;木本植物以及外来物种入侵引起的土地覆被变化;城市用地与非城市用地的转化^[35]。

《1996IPCC 温室气体清单指南》把其分为:林地与草地的相互转化、森林与其他木本植物生物量的变化、土地使用后的废弃、贮存在土壤中有有机碳的量变化^[84]。《2006IPCC 国家温室气体清单指南》则引入在《土地利用、土地利用变化和林业优良做法指南 GPG-LULUCF》^[38]中使用的 6 种土地利用类别(即林地、农田、草地、湿地、建设用地和其他土地),并将这些土地类型进一步细分为保持型土地利用方式的土地和转化型土地利用方式的土地^[84]。目前来看,可较全面、综合地评价土地利用的碳排放效果的体系属 IPCC2006 的体系^[85]。

3.1 陆地生态系统碳排放核算进展

现如今,人类活动对陆地生态系统碳循环过程的影响越来越强烈,其中通过对土地利用类型的改变以及土地利用结构的调整来影响陆地生态系统植被和土壤的碳蓄积量^[86],土地利用方式和覆被变化以及土地利用管理等对陆地生态系统碳平衡的影响成为当前研究的重点内容^[87]。

3.1.1 植被碳 陆地生物圈中,森林植被是主体,约占陆地生物量总量的 $85\%^{[88]}$ 。陆地生态系统植被碳核算的模型有很多,其中包括中国科学院在 1988 年建立的中国生态系统研究网络(CERN),这个网络包括了农田、森林、草地、沙漠、沼泽、湖泊、海洋等不同陆地生态系统和水域生态系统的试验站,这些试验站主要是用来对植被生产力进行长时间的生态系统监测,并可以定点定位观测^[89]。1990 年代中期开始,研究者们开始进行野外实测,并将野外实测资料与中国森林资源清查资料结合,开始从国家尺度对森林生物量及其变化进行探讨和估算^[90]。在最近的 20 多年中,有研究显示,森林碳库由 70 年代到 1998 年增加 0.37 Pg C ,这主要由于人工造林在这 20 多年增多^[91]。之后,研究人员发现了 China Flux 模型,这一模型是采用涡度相关技术,这一技术能够长期观测较精确的生态系统生产力^[92]。后来,研究者在模型和分析技术上有所提高,开始进行生产力的模型模拟和空间格局分析,这些分析是基于大量生产力测定和通量观测工作^[85]。

3.1.2 土壤碳 对土壤碳的研究,大多数是以中国第 1 次土壤普查资料以及第 2 次中国土壤普查资料为基础,有学者在此基础上结合了 1:400 万中国土

壤分布图进行估算,结果显示中国土壤总有机碳库为 100 Pg(其中不包括台湾省),也有学者只运用第2次中国土壤普查资料进行计算,并得出的结果为 92 Pg^[93-94]。近10年来,越来越多的中国学者不再采用单一的土壤普查资料,有的采用第2次中国土壤普查资料并结合生态系统植被、土壤碳库分配模型,还有一些以不同比例尺的植被图和土壤图为面积依据来估计,在测定的精确性上,研究成果也有所提高^[85]。有研究对第2次中国土壤普查资料进行刷选,对同一地区中具有相同土壤属性和气候条件的耕地土壤与非耕地土壤样本进行的配对检验,结果显示这两者的土壤有机碳储量之间存在显著差异,土地利用方式的改变在总体上会导致了土壤碳的释放^[95]。

3.2 能源和工业源碳排放核算进展

目前,很多研究人员从宏观分析层面对国家碳减排进行分析,并以国民经济增长、综合能源的消耗及化石燃料的消费作为基础资料^[68]。这是因为近几十年来化石燃料燃烧、产品使用和生产工艺等对大气 CO₂ 浓度增加的贡献率达到 70%~90%。一方面,农用地中林地、草地、农地,以及建设用地中商业用地、居住用地和工业用地等不同土地利用类型的能源消费强度和碳排放强度大多相同;另一方面,建设用地是能源和工业源碳排放的主要土地利用方式。随着人口增长和经济发展,非建设用地向建设用地转化的刚性需求是存在的。这也就表明,能源和工业源碳排放也是由于土地利用方式向建设用地转化刚性所导致的间接土地利用碳排放^[85]。

4 结束语

土地利用碳排放主要是由自然干扰、土地利用变化和管理方式变化3个因素引起。长期以来,从土地利用变化方面看,由于森林转变为农田和草地、草地转变为农田、湿地的转化以及建设用地对农用地和未利用地的占用,导致陆地生态系统碳的大量流失,加剧了温室气体向大气的排放。而农田转变成森林或草地、草地转变成森林增加植被生物量和土壤碳氮蓄积量;从土地利用管理、土地利用政策方面看,农田耕作深度、强度和频度可能加快 SOM 降解,现代农业以化石燃料作为化肥施用会导致土壤向大气中释放 CO₂,使土壤碳储量减少。免耕少耕、合理的轮作制度以及化肥的施用等措施均能提高 SOC,采取保护性管理措施能够减少农田生态系统碳的流失,稳定甚至提高土壤碳储量。城市绿化和农业四旁绿化和水土保持表现出相当的碳汇能力。土地利用

变化影响着陆地生态系统的碳储量,学者们从植被碳和土壤碳对土地利用碳排放进行核算。植被碳核算方面,草地、灌木、农田、湿地等生态系统植被碳循环研究相对较少,主要集中在森林碳储量方面;土壤碳核算方面,中国对土壤碳汇的测算数据甚少,研究主要集中在土壤以及土地利用变化对土壤有机碳的影响方面。然而,目前的研究没有对土地上所承载的自然过程和社会经济发展过程统筹起来,全面考虑碳排放效应。

5 参考文献

- [1] Jean P C, Anver G. The role of the European union in global change research [J]. *AMBIO*, 1994, 23(1): 101-103.
- [2] 汪艳林, 许信旺, 曹志红. 土地利用和覆盖变化对土壤碳库的影响 [J]. *池州学院学报*, 2008(5): 83-89.
- [3] Gregorich E G. Storage of soil carbon in the light fraction and macroorganic matter [M]//Carter M R, Stewart B A. Structure and organic matter storage in soils. Boca raton, FL, USA: Lewis Publ: CRC Press, 1996: 167-190.
- [4] 王绍强, 周成虎, 李克让. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析 [J]. *地理学报*, 2000(5): 533-545.
- [5] Houghton R A. Magnitude, distribution and causes of terrestrial carbon sinks and some implications for policy [J]. *Climate Policy*, 2002(2): 71-88.
- [6] 李玉强, 赵哈林, 陈银萍. 陆地生态系统碳源与碳汇及其影响机制研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2005(1): 37-42.
- [7] 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 [J]. *Science*, 1998, 282: 442-446.
- [8] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system [J]. *Science*, 2000, 290: 291-295.
- [9] Krner C. Biosphere responses to CO₂-enrichment [J]. *Ecol Appl*, 2000, 10: 1590-1619.
- [10] Koch G W, Mooney H A. Response of terrestrial ecosystems to elevated CO₂: a synthesis and summary [M]//KOCHGW, ROY J. Carbon dioxide and terrestrial ecosystem. Academic Press Inc, 1996: 415-429.
- [11] Bazzaz F A. The response of natural ecosystems to the rising global CO₂ levels [J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 1990, 21: 167-196.
- [12] Walker B, Will S. A synthesis of GCTE and related research [J]. *IGBP Science No 1*, Stockholm, Sweden, 1997(1): 1-32.
- [13] Chapin F S III, Maston P A, Mooney H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. New York: Springer-Ver-

- lag Berlin Heidelberg 2002.
- [14] Prentice I C. The carbon cycle and atmospheric CO₂ [R]. IPCC Third Assessment Report ,WG1. Cambridge: Cambridge University Press 2001.
- [15] Aber J D ,McDowell W ,Nadelhoffer K ,et al. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems [J]. *Bioscience* , 1998 ,48:921-934.
- [16] Driscoll C T. Acidicdeposition in the northeastern US: sources and inputs ,ecosystem effects and management strategies [J]. *Bioscience* 2001 51: 180-198.
- [17] McLaughlin S ,Percy K. Forest health in North America: some perspectives on actual and potential roles of climate and air pollution [J]. *Water Air Soil Pollut* ,2000 ,116: 151-197.
- [18] Braun S ,Rihm B ,Schindler C ,et al. Growth of mature beech in relation to ozone and nitrogen deposition: an epidemiological approach [J]. *Water Air Soil Pollut* ,2000 , 116: 356-364.
- [19] Fowler D ,Cape J N ,Coyle M ,et al. The global exposure of forests to air pollutants [J]. *Water Air Soil Pollut* ,2000 , 116: 5-32.
- [20] IPCC. Climate Change 2001: synthesis report [R]. Cambridge: Cambridge University Press 2001.
- [21] Shaver G R ,Canadell J ,Chapin F S III ,et al. Global warming and terrestrial ecosystems: a conceptual framework for analysis [J]. *Biol Sci* 2000 50: 871-882.
- [22] Vukicevic T ,Braswell B H ,Scheimel D. A diagnostic study of temperature controls on global terrestrial carbon exchange [J]. *Tellus B* 2001 53: 150-170.
- [23] Raich J W ,Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. *Global Biogeochem Cycles* ,1995 , 9: 23-36.
- [24] Peterjohn W T ,Melillo J M ,Steudler P A ,et al. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures [J]. *Ecological Applications* , 1994 4: 617-625.
- [25] Christensen T R ,Michelsen A ,Jonasson S ,et al. Carbon dioxide and methane exchange of a subarctic heath in response to climate change related environmental manipulations [J]. *Oikos* ,1997 79: 34-44.
- [26] Rustad L E ,Fernandez I J. Experimental soil warming effects on CO₂ and CH₄ flux from a low elevation spruce-fir forest soil in Maine ,USA [J]. *Global Change Biology* , 1998 4: 597-605.
- [27] Kirschbaum M U F. The temperature of dependence soil organic matter decomposition ,and the effect of global warming on soil carbon storage [J]. *Soil Biological Biochemistry* ,1995 27: 753-760.
- [28] Palmer-Winkler J ,Cherry R S ,Schlesinger W H. The Q₁₀ relationship of microbial respiration in a temperate forest soil [J]. *Soil Biological Biochemistry* ,1996 ,28: 1067-1072.
- [29] Kitterer T ,Reichstein M ,Andren O ,et al. Temperature dependence of organic matter decomposition: A critical review using literature data analyzed with different models [J]. *Biological Fertile Soils* ,1998 27: 258-262.
- [30] 吴仲民 ,曾庆波 ,李意德 等. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO₂ 排放量的初步研究 [J]. *植物生态学报* , 1997 21(5) : 416-423.
- [31] Schimel D S ,Braswell B H ,Holland E A ,et al. Climatic , edaphic and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils [J]. *Global Biogeochemistry Cycles* ,1994 , 8: 279-293.
- [32] McGuire A D ,Melillo J M ,Kicklighter D W ,et al. Equilibrium responses of soil carbon to climate change: empirical and process-based estimates [J]. *Journal of Biogeography* ,1995 22: 785-796.
- [33] Seastedt T R ,Coxwell C C ,Ojima D S ,et al. Controls of plant and soil carbon in a semi-humid temperate grasslands [J]. *Ecological Applications* ,1994 4(2) : 344-353.
- [34] Koch G W ,Mooney H A. Response of terrestrial ecosystems to elevated CO₂: a synthesis and summary [C] // Carbon dioxide and terrestrial ecosystems. San Diego: Academic Press ,1996.
- [35] 杨景成 ,韩兴国 ,黄建辉 等. 土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响 [J]. *应用生态学* ,2003(8) : 1385-1391.
- [36] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环 [M]. 北京: 气象出版社 2002.
- [37] 周正朝 ,上官周平. 人为干扰下子午岭次生林土壤生态因子动态变化 [J]. *应用生态学报* 2005 ,16(9) : 1586-1590.
- [38] IPCC. Climate change 2000 ,land use ,land use change , and forestry. A special report of the IPCC [M]. Cambridge University Press 2000.
- [39] Houghton R A ,Hackler J L. Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia [J]. *Global Change Biol* ,1999 5: 481-492.
- [40] 曲福田 ,卢娜 ,冯淑怡. 土地利用变化对碳排放的影响 [J]. *中国人口·资源与环境* 2011 21(10) : 76-83.
- [41] Mann L K. Changes in soil carbon storage after cultivation [J]. *Soil Science* ,1986 ,142: 279-288.
- [42] Brow N S. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes [J]. *Science* ,1984 223: 1290-1293.
- [43] Bruce P ,Frome M. Carbon sequestration in soil [J]. *Journal of Soiland Water Conservation* ,1999 54: 382-389.
- [44] Murty D ,Kirschbaum M F ,McMurtree R E ,et al. Does conversion of forest to agricultural and land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature [J]. *Global Change Biology* 2002 8: 105-123.
- [45] Guo L B ,Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis [J]. *Global Change Biology* , 2002 8: 345-360.
- [46] Six J ,Elliott E T ,Paustian K. Aggregate and soil organic

- matter dynamics under conventional and no-tillage systems [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63: 1350-1358.
- [47] Lal R, Griffin M, Apt J, et al. Managing Soil carbon [J]. Science, 2004, 304: 393.
- [48] 杨玉盛, 谢锦升, 盛浩, 等. 中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响 [J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1123-1131.
- [49] Veldkamp E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation [J]. Soil Sci Soc Am J, 1994, 58: 175-180.
- [50] Rhoades C C, Ecker G E, Coleman D C. Soil carbon differences among forest, agriculture, and secondary vegetation in lower Montane Ecuador [J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 497-505.
- [51] Trumbore S E, Davidson E A, de Camargo P B, et al. Below-ground cycling of carbon in forests and pastures of Eastern Amazonia [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9: 515-528.
- [52] Neill C, Melillo J J, Steudler P A, et al. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the southwestern Brazilian Amazon [J]. Ecological Applications, 1977, 7: 1216-1225.
- [53] Garcia-Oliva F, Casar I, Morales P. Forest-to-pasture conversion influences on soil organic carbon dynamics in a tropical deciduous forest [J]. Oecologia, 1994, 99: 392-396.
- [54] Chone T. Change in organic matter in an oxisol from the central Amazonian forest during eight years as pasture [M] // Berthelin J. Diversity of environmental biogeochemistry. New York: Elsevier, 1991: 307-345.
- [55] Fisher M J, Rao I M, Ayarza M A, et al. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas [J]. Nature, 1994, 371: 236-238.
- [56] Garcia-Oliva F, Casar I, Morales P. Forest-to-pasture conversion influences on soil organic C and N in a tropical deciduous forest [J]. Oecologia, 1994, 88: 1-12.
- [57] Bonde T A, Christensen B T, Cerri C C. Dynamics of soil organic matter as reflected by natural ^{13}C abundance in particle size fractions of forested and cultivated Oxisols [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1992, 24(3): 275-277.
- [58] Houghton R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990 [J]. Tellus, 1999, 51(B): 298-313.
- [59] Houghton R A, Hobbie J E, Melillo J M, et al. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO_2 to the atmosphere [J]. Ecological Monographs, 1983, 53(3): 235-262.
- [60] Raich J K, Schlesinger W H. The global dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Tellus, 1992, 44: 81-99.
- [61] 李凌浩. 土地利用变化对草原生态系统土壤碳贮量的影响 [J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 300-302.
- [62] 彭文英, 张科利, 杨勤科. 退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测 [J]. 地域研究与开发, 2006, 25(3): 94-99.
- [63] Paul K J, Polglase P J, Nyakuengama J G, et al. Change in soil carbon following afforestation [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 168: 241-257.
- [64] Brix H, Sorrell B K, Lorenzen B. Are phragmites-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases [J]. Aquatic Botany, 2001, 69: 313-324.
- [65] 宋长春, 阎百兴, 王毅勇, 等. 沼泽湿地开垦对土壤水热条件和性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 144-147.
- [66] Fitter A H. Root production and turnover in an upland grassland subjected to artificial soil warming respond to radiation flux and nutrients, not temperature [J]. Oecologia, 1999, 120: 575-581.
- [67] 姜群鸥, 邓祥征, 战金艳, 等. 黄淮海平原耕地转移对植被碳储量的影响 [J]. 地理研究, 2008, 27(4): 839-846.
- [68] 胡初枝, 黄贤金, 钟太洋, 等. 江苏省碳排放及影响因素区域差异比较研究 [J]. 中国地理学会 2007 年学术年会, 2007.
- [69] 黄承才, 葛滢, 常杰. 人为扰动对森林生态系统土壤呼吸的影响 [J]. 浙江林业科技, 1999, 19(4): 18-21, 27.
- [70] 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律 [J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 992-999.
- [71] Schlesinger William H, Andrews Jeffrey A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7-20.
- [72] 郑聚锋, 张旭辉, 潘根兴, 等. 水稻土基底呼吸与 CO_2 排放强度的日动态及长期施肥下的变化 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 485-494.
- [73] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 98-100.
- [74] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪, 等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 687-691.
- [75] De Jong E, Schappert H J V, MacDonald K B. Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soils affected by management practices and climate [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1974, 54: 299-307.
- [76] 吴志丹, 李跃森, 王义祥, 等. 经营措施对土壤碳储量和碳通量的影响 [J]. 热带农业科学, 2008(1): 84-92.
- [77] Fearnside P M. Forests and global warming mitigation in Brazil: opportunities in the Brazilian forest sector for responses to global warming under the "development mechanism" [J]. Biomass and Bioenergy, 1999, 16: 171-189.
- [78] Mascara O R, Garza-Caligaris J F, Kanninen M, et al. Modeling carbon sequestration in afforestation agroforestry and forest management projects: the CO_2 FIX V. 2 approach

- [J]. Ecological Modelling 2003 ,164: 177-199.
- [79] Zhang Xiaoquan ,Xu Deying. Potential carbon sequestration in China's forests [J]. Environmental Science & Policy 2003 6: 421-432.
- [80] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化 [J], 气候变化研究进展 2008 4(5): 282-289.
- [81] 张旭辉, 李典友, 潘根兴, 等. 我国湿地土壤资源保护与气候变化问题 [J]. 气候变化研究进展 2008 4(4): 202-208.
- [82] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学 2007 37(6): 804-812.
- [83] 李晓曼, 康文星. 广州市城市森林生态系统碳汇功能研究 [J]. 中南林业科技大学学报 2008 28(1): 8-13.
- [84] IPCC. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南 [R]. 日本全球环境战略研究所 2006.
- [85] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究 [D]. 江苏南京: 南京大学 2010.
- [86] Solomon A M. The interaction of climate and land use in future terrestrial carbon Storage and release [J]. Water , Air , Soil Pollut ,1993 ,70: 595-614.
- [87] Gregorich E G ,Rochette P ,McGuire S ,et al. Soluble organic carbon and carbon dioxide fluxes in maize fields receiving spring applied manure [J]. Environ Qual ,1998 , 27: 209-214.
- [88] Lieth H ,Whittaker R H. Primary productivity of the biosphere [M]. New York: Springer-Verlag ,1975.
- [89] 冯险峰, 刘高焕, 陈述彭, 等. 陆地生态系统净第一性生产力过程模型研究综述 [J]. 自然资源学报 2004 ,19(3): 369-378.
- [90] 张钦云. 盈江县主要森林类型碳汇功能及其固碳价值评价 [J]. 山东林业科技 2009(5): 79-82.
- [91] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义 [J]. 植物学报(英文版): 2001(9): 967-973.
- [92] 孙晓敏, 温学发, 于贵瑞, 等. 中亚热带季节性干旱对干烟洲人工林生态系统碳吸收的影响 [J]. 中国科学(D 辑) 2006(A01): 103-110.
- [93] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算 [J]. 地理研究 1999 ,18(4): 349-355.
- [94] 解宪丽. 基于 GIS 的国家尺度和区域尺度土壤有机碳库研究 [D]. 南京: 南京师范大学 2004.
- [95] 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 [J]. 地理学报 2003 ,58(5): 727-734.

Summarization of the Effects of Land Use Changes on Carbon Emission

ZHANG Ting¹, CAI Hai-Sheng^{2*}, WANG Xiao-ming

(1. Agriculture and Ecology Engineering Research Center of Poyang Lake Watershed in Jiangxi Province ,
Jiangxi Agriculture University ,Nanchang Jiangxi 330045 ,China;

2. Ecology Key Laboratory of Poyang Lake in Nanchang ,Jiangxi Agriculture University ,Nanchang Jiangxi 330004 ,China)

Abstract: Bases on the impact of a major ecological mechanisms of the terrestrial ecosystem carbon stocks (CO₂ fertilization effect ,increased nitrogen deposition ,pollution ,global climate change ,land use change and land management) ,the impact of land use change on terrestrial ecosystem structure and function was described ,as well as changes of system carbon stocks. This article discusses the effect of land use carbon emissions from land-use change and land management ,deforestation into farmland and grassland greatly reduces ecosystem vegetation and soil carbon storage. Farmland and grassland abandonment revert to forest ,and the use of farmland protective management measures ,can make the atmosphere in the vegetation and soil carbon get together. The forest vegetation recovery progress can collect a lot of pooled atmospheric carbon ,however ,because of farmland farming history and different soil spatial heterogeneity ,which lead to soil carbon collection rate vary enormously. Protective farmland management measures (such as zero tillage ,reasonable cropping system ,fertilizer application ,etc.) can affect the soil physical and chemical properties ,crop root growth and residue quantity and quality ,soil microbial quantity and activity ,maintain and improve soil carbon content level. Land use carbon emissions accounting mainly from vegetation and soil carbon of terrestrial ecosystem carbon ,reviews the research progress at home and abroad.

Key words: land use change; carbon emission; mechanization; effect

(责任编辑: 刘显亮)