

气候变化背景下中国陆地生态系统碳储量 及碳通量研究进展

李国栋¹, 张俊华¹, 陈聪¹, 田海峰¹, 赵丽萍²

1. 河南大学环境与规划学院, 河南 开封 475000; 2. 广东商学院, 广东 广州 510320

摘要: 全球气候变化对全球生态系统的结构、功能和过程产生了重要影响, 成为各国政府、社会公众以及科学界共同关心的焦点问题。陆地生态系统碳循环又是当前气候变化和区域可持续发展研究的核心内容之一, 影响到经济和社会发展的各个方面。因此, 开展陆地生态系统碳储量和碳通量的研究仍将是气候变化研究中的重点内容。总结了近年来国内森林、土壤、草地、农田四种陆地生态系统在碳储量、碳通量方面取得的研究成果和不足: 随着遥感、GIS 及模型的发展和应用, 森林、草地生态系统碳储量的研究精度和范围要高于农田和土壤, 而农田和土壤生态系统碳储量的研究多基于典型性样地和大量实验数据, 结果受制于样点布设和采样密度; 目前, 土壤生态系统碳储量结果多基于上世纪 80 年代全国二次土壤普查数据计算所得, 且总有机碳库的估算存在较大差异, 土壤有机碳的组分研究中易氧化有机碳库研究滞后于总有机碳, 迫切需要对我国现有土壤有机碳进行研究; 农田生态系统受人类活动干扰强烈, 从一个或几个站点到全国尺度都有对农田土壤有机碳贮量的研究成果, 与国外相比, 我国试验田的设置时间短, 资料积累较少, 更多侧重不同施肥方式下农作物产量和农田合理的施肥培肥模式研究, 农田土壤有机碳含量关系我国农业生产和粮食安全, 对农田土壤固碳机理的研究仍将是今后关注的焦点。各生态系统碳通量的监测取得了一定成果, 近年来涡度相关系统在森林、土壤、草地、农田生态系统中得到了广泛的应用。并从气候、人类活动两个因素分析了其对生态系统碳储量、碳通量的影响。针对目前存在的问题, 进一步指出了目前国内不同生态系统中碳循环在现状研究、有机碳变化机制、模型建立及气候变化和人类活动影响下的碳库时空格局方面得到加强。

关键词: 气候变化; 陆地生态系统; 碳储量; 碳通量; 研究进展

中图分类号: X171

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2013) 05-0873-06

引用格式: 李国栋, 张俊华, 陈聪, 田海峰, 赵丽萍. 气候变化背景下中国陆地生态系统碳储量及碳通量研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 873-878.

LI Guodong, ZHANG Junhua, CHEN Cong, TIAN Haifeng, ZHAO Liping. Research progress on carbon storage and flux in different terrestrial ecosystem in China under global climate change [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(5): 873-878.

全球气候变化问题已成为各国政府、社会公众以及科学界共同关心的重大问题。它对全球生态系统的结构、功能和过程产生了重要影响^[1], 同时对世界各国的社会、经济、政治外交等产生了重大影响。IPCC 第 4 次评估报告显示^[2]: 20 世纪全球气温平均上升 0.6 °C; 北半球中、高纬度地区降水量增加 5% ~ 10%, 热带、亚热带地区降水量却减少 3%; 全球极端气候事件的频率和强度不断增加。IPCC 预测: 如果不控制温室气体的排放, 到 21 世纪末, 全球平均气温在 1999 年的基线上将再上升 1.1 ~ 6.4 °C。虽然有各种争论, 但越来越多的科学事实证明近百年的气候变暖是显著的, 气候代用资料表明, 20 世纪的变暖在全球和中国都可能是近千年中最显著的^[3-5], 其增暖趋势和增温程度可能高于中世

纪温暖期的水平(950—1300 AD)^[6-7]。中国近 100 年来年平均气温明显增加, 达到 0.5 ~ 0.8 °C, 比同期全球增温平均值略高^[8-9]。综合各种气候预测模式, 未来 100 年全球气温将升高 1.4 ~ 5.8 °C, 全球特别是北半球中高纬度地区的降水量将增加^[10-11]。Rezza^[12]指出气候的任何变化都会影响到自然生态系统、社会经济。

全球气候变化作为全球变化的核心问题, 目前已成为国际环境领域的一个热点和焦点。而生态系统碳循环又是当前气候变化和区域可持续发展研究的核心内容之一, 影响到经济和社会发展的各个方面。研究地球系统的碳循环过程和控制机理, 评价陆地生态系统对温室气体的吸收或排放能力^[13], 分析地—气间 CO₂ 的运移规律及源和汇的研

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41101088); 河南省教育厅科学技术研究重点项目 (12A170002); 广东高校优秀青年创新人才培养项目 (LYM10080); 河南大学自然科学基金项目 (2011YBZR034)

作者简介: 李国栋 (1978 年生), 男, 副教授, 博士, 主要从事气候变化等方面的研究工作。E-mail: liguodonghd@163.com

收稿日期: 2013-01-17

究评价^[14-15], 预测未来的气候变化趋势和评价生态系统碳循环对全球变化的响应与适应特征, 是现代地球系统科学、生态与环境科学关注的重大科学问题^[16-18]。寻求生态系统的固碳机制, 减少大气中 CO₂ 气体的含量, 不仅可以对当前碳汇和碳源研究提供理论基础, 而且可以提高我国在该领域的研究水平, 为认识和参与全球气候变化国际谈判、改善我国的生态环境、促进经济的快速发展提供依据。文章总结了我国不同陆地生态系统在碳储量及碳通量方面的成果, 以期为进一步的研究工作奠定基础。

1 不同陆地生态系统碳储量和碳通量的研究

1.1 森林生态系统

森林生态系统是陆地生态系统的主体, Dixon 等^[19]研究表明, 热带森林碳储量占世界森林碳库的 40%~52%; Houghton^[20]研究表明, 森林破坏已成为继化石燃料燃烧之后, 大气中 CO₂ 浓度增加的第二大来源, 在全球碳循环和碳平衡中起着巨大的作用。但目前各国学者对森林地区的碳源、汇作用的研究结果还不一致。20 世纪 80 年代到 90 年代中期完成了中国不同森林生态系统生物量和生产力的研究^[21], 包括杉木林、马尾松林、长白山温带森林、兴安落叶松、青冈林、西南硬叶常绿阔叶林、热带山地雨林、常绿阔叶林等生态系统。并对森林植物不同部分的碳含量、不同植被类型生物量及季节的变化进行了研究^[22]。近年, 随着遥感、GIS 等技术的应用, 我国森林生态系统中碳储量和碳通量的研究取得了很大进展。如王绍强等^[23]研究了东北地区植被碳库储量 (2.81 Gt) 及其空间分布特征。方精云等^[24]利用 1984—1988 年我国第三次森林资源清查资料和全国各地生物生产力研究资料, 估算了我国森林生物量在 49~324 t·hm⁻² 之间, 其中热带最高, 为 324 t·hm⁻², 温带落叶阔叶林和针阔混交林在 90 t·hm⁻² 左右, 亚寒带或亚高山针叶林在 135~140 t·hm⁻² 左右, 并计算了各类森林总生物量和总生产力及在各省的分布, 并指出我国森林碳储量空间上呈西南最大, 东北次之, 东南、北部、西北区为低碳库区^[25]。利用遥感数据、森林资源调查数据、样地实测、模型估算等方法, 对区域森林生态系统碳密度、碳储量的分布和动态开展了大量工作^[26-31]。中国东部的热带、亚热带森林生物量随纬度有下降的趋势, 但随纬度变化, 森林生物量表现出非线性的规律^[32]。顾峰雪等^[33]利用模型分析亚热带丘陵区人工林自造林后碳储量和通量的变化特征。在碳通量监测中, 齐玉春等^[34]研究了暗针叶林从采伐迹地、演替林到峨眉冷杉原始林 CH₄ 通量日变化和季节变化规律。杨金艳等^[35]利用便携式 CO₂/H₂O 分析

仪测定了土壤表层 CO₂ 通量及其组分。近年, 涡动相关系统观测在监测森林生态系统碳通量的变化规律方面得到了应用^[36], 国内已对我国北半球高纬度森林生态系统碳通量开展较多研究, 已从单个站点的碳通量监测扩展到不同森林生态系统间的碳通量的比较及其变化机理方面^[37]。王宇等利用涡度相关系统及气象数据, 比较了东北地区阔叶红松林和兴安落叶松林碳通量及环境控制因子。

综上所述, 有关森林生态系统碳循环的研究从最初的基于生态学基础上的调查, 逐步向遥感、GIS 和模型应用方面发展, 研究的范围、精度得到了极大的提高, 样点的选取具有典型性和代表性, 研究方法多样化。今后应重点解决碳库间的流量、变化机理及不同生态系统影响因子的比较等方面。

1.2 土壤生态系统

土壤碳库研究相对较晚, 对土壤总有机碳库的估算差异性大。王绍强等^[38-39]、潘根兴等^[40]利用历史土壤资料, 估算了我国土壤碳储量。李克让等^[41]应用模型估算中国土壤的碳贮量为 82.65 Gt, 占全球土壤碳贮量的 3%~4%。在区域范围内, 热带、亚热带地区不同植被类型下 1m 深的土壤有机碳储量为 (28.7±8.2) Pg^[42], 东北地区土壤碳库储量为 26.426 Gt^[23]。易志刚等^[43]研究了鼎湖山主要植被类型土壤微生物量碳与土壤呼吸的关系。青藏高原草地土壤有机碳总量达 335.1973×10⁸ t C, 约占全国土壤有机碳量的 23.44%, 高原草地土壤呼吸年排放 CO₂ 为 11.78×10⁸ t·a⁻¹ (以 C 计), 其中土壤排放量呈高山草甸>高山草原>沼泽土壤>山地草甸>风沙土、高寒漠土。近 30 年青海地区、西藏地区草地转变为耕地和草地, 退化引起的土壤碳排放量为 30.23×10⁸ t·a⁻¹^[44]。开路式土壤通量测量系统因不受自然条件、天气状况等影响, 且具有精确、快速、简单的特点已成为土壤碳通量研究的首选仪器^[45]。

总的来说, 早期对土壤有机碳库的研究多基于历史调查数据所得, 而对现状的研究不多见。很多研究认为土壤活性有机碳库对温室气体的排放贡献大, 且对气候变化响应敏感。开展土壤活性有机碳的研究, 对农业的持续发展、短期内土壤活性有机碳对气候变化的响应、土壤质量特征等方面有重要的意义。近年, 这方面的研究成为研究的焦点, 主要是易矿化、易分解、水溶性强、周转时间短、对植物和微生物活性高的部分, 即活性有机碳。目前, 对土壤活性有机碳也有大量的研究, 但对土壤活性碳库的研究很少见。张俊华等对干旱区绿洲土壤中活性有机碳、非活性有机碳的含量、储量、空间分布及其变化机制进行了较系统的研究^[46-49]。

土壤有机碳的固碳潜力成为研究的热点, 但成

果多利用历史调查数据得出,研究处于初步的探索阶段。韩冰等^[50]、邓祥征等^[51]在该领域开展了工作;模型模拟在固碳潜力方面也逐步得到应用,并取得了一些成果。

1.3 草地生态系统

早期对草地生态系统生物量的研究侧重于地上和地下部分,地下部分植物碳库的研究远弱于地上部分,而对地下生物量的研究多侧重季节变化、垂直分布规律等^[52]。随着人口增多,放牧对草地生物量的影响成为焦点问题。2001年, Ni 估算了中国18个草地类型碳密度和碳蓄积(44.09 Pg C)。朴世龙等^[53]利用我国草地资源清查资料,并结合同期遥感影像,建立了基于遥感数据的我国草地植被生物量估测模型,估算了我国各省(除台湾)每一种草地类型地上、地下和总生物量,其中内蒙古自治区草地植被地上生物量最大。单位面积上的生物量水平分布与水热条件趋势一致,呈东南地区高,西北地区低。垂直分布与三级阶梯关系密切,海拔1350 m和3750 m出现了波谷和波峰。在区域尺度上,对内蒙古白音锡勒、青海海北、甘肃天祝、川东、四川阿坝州等草地类型的地上、地下生物量都进行了研究。董云社等^[54]研究了内蒙古锡林郭勒草原生态系统定位站典型草地CO₂、CH₄的通量及日变化特征,得出草原表现出明显的碳汇特征。韩道瑞等^[55]估算了青藏高原高寒草甸有机碳的储量,指出高寒草甸碳增储潜力巨大,但在空间上存在明显差异。元伟伟等^[56]的研究表明短期增温导致系统净碳固定增加,且直接影响碳通量。李琪等^[57]总结了不同时间尺度上中国草地生态系统碳通量的变化特征及其控制机理。

我国草地生态系统碳储量和碳通量的研究还很薄弱,需要加强的领域还很多。比如,放牧的强度与有机碳的储量和转化的关系。很多研究结果表明:适当的放牧可增加草地生态系统碳库储量,成为碳汇;过渡放牧和重牧会导致有机碳流失,变为碳源。但就其中的变化机制和影响因素来说,目前还存在很大分歧。

1.4 农田生态系统

农业生态系统因受人类活动的影响,有机碳库转化较活跃。在气候变化背景下,农田系统有机碳研究备受关注。我国农田生态系统碳循环的研究尤为薄弱,试验田的设置时间短,且多集中在我国东北、华北、华中、西南、华东、华南等地的旱地,稻田农业生态系统CO₂、CH₄、N₂O排放过程和机理研究,与国外相比,时间短,资料积累较少。目前,我国主要农作物有机碳在作物体内的分布及成熟期籽实、茎叶、根茬产量的比例关系、饲料—堆

腐过程中有机碳的循环率^[58-59]、有机物料在土壤中的残留率和土壤微生物体碳的循环周转等已有较多的报道。方精云等对不同省区粮食作物的面积、产量、生物量等方面进行了研究。刘允芬等^[60]探讨了青藏高原农田生态系统碳平衡规律及其影响因素。齐永青等^[61]构建了海河流域农田林网碳储量和碳潜力评估方法。罗怀良^[62]利用55年的数据,估算了川中丘陵农田生态系统植被碳储量、碳密度都有一定程度的提高,具有碳汇效应。在模型模拟方面,从一个或几个站点到全国尺度都有对农田土壤有机碳贮量的研究成果,邓祥征等^[63]的结果表明中国1988—2020年间农田土壤有机碳贮量呈现一定幅度的下降趋势。

在碳通量中,利用涡动相关技术,对淮河流域典型农田生态系统碳通量进行监测^[64]。袁再健等^[65]对华北农田碳通量的特征进行了监测和模拟。红壤农田系统,多集中在耕作施肥对土壤养分含量的影响,近年又加强了土壤有机质及其组成,特别是对红壤腐殖质组成的研究。总的来说,目前对农田土壤碳循环的机理研究还不深入,更多是侧重不同施肥方式下农作物产量和农田合理的施肥培肥模式研究。农田土壤有机碳含量关系我国农业生产和粮食安全,仍然是今后关注的热点。

以上不同生态系统碳循环的研究表明,由于观测资料、研究区域、使用的资料不同等诸多因素是造成结果差异性的主要原因。各生态系统碳储量研究较多,但由于技术和资料的限制,碳库间的通量研究要滞后于碳储量。在全球气候变暖和人类活动强度加大的背景下,各生态系统碳储量动态变化及其影响机制方面的研究成果少,难以满足社会发展的需求。

2 碳储量及碳通量的影响因素

气候、人类活动是影响生态系统碳储量、碳通量的主要因素。气候影响表层土壤微生物生长、土壤碳的腐解和矿化、植物生长和有机物的凋落,进而影响到土壤与大气、土壤与地下水之间的碳交换。对1981—1998年中国陆地生态系统净初级生产力的时空变化研究表明,降水是控制全国NPP总量年际变化的主要影响因素,东北、西北、华北地区的NPP年际变化与降水量相关性更显著,华南、长江中下游地区、华中地区NPP与降水量的相关性不显著^[66]。内蒙古自治区土壤有机碳与温度呈负相关,与年降水量呈正相关,从自治区东北到西南地区,随着温度递升和降水量递减呈降低趋势^[67]。董云社等^[68]的研究结果显示:内蒙古草地土壤呼吸沿降水梯度递减,生长季呼吸通量日变化与0~10 cm和10~20 cm土壤含水量呈正相关,与气温和各土

层温度相关性弱,而在植物非生长季,CO₂排放通量更多受气温和土壤表层低温限制。青藏高原区域净初级生产力空间分布趋势与水热梯度表现基本一致^[27]。衡涛等研究表明:降水量对草甸土壤有机碳含量影响不大,增温使高寒草甸表层土壤有机碳含量减少^[69]。因区域降水量差异显著,热带草原(包括干旱和湿润草原)、温带草原生产力年变化显著,且草地生态系统中碳素输入量的分布格局、动态变化与降水量的变异大体一致。高志强等^[70]等研究了我国农牧过渡区近20a气候变化对陆地生态系统碳通量和贮量变化。因生态系统的响应过程、变化机理不同,尚未搞清气候变化与不同生态系统间的关系。短期的气候变化与生态系统间关系的研究是千年尺度上生态系统碳循环研究和建立模型的基础,因此,开展区域上代表性样点气候变化与碳储量、碳通量的关系研究意义重大。目前,虽然在全球范围内开展了开放式CO₂浓度富集试验系统,但对我国来说,实验系统比较少,监测时间短,不能覆盖更广的区域。

土地利用和燃料燃烧是人类活动对大气碳含量的主要影响因素。燃料燃烧对大气的影 响相对比较稳定;土地利用变化过程复杂,伴随着生态系统之间碳的流动及时间、空间分布,使碳在空间上重新分配,在碳循环研究上存在着很大的不确定性。大量的研究表明:在人类活动的作用下,土地利用类型发生改变后,对土壤碳有显著影响。目前,从研究的成果来看,由森林、草地转化为农田的过程是一个土壤碳库碳储量减少的过程,土地利用强度越大,土壤碳库储量减少的速率越小。农田向森林和草地生态系统的转化有利于增加土壤中有 机碳的储量。也有研究结果表明:西北内陆干旱区,随着绿洲农业的发展,是土壤有机碳含量增加的过程。大量研究了在人类活动的作用下,土地利用类型发生改变后,对土壤碳的影响^[71-72]。王绍强等^[73]以黄河三角洲河口为例,研究了土地覆被变化对陆地碳循环的影响。刘纪远等^[74]指出1990—2000年,因林地、草地、耕地间的土地利用变化导致中国土壤碳的蓄积量在空间上发生了变化,其中,东北地区土壤碳蓄积量变化较大,华东地区变化较小。牧区土地利用方式改变后,典型草原、农垦和放牧地0~100 cm不同层次土壤有机碳含量变化明显,28年农业利用后使土壤0~100 cm土体中土壤有机碳含量相对于未开垦的草原减少了14.8%,0~10 cm减少速率大^[75]。高志强等^[76]研究了我国农牧过渡区近20年土地利用变化对陆地生态系统生产力和碳循环的影响:土地利用类型发生了改变,导致NPP和植被碳增加的区域集中在东北及内蒙古草地及

荒地,减少的区域分布在东北及黄土高原耕地及林地。在红壤丘陵区,模拟了土地利用方式变更后,土壤有机碳的动态变化^[77]。贡嘎山原始冷杉林与人类活动中度干扰、强烈干扰的演替林土壤层养分含量相比,原始林各层有机质含量处于较高水平^[78]。

3 展望

在全球气候变化的大背景下,国内近年来在森林、土壤、草地、农田四种陆地生态系统的碳储量、碳通量研究方面已经取得很多有意义的成果,但目前的研究还存在一些问题:

(1)从研究区域来讲,我国在碳循环方面的研究重点主要在我国人口集中分布区内的森林、草地、湿地、农田、土壤生态系统,而对我国西北内陆干旱区不同生态系统碳循环的研究相对薄弱。

(2)从中国陆地生态系统通量观测研究网络的监测点的分布看,西北地区的CO₂通量观测点也相对少,难以满足研究工作的需要。大规模的FACE实验场地在国内缺乏,在大气CO₂浓度升高的背景下,不同生态系统的响应和适应机制等方面的研究缺乏区域特色。

(3)我国不同类型生态系统碳储量的估算多用历史调查数据,对现状碳库储量的研究滞后。对碳循环研究而言,现状碳储量、碳通量及其影响因子的研究是摸清长期生态系统有机碳动态变化和建立模型的基础,故而该项工作是今后应加强的方面。

(4)我国农田生态系统碳循环的研究多集中在稻田生态系统,干旱、半干旱地区的农田生态系统的研究相对缺乏,对这一问题的深入研究也是查明人类活动与碳循环关系的基础、建立不同类型生态系统类型数据库的基础。有机碳及其组成与影响因素之间的深入研究,有助于揭示内在变化机制,也是今后工作的重点。

(5)从现有的研究看,涉及气候变化和人类活动引起碳库时空变化的研究较少,是今后需要加强和突破的领域。

中国的碳循环是全球碳循环研究中的重要组成部分,即影响到全球碳循环,也受到全球碳循环的影响。因此,我国碳循环研究应该突破目前的研究尺度和研究区域,加强与周边国家合作,重点解决我国不同区域生态系统碳循环与全球碳循环的关系,提高研究水平。开展森林、草地、农田、土壤等生态系统在全国和区域范围内的调查,并引入多学科的理论、方法来提高研究精度,对深入了解生态系统碳储量、碳的空间分布和动态变化、碳与环境因子的关系及其与全球气候变化、人类活动的关系等方面显得尤为迫切。开展不同生态系统碳过

程机制机理研究的同时, 探讨增加我国不同生态系统和不同区域碳蓄积能力的途径和方法以抵消我国经济建设中温室气体的排放, 提高国际社会应对气候变化问题的能力, 是当今我们经济发展中面临的首要解决的问题。

参考文献:

- [1] 闫海明, 战金艳, 张韬. 生态系统恢复力研究进展综述[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3):303-314.
- [2] IPCC. Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.
- [3] FRED S S, DENNIS T A. Unstoppable Global Warming[M]. Rowman & Littlefield Publishers, Inc., 2007.
- [4] BROHAN P, KENNEDY J J, HARRIS I, et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850 [J]. *J. Geophysical Research*, 2006, 111: 12106.
- [5] 郑景云, 葛全胜, 方修琦. 从中国过去 2000 年温度变化看 20 世纪增暖[J]. 地理学报, 2002, 57(6):4-11.
- [6] 王绍武, 闻新宇, 罗勇. 近千年中国温度序列的建立[J]. 科学通报, 2007, 52(8):958-964.
- [7] 侯光良, 方修琦. 中国全新世气温变化特征[J]. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1075-1080.
- [8] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1):3-8.
- [9] 范泽孟, 岳天祥, 陈传法等. 中国气温与降水的时空变化趋势分析[J]. 地理信息科学, 2011, 13(4):526-533.
- [10] ROOT T, PRICE J T, HALL K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants[J]. *Nature*, 2003, 421:57-60.
- [11] THOMAS C D, CAMERON A, GREEN R E, et al. Extinction risk from climate change[J]. *Nature*, 2004, 427:145-8.
- [12] REZZA G. Re-emergence of Chikungunya and other scourges: the role of globalization and climate change[J]. *Ann Ist Super Sanita*, 2008, 44(4): 315-318.
- [13] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 等. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34:15-29.
- [14] BLACK T A, HARTOG G D, Neumann H H, et al. Annual cycles of water vapour and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest[J]. *Global Change Biology*, 1996, 2:219-229.
- [15] SCHULZE E D, WIRTH C, HEIMANN M. Managing forests after Kyoto [J]. *Science*, 2000, 289:2058-2059.
- [16] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2001.
- [17] GOULDEN M L, MUNGER J W, FAN S M, et al. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to interannual climate variability[J]. *Science*, 1996, 271:1576-1578.
- [18] SCHIMMEL D S, HOUSE J I, HIBBARD K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems[J]. *Nature*, 2001, 414:169-172.
- [19] DIXON R K, BROW N S, HOUGHTON R A. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 262:185-190.
- [20] HOUGHTON R A. Land-use change and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995, 1: 275-287.
- [21] 冯宗炜. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京: 科学出版社, 1999:8-11.
- [22] 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, 21:416-423.
- [23] 王绍强, 周成虎. 东北地区陆地碳循环平衡模拟分析[J]. 地理学报, 2001, 56 (4): 390-400.
- [24] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16 (5): 497-508.
- [25] FANG J Y, CHEN A P, PENG CH, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292 (5525): 2320-2322.
- [26] 朴世龙, 方精云. 1982—1999 年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化[J]. 自然资源学报, 2002, 17 (3): 373-380.
- [27] 周才平, 欧阳华, 王勤学, 等. 青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算[J]. 地理学报, 2004, 59 (1): 74-79.
- [28] 程根伟, 罗辑. 贡嘎山亚高山林地碳的积累与耗散特征[J]. 地理学报, 2003, 58 (2): 179-185.
- [29] 王新闯, 齐光, 于大炮, 等. 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布[J]. 应用生态学报, 2011, 22 (8): 2013-2020.
- [30] 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 基于 FORCCHN 的未来东北森林生态系统碳储量模拟[J]. 地理科学, 2009, 29 (5): 690-696.
- [31] 王鹏程, 邢乐杰, 肖文发, 等. 三峡库区森林生态系统有机碳密度及碳储量[J]. 生态学报, 2009, 29(1):97-107.
- [32] ZHU B, WANG X P, FANG J Y, et al. Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China[J]. *Journal plant research*, 2010, 123:439-452.
- [33] 顾峰雪, 陶波, 温学发, 等. 基于 CEVSA2 模型的亚热带人工针叶林长期碳通量及碳储量模拟[J]. 生态学报, 2010, 30 (23): 6598-6605.
- [34] 齐玉春, 董云社, 章申, 等. 贡嘎山山地暗针叶林带森林土壤温室气体 N₂O 和 CH₄ 排放研究[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 3(11): 934-941.
- [35] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量[J]. 生态学报, 2005, 25 (11): 2875-2882.
- [36] 张弥, 温学发, 于贵瑞, 等. 二氧化碳储存通量对森林生态系统碳收支的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21 (5): 1201-1209.
- [37] 王宇, 周广胜, 贾丙瑞, 等. 中国东北地区阔叶红松林与兴安落叶松林的碳通量特征及其影响因子比较[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4376-4388.
- [38] 王绍强, 周陈虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. 地理研究, 1999, 18 (4): 349-356.
- [39] 王绍强, 周陈虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55 (5): 533-544.
- [40] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题[J]. 地球科学进展, 2003, 18 (4): 609-618.
- [41] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33 (1): 72-80.
- [42] LI Z, ZHAO Q. Organic carbon content and distribution in soils under different land uses in tropical and subtropical China[J]. *Plant and Soil*, 2003, 231: 175-185.
- [43] 易志刚, 蚊伟民, 周国逸, 等. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究[J]. 生态学报, 2003, 23 (8): 1673-1678.
- [44] NI J. Carbon storage in terrestrial ecosystem of China: Estimate at different spatial resolutions and response to climatic change[J]. *Climate Change*, 2001, 49(3): 339-358.
- [45] 耿绍波, 饶良懿, 鲁绍伟, 等. 国内应用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统测量土壤呼吸研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报, 2010, 31 (3): 309-316.
- [46] 张俊华, 李国栋, 南忠仁, 等. 黑河绿洲区耕作影响下的土壤粒径分布及其与有机碳的关系[J]. 地理研究, 2012, 31 (4): 608-618.
- [47] 张俊华, 李国栋, 南忠仁, 等. 耕作历史和种植制度对绿洲农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2): 196-203.
- [48] 张俊华, 李国栋, 南忠仁, 等. 黑河中游不同土地利用类型下土壤碳储量及其空间变化[J]. 地理科学, 2011, 31 (8): 982-988.
- [49] 张俊华, 李国栋, 南忠仁, 等. 黑河中游不同土地利用类型下土壤有机碳时空分布[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45 (4): 66-72.
- [50] 韩冰, 王效科. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2):612-619.
- [51] 邓祥征, 姜群霞, 林英志, 等. 中国农田土壤有机碳贮量变化研究[J]. 地理研究, 2010, 29(1):93-100.

- [52] 齐玉春,董云社,耿元波,等.我国草地生态系统碳循环研究进展[J].地理科学进展,2003,22(4):342-352.
- [53] 朴世龙,方精云,贺金生,等.中国草地植被生物量及其空间分布格局[J].植物生态学报,2004,28(4):491-498.
- [54] 董云社,章中,齐玉春,等.内蒙古典型草地 CO₂, N₂O, CH₄ 通量的同时观测及其日变化[J].科学通报,2000,45(3):318-322.
- [55] 韩道瑞,曹广民,郭小伟,等.青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力[J].生态学报,2011,31(24):7408-7417.
- [56] 元伟伟,牛海山,汪诗平,等.增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究[J].生态学报,2012,32(6):1713-1722.
- [57] 李琪,王云龙,胡正华,等.基于涡度相关法的中国草地生态系统碳通量研究进展[J].草业科学,2010,27(12):38-44.
- [58] 殷秀岩,张璐,宇万太,等.农业系统中磷肥残效及磷循环研究 III. 投料中磷和氮在饲养-堆腐环中的循环率及有机肥料中养分的利用率[J].应用生态学报,1992,3(3):236-239.
- [59] 沈善敏.中国土壤肥力[M].北京:中国农业出版社,1998:57-110.
- [60] 刘允芬,欧阳华,张宪洲,等.青藏高原农田生态系统碳平衡[J].土壤学报,2002,39(5):636-642.
- [61] 齐永青,刘荣慧,沈彦俊,等.海河流域农田林网碳储量及其潜力评估[J].中国农学通报,2011,27(28):69-73.
- [62] 罗怀良.川中丘陵区近55年来农田生态系统植被碳储量动态研究:以四川省盐亭县为例[J].自然资源学报,2009,24(2):251-258.
- [63] 邓祥征,姜群鸥,林英志,等.中国农田土壤有机碳储量变化预测[J].地理研究,2010,29(1):93-101.
- [64] 李琪,胡正华,薛红喜,等.淮河流域典型农田生态系统碳通量变化特征[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2545-2550.
- [65] 袁再健,沈彦俊,褚英敏,等.华北平原冬小麦生长期典型农田热、碳通量特征与过程模拟[J].环境科学,2010,31(1):41-48.
- [66] 陶波,李克让,邵雪梅,等.中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J].地理学报,2003,58(3):372-380.
- [67] 陈庆美,王绍强,于贵瑞.内蒙古自治区土壤有机碳、氮蓄积量的空间特征[J].应用生态学报,2003,14(5):699-704.
- [68] 董云社,齐玉春,刘纪远,等.不同降水强度4种草地群落土壤呼吸通量变化特征[J].科学通报,2005,50(5):473-480.
- [69] 衡涛,吴建国,谢世友,等.高寒草甸土壤碳和氮及微生物生物量碳和氮对温度与降水量变化的响应[J].中国农学通报,2011,27(3):425-430.
- [70] 高志强,刘纪远,曹明奎,等.土地利用和土壤变化对农牧过渡区生态系统生产力和碳循环的影响[J].中国科学 D 辑:地球科学,2004,34(10):946-957.
- [71] 吴建国,张小全,徐德应.土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响[J].应用生态学报,2004,15(4):593-599.
- [72] 盛学斌,刘云霞,孙建中.近50年冀北高原土地利用变化的土壤生境效应[J].应用生态学报,2004,15(4):589-592.
- [73] 王绍强,许珺,周成虎.土地覆被变化对陆地碳循环的影响[J].遥感学报,2001,5(2):142-148.
- [74] 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[J].地理学报,2004,59(4):483-496.
- [75] 李明峰,董云社,齐玉春,等.温带草原土地利用变化对土壤碳氮含量的影响[J].中国草地,2005,27(1):1-6.
- [76] 高志强,刘纪远,曹明奎,等.土地利用和气候变化对区域净初级生产力的影响[J].地理学报,2004,59(4):581-591.
- [77] 李忠佩,王效举.红壤丘陵区土地利用方式变更后土壤有机碳动态变化的模拟[J].应用生态学报,1998,9(4):365-370.
- [78] 齐玉春,罗辑,董云社,等.贡嘎山山地暗针叶林带森林土壤温室气体 N₂O 和 CH₄ 排放研究[J].中国科学 D 辑,2002,32(11):934-941.

Research progress on carbon storage and flux in different terrestrial ecosystem in China under global climate change

LI Guodong¹, ZHANG Junhua¹, CHEN Cong¹, TIAN Haifeng¹, ZHAO Liping²

1. College of Environment and Planning of Henan University, Kaifeng 475000, China;

2. Guangdong University of Business Studies, Guangzhou 510320, China

Abstract: Global climate change has an important impact on global ecosystem structure, function and progress, and become a common focus issues by the governments, public and scientific community. Terrestrial ecosystem carbon cycle is one of the core content in the current climate change and regional sustainable development research, and further impact on aspects of economic and social development. Therefore, research of terrestrial ecosystem carbon stocks and carbon fluxes is the key elements in the climate change. The paper was reviewed the research achievements and shortcomings in forest, grass, soil and farmland ecosystems in recent years at the aspects of carbon storage and flux, China. Along with the development and application of remote sensing, GIS and model, research accuracy of carbon storage in forest and grassland ecosystems are higher than farmland and soil. Carbon storage in soil ecosystem are calculated based on the national soil survey data in 1980s, there is a big difference, and easily oxidized organic carbon lags behind the TOC, soil organic carbon storage at present are needed to research. Farmland ecosystems are strongly disturbed by human activities, soil organic carbon storage in farmland have some research findings in one or several sites and countries scales, and experimental fields are founded in a short time and data accumulation is less mainly focused on crop yields under different fertilization, carbon sequestration mechanism will be the research focus in the future. The monitoring of carbon fluxes have achieved some results, eddy covariance flux in the forest, soil, grassland and farmland ecosystem has been widely used in the resent years. Relationship between climate change, human activity and ecosystems carbon cycle was analyzed. Finally, the further working direction and field are been point out in the carbon cycle research.

Key words: climate change; terrestrial ecosystem; carbon storage; carbon flux; research progress