

土地利用方式和经营管理对土壤有机碳库及其组分影响的研究进展

王 峰^{1,2}, 翁伯琦², 王义祥²

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002;

2. 福建省农业科学院农业生态研究所, 福建 福州 350013)

摘要: 综述了土壤有机碳分组方面的研究结果, 主要讨论了在不同利用类型和不同经营方式条件下, 土壤有机碳及其不同组分分解、蓄积、含量、存量、分配比例等的动态变化, 为制定合理的经营管理措施以减少温室气体的排放提供理论参考。

关键词: 土地利用变更; 经营管理; 土壤有机碳; 组分

中图分类号: S 153

文献标识码: A

Advance in research on effects of land use and management on soil carbon stock and fractions

WANG Feng^{1,2}, WENG Boqi², WANG Yixiang²

(1. College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forest University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Agricultural Ecology Institute, Fujian Academy of Agriculture Sciences, Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract: This paper reviews the research results on the fractionation of soil organic carbon. A focus was placed on the dynamics of the decomposition, accumulation, content, storage and allocation proportion of soil organic carbon and its fractions under different land uses and management. The information should aid in formulating appropriate measures to reduce greenhouse gas emission.

Key words: Land use; management; soil organic carbon; fraction

在陆地生态系统中, 土壤是连接大气圈、水圈、生物圈以及岩石圈的纽带, 也是最大的碳库。据估算, 全球约有 1 500 Pg 的碳以有机碳的形式储存在土壤中, 大大超过了植物碳库和大气碳库之和^[1]。由于土壤有机碳贮量巨大且周转速度快 (土壤无机碳的更新周期 8 500 多年以上^[2]), 其较小幅度的变化就足以影响大气中碳的含量, 进而影响陆地植被的养分供应, 对陆地生态系统的分布、组成、结构和功能产生深刻影响, 相反以气候变暖为标志的全球变化必将影响到土壤有机碳的滞留与周转, 而这些变化又将对气候变暖产生反馈作用, 加速或减缓全球气温上升的速率^[3]。因此, 全面了解土壤有机碳的组分、性质和迁移规律, 不仅有助于正确评估土壤有机碳的变化方向和速率以及全球碳循环, 而且对准确预测气候变化以及制定应对气候变化的策略和措施具有重要意义。我国几千年的农耕文明使土地利用发生了很大的变化, 近年来又开

展了大规模的退耕还林还草^[4], 这些无疑会对土壤有机碳含量和组分产生重大的影响。本文将根据已有的研究文献, 探讨与分析土地利用方式的改变和不同经营管理措施下土壤有机碳储量和组分变化, 为制定合理的经营管理措施以减少温室气体的排放提供理论参考。

1 土壤有机碳分组

目前有关土壤有机碳尚无统一的分组, 这也是限制本研究领域发展的一个因素。基本上来说根据研究者的需要有不同的分组方法, Parton 等^[5] 依据周转速率的快慢把土壤有机碳分成活跃库 (active pool, 周转期在 0.1~4.5 a)、慢变库 (slow pool, 周转期在 5~50 a) 和惰性库 (passive pool, 周转期在 50~3000 a)。Six 等^[6] 根据土壤有机碳在土壤结构中分布和功能, 将其分为游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳、矿物结合态有机碳和可

收稿日期: 2008-10-02 初稿; 2009-01-29 修改稿

作者简介: 王峰 (1985-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向: 植物营养与环境生态 (E-mail: 824581@163.com)

通讯作者: 翁伯琦 (1957-), 男, 研究员 (E-mail: boqweng@yahoo.com.cn)

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目课题 (2007BAD89B13); 福建省农业科学院科技创新团队建设基金 (STIF-Y01)

溶性有机碳。Christensen 等^[7]认为土壤有机碳由保护性库与非保护性库等异质有机多组分矿质复合体组成。Golchin 等^[8]根据有机碳在土壤基质中的位置及其对微生物的影响, 把土壤有机碳分成游离的颗粒有机碳和团聚体内的颗粒有机碳两部分。徐明岗等^[9]指出, 根据测定方法和所指有机碳的组分不同, 土壤活性有机碳可分为水溶性有机碳、微生物量碳、易氧化活性有机碳和轻组有机碳。辛刚等^[10]据结合态腐殖质溶解度的不同将土壤中有机碳分为 4 类: 游离态有机碳、松结合态有机碳、稳定结合态有机碳和紧结合态有机碳。吴建国等^[11]从物理密度分组的角度提出, 土壤有机碳可分为轻组有机碳、重组有机碳和颗粒有机碳。近年来, 一些研究者应用土壤有机碳物理分组和同位素 C¹⁴方法研究了土地利用变化对土壤碳库中不同定性组分的影响及土地利用变化过程中土壤碳稳定机制和影响因素^[12-15]。这些研究表明, 土地利用变化主要影响的是土壤有机碳组分中分解相对快的部分, 即轻组有机碳和颗粒有机碳。因此, 揭示土地利用变化影响有机碳机理的关键之一, 就是要准确对土壤有机碳不同的组分进行研究。

2 土地利用变化对土壤有机碳贮量及组分的影响

2.1 利用方式变化对森林土壤有机碳的影响

森林土壤有机碳库是陆地碳库的重要组成部分(约占 56%^[15]), 其变化被认为是导致大气碳库和全球气候变化的主要原因。森林土壤中的有机碳主要来自于林地动植物残体和凋落物, 是进入土壤中的动植物残体量与在微生物作用下有机碳分解损失量平衡的结果。在森林生态系统中, 森林植被根系发达, 土壤动物、微生物的种类和数量丰富, 集中了大约 85% 的陆地生物量, 表现出高的土壤碳储量。森林作为全球陆地生态系统的主体, 其在维持全球碳平衡(森林生态系统碳的积累和释放)中的作用正在被人们所认识。

在土地利用变化过程中, 林地土壤有机碳含量受到不同程度的影响^[16]。一般来说森林土壤利用类型发生变化可引起其土壤有机碳含量的减少, 森林转化为农田, 通常土壤碳损失达 25%~40%, 其中, 耕作层的损失量最大, 一般可达 40%; 森林转为草地和轮作地, 土壤碳分别损失达 20% 和 18%~27%^[17]。杨玉盛等^[18]通过对中亚热带山区天然林、人工林、次生林、果园和坡耕地等 7 种典型土地利用方式的土壤有机碳储量的研究表明: 中

亚热带山区天然林转变为其他土地利用类型后, 土壤有机碳储量下降了 25.6%~51.2%, 而表层 0~20 cm 土壤有机碳储量下降了 45.1%~74.8%, 比底层土壤有机碳对土地利用变化的响应更为敏感; 土壤轻组有机碳储量(0~60 cm)下降了 52.2%~84.2%, 轻组有机碳占总有机碳比例从 13.3% 降到 3.0%~10.7%, 比土壤总有机碳对土地利用变化更为敏感。张履勤等^[19]研究表明, 林地开垦为农地后, 红壤有机碳显著下降, 自然林地土壤有机碳比农地土壤高 219%, 这与陈桂秋等^[20]研究结果相似。胡亚林等^[21]对我国亚热带南、中、北 3 个区带杉木人工林与天然次生阔叶林表层土壤有机碳进行研究, 结果表明, 杉木人工林取代天然次生林阔叶林后表层土壤总有机碳含量下降 31.51%~58.24%, 亚热带常绿阔叶林和杉木林皆伐 106 d 后土壤有机碳含量分别降低了 34.7% 和 24.4%。吴建国等^[11]研究了土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响, 发现天然次生林以及人工林变退化成农田或草地导致轻组有机碳和颗粒有机碳含量均出现不同程度的下降, 天然次生林颗粒有机碳分配比例比人工林和农田低, 牧草地与天然次生林的差异不显著。

另外, 也有研究认为, 森林转变为牧草地后虽可导致地上部分生物量碳减少, 但土壤有机碳则未必一定流失^[22]。墨西哥 Los Tuxtlas 地区森林砍伐非常严重, 尽管森林转变牧为草地或农田导致 1 m 深土层碳库的极大波动, 但并没有造成碳流失, 随土地利用改变时间的增加, 也没有观察到土壤碳流失现象^[23]。而 Conant 等^[24]通过对 115 个相关研究的分析也发现, 林地转化为草场后, 显示出了极大的增汇潜力。森林树木主要为 C3 光合途径植物, 而热带、亚热带和温带地区的草地或农田主要为具有更高的净光合效率 C4 途径的草本植物^[25-26], 只是草地与农田土壤通常面临严重的人为干扰, 这可能才是导致土壤碳流失明显的重要因素。

2.2 利用方式变化对草地土壤有机碳的影响

草地也是陆地生态系统的主体类型, 占陆地生态系统总面积的 16.4%, 其碳贮量约占陆地生态系统碳贮量的 15.2%。据估计, 目前草原生态系统中的碳贮量为 308 Pg, 其中约 92% 的碳贮存在土壤中, 地表生物量碳不到 10%^[27]。人类利用活动如草地开垦、过度放牧等被认为是影响草原土壤碳贮量、有机碳及其各组分含量的主要因素。

草地开垦可导致土壤中有机碳的大量损失。草地开垦促进了农田土壤的呼吸作用, 可加速土壤有

机碳的大量释放；另一方面，多年生牧草被农作物取代后使初级生产固定的碳素向土壤中输送的比例也有所降低，而农作物的收获又减少了地上生物量碳向土壤中的输入。大量的研究表明，草地开垦为农田后可损失掉 30% ~ 50% 的土壤碳素，大量的损失常发生在开垦后的最初几年，20 a 后趋于稳定^[28]。李明峰等^[29]在对农垦后温带草地生态系统温室气体排放的野外观测表明，草甸开垦为农田使 CO₂ 的排放增加了 81%，在春小麦的生长期，麦田的 CO₂ 排放量是草甸草原的 2 倍多，休耕地的 CO₂ 排放量则表现出减少趋势。张文丽等^[30]在研究开垦对克氏针茅草地生态系统碳通量的影响时发现，小麦在生长期整个生态系统群落平均气体净交换量 (NEE) 比草地的高，但因其生长期短，并且到生长结束后，大部分的生物量会被农民收获，因而净存留在该生态系统的碳量减少了。文海燕等^[31]研究表明，沙质草地开垦及其随后的耕作导致了严重的土壤风蚀，致使土壤有机碳的大量丧失，与放牧草地相比，开垦 3 a、5 a、7 a 和 20 a，土壤有机碳含量分别下降了 38.1%、47.9%、50.5% 和 52.7%。李月梅等^[32]研究开垦对海北高寒草甸土壤有机碳的影响时指出，开垦使土壤碳贮量由每年 143 516.94 kg · hm⁻² 下降至 114 298.34 kg · hm⁻²，大大降低高寒草甸作为碳汇的功能，使其逆转为碳源；土壤有机碳及其组分的变化主要发生在 0~10 cm 土层，轻组有机碳 (LFOC) 下降最快，其次为重组有机碳 (HFOC) 和 SOC，至 30 a 时分别下降了 48.63%、43.97%、37.64%。但就总体的情况来说，草地开垦后，往往是重用轻养，导致土壤有机碳储量的普遍下降，限制了农业的可持续发展。考虑种养结合、农作物和牧草轮作，或许能兼顾经济利益和生态利益，不过还需要进一步的研究来证实。

过度放牧是造成草地有机碳流失的另一大主要影响因素。在全世界草地退化总面积中，约有 35% 是由过度放牧造成的^[33]，在我国也占 20% 以上^[34]。在放牧条件下，群落物种组成的改变不仅影响有机碳输入的数量，也影响输入土壤的有机碳的质量，从而影响有机碳在土壤中的蓄积。过度放牧可促进草地土壤的呼吸作用，从而加速碳素由土壤向大气中的释放^[35]。就全世界草地而言，在过度放牧的条件下，地上净初级生产力中仅有 20% ~ 50% 能够以凋落物和粪便的形式归还土壤。李春莉等^[36]研究表明，0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤有机碳含量随着放牧强度的增加而降低，未放牧

区 > 轻度放牧区 > 中度放牧区 > 重度放牧区，中度放牧区和重度放牧区均显著低于未放牧区 ($P < 0.05$)；0~10 cm 土层土壤有机碳含量与草地地上生物量和植被盖度具有极强的相关性。马秀枝等^[37]研究放牧对内蒙古锡林河流域草原土壤碳组分的影响时指出：自由放牧 22 a 后，羊草草原 0~10 cm 表层易分解碳、微生物量碳分别下降了 22.0% 和 27.9%，大针茅草原 0~5 cm 表层土壤微生物量碳下降了 38.2%，羊草草原微生物量碳的季节变化以及季节与土壤深度的交互效应都达到了显著水平 ($P < 0.05$)。傅华等^[38]对荒漠草地连续 6 a 进行的不同强度放牧试验也表明，重牧比中度和轻度放牧草地 0~20 cm 土壤有机碳含量显著减少，霸王-小叶锦鸡儿荒漠草地封育后表层土壤有机碳含量较自由放牧地显著增加，围封 3 a 后表层土壤有机碳含量提高 11.2%，围栏轮牧使土壤有机碳含量明显增加。李明峰等^[39]研究也表明，11 a 围栏轮牧使羊草草原 0~100 cm 土壤有机碳增加 47.4%，30 cm 以下土层增加异常显著；自由放牧使大针茅草原 0~100 cm 土壤有机碳含量减少 2.22%，0~10 cm 土壤有机碳减少速率为 0~100 cm 土体的 1.7 倍，10 cm 以下各土层土壤有机碳含量变化较小，说明自由放牧对土壤表层有机碳含量的影响尤为明显。从以上放牧对草地的碳库影响来看，围栏放牧使土壤有机碳含量有明显的增加，而过度放牧会使草地碳库减少。如果选择适当的放牧强度，再加上人工适度调节，则完全可以维持草地生态系统的碳平衡，促进系统内部碳的良性循环，做到经济效益和生态效益兼顾。

2.3 农田利用方式改变的影响

农田土壤作为一种特殊的土壤类型，受人类活动的影响剧烈。农田土壤碳库不仅是全球碳库的重要组成部分，而且是其中最活跃的部分。人类的耕种活动经常会造成农田土壤有机碳含量的降低，主要原因是耕作和种植作物可导致土壤温度、湿度及空气状况的变化，有机物料输入的减少，以及土壤侵蚀^[40]。

自然土壤开垦为农田后将导致土壤有机碳下降。对科尔沁沙地的研究表明，农林（林草）复合利用模式的土壤质量性状最优，有机无机配施、精细管理的灌溉农田次之，而粗放管理的旱作农田最差^[41]。免耕等保护性耕作有利于增加表层土壤有机碳储量，灌溉、施肥、秸秆还田、稻麦轮作增加了农业土壤中 SOC 的储量，不合理的农业生产实践可能导致土壤侵蚀、盐化、压实、有机碳降低和

非点源污染等^[42]。张心昱等^[43]分析了北京延庆盆地不同农业土地利用方式和管理下土壤有机碳含量,结果发现果园和高投入的玉米地土壤在0~100 cm 土层中 SOC 含量均较高,菜地土壤在0~40 cm 土层中 SOC 含量较高; 大豆地和中、低投入玉米地土壤在0~100 cm 土层中 SOC 含量较低,不同农业土地利用方式对 SOC 密度影响的趋势与对 SOC 含量影响的趋势基本一致。唐国勇等^[44]对洞庭湖区不同利用方式下农田土壤有机碳含量特征分析表明,研究区内土壤有机碳含量高低顺序为双季稻水田($28.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>单季稻水田($27.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>水旱轮作地($24.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>旱地($17.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),其差异均达到极显著水平($P < 0.01$)。迟光宇等^[45]对三江平原不同土地利用方式下土壤有机碳的动态变化的研究表明,土壤有机碳的垂直分布随土壤深度和土地利用类型的变化而变化,与沼泽化草甸相比,开垦10 a 和25 a 的水田表层土壤有机碳含量分别减少49.3% ($P < 0.01$) 和14.3% ($P < 0.05$),开垦5 a 和18 a 的旱地表层土壤总有机碳含量比对照分别减少81.9% ($P < 0.01$) 和68.3% ($P < 0.01$)。

另外,不同的农田耕作制度也会对土壤有机碳含量及组分产生影响。农田轮作(间作)后影响作物残体和根系残留物及根系分泌物在土壤中积累,而它们又影响养分矿化-固定以及作物残体对土壤有机碳的贡献,从而影响土壤活性有机碳含量及组分。张旭辉等^[46]研究不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的结果表明,花生-小麦-山芋轮作及玉米-花生-山芋不同作物轮作5 a 白浆土团聚体粒组分布、有机碳含量及其稳定性同位素组成发生了显著变异,轮作5 a 使0.25~2.00 mm 团聚体增多,有机碳富集。张春霞等^[47]研究发现,小麦-豌豆系统和小麦-红豆草轮作方式连续种植与传统冬小麦-夏季休闲耕作制相比,0~5 cm 土层土壤有机碳在5 a 中增加20%,颗粒有机碳增加1倍,土壤微生物生物量碳含量也有明显的提高。Janzen^[48]发现,在连续种植小麦的轮作方式下,表层土壤轻组有机碳含量明显高于休闲-小麦、休闲-小麦-小麦-饲料-饲料-饲料、休闲-小麦-小麦等轮作方式;不同的轮作方式下,土壤轻组有机碳含量随休闲频率的增加而减少,其顺序:小麦>休闲-小麦-小麦-饲料-饲料-饲料>休闲-小麦-小麦>休闲-小麦。

2.4 湿地利用方式改变的影响

湿地作为一种特殊的自然综合体,以其特殊的性质(地表积水或土壤水饱和、厌氧条件、适应湿生环境的动植物)而有别于其他生态系统。大多数湿地是碳的汇,据估计其中储藏在不同类型湿地中的碳约占地球陆地碳总量15%。可见,湿地在陆地生态系统碳循环中具有重要作用。湿地土壤中碳素的流动一直备受湿地生态学以及土壤学等学科的关注,目前又成为国际全球环境变化问题研究的核心内容之一。

湿地土壤有机碳及组分的储量和分布因湿地类型及湿地生物群落不同而有差异。赵同谦等^[49]对黄河湿地孟津段不同植物群落类型土壤有机碳含量变化特征研究表明,滨河湿地不同植物群落类型、不同土壤层次的有机碳含量差异十分显著,其表层土壤有机碳含量明显高于其深部沉积土壤。彭佩钦等^[50]在洞庭湖3种湿地典型剖面的土壤碳和微生物碳垂直分布研究中发现,不同类型湿地土壤碳和微生物碳均随深度的增加而降低;湖草滩地表层有机碳含量明显高于芦苇滩地和垦殖水田;湖草滩地表层微生物碳与垦殖水田接近,而远大于芦苇湿地。刘子刚等^[51]对三江平原沼泽湿地不同层次土壤中有机碳含量的垂直分布特征的研究结果表明,土壤有机碳主要集中在草根层($200\sim500 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、泥炭层($100\sim200 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和腐殖质层($20\sim70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),而潜育层和白浆层有机碳含量很少,为 $5\sim8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;土壤有机碳含量随深度增加而逐渐减少,湿地开垦后,一般是表层土壤有机碳的下降速度比下层快,这与刘双章等^[52]研究的结果类似。张文菊等^[53]研究了东北三江平原3种典型湿地共16个沉积物剖面有机碳的分布特征,沼泽化草甸、腐殖质沼泽和泥炭沼泽中土壤轻组有机碳部分占有较大比例,溶解有机碳的含量也较高,进一步证实了刘子刚和刘双章等人的结论。

天然沼泽湿地受到人类活动干扰(垦殖、开发)后,土壤水热条件、营养条件土壤结构、凋落物输入等都发生了变化,湿地土壤呼吸加剧,这些改变对湿地土壤有机碳含量产生重大影响。田昆等^[54]对纳帕海湿地受人为干扰条件下土壤碳变化的研究表明,人为干扰下纳帕海湿地土壤空间结构土壤有机碳0~20 cm 表层与20~40 cm 下层相差4倍;人为活动干扰引起湿地土壤泥炭化、潜育化过程减弱或终止,且随着通气性改善,土壤呼吸加强,有机碳分解加快。黄靖宇等^[55]对三江平原天然沼泽湿地及湿地垦殖后的农田、弃耕还湿地、人

工林地等不同土地利用方式表层土壤 (0~10 cm) 活性碳研究的结果表明, 天然小叶章沼泽湿地垦殖为农田后, 表层土壤各活性碳组分显著降低, 微生物量碳减少了 63.8%~80.5%, 溶解有机碳减少了 43.1%~44.3%; 农田弃耕还湿和人工造林后表层土壤的活性碳各组分恢复到天然小叶章湿地土壤水平的 36.1%~59.9% 和 67.0%~69.3%。另外受上游大型水利工程的影响, 滨河湿地不同植物群落类型、不同土壤层次的土壤有机碳含量差异显著, 典型湿地特征的植被群落表层土壤有机碳含量明显高于其他深部沉积土壤, 滨河湿地土壤有机碳含量的显著差异性和受外部条件的显著控制作用, 充分反映了滨河湿地生态系统的脆弱性^[49]。张磊^[56]研究发现, 在湿地短期 (80 d) 耕作后, 土壤水溶性有机碳含量极显著高于未耕作土壤 ($P < 0.01$), 之后, 则低于未耕作土壤。总的来说, 湿地被垦殖破坏后, 土壤有机碳含量逐渐降低, 经过 15~20 a 的耕作后达一个稳定的水平, 但很难恢复到原来的水平。

3 经营措施对土壤有机碳的影响

3.1 耕作因素及其影响

土壤活性有机碳一般占土壤总有机碳的 7%~32%, 其含量随管理措施而有较大的变化, 耕作常常被认为是引起土壤有机碳含量下降的主要原因。由耕作引起的土壤有机碳的损失涉及 3 个过程^[57]: ①由于耕作的机械作用使土壤物理破碎、分散和混合, 土壤团粒结构被破坏, 温度和湿度发生变化引起氧化和矿化过程; ②可溶性有机碳或颗粒有机碳的淋溶和迁移过程; ③加速土壤侵蚀过程, 受侵蚀土壤有机碳含量明显低于未侵蚀土壤。因此, 自然植被下土壤转变为农业土壤时, 碳通常流失到大气中。罗友进等^[58]研究表明, 稻田长期垄作免耕增加了土壤表层 (0~10 cm) 活性有机碳各个组分的含量, 增加了其余土层低活性有机碳含量, 而减少了高活性有机碳含量, 水旱轮作增加了各土层低活性有机碳含量而减少了中活性和高活性有机碳含量。孙国峰等^[59]进行了不同耕作措施对土壤的总有机碳、活性有机碳的变化情况及其对土壤碳库影响的研究, 结果表明: 土壤表层 0~20 cm 平均总有机碳和活性有机碳含量均为旋耕>连续免耕>翻耕, 与连续免耕相比, 旋耕有利于提高土壤活性有机碳含量 (比连续免耕提高了 5.08%), 翻耕则会促进土壤活性有机碳分解 (比连续免耕降低了 2.73%)。蔡立群等^[60]对麦-豆轮作条件下保护性

耕作对土壤团聚体组成及有机碳含量的研究表明, 连续的保护性耕作结合轮作能够提高水稳定性团聚体含量, 特别是粒级较大的水稳定性团聚体含量, 在 0~30 cm 土层中土壤总有机碳含量均有提高, 稻秆覆盖或还田对土壤总有机碳含量的提高效果比较稳定, 这与李琳等^[61]的研究结果一致。另外长期保护性耕作 (免耕、深松) 显著增加了土壤微生物碳含量, 在相对比较干旱的情况下, 免耕土壤微生物更新比常规耕作快。

耕作措施对土壤有机碳在团聚体中的分布也会产生显著的影响。章明奎等^[62]研究了 5 种不同土地利用方式对红壤水稳定性团聚体形成影响的结果表明, >5 mm 水稳定性团聚体含量与农机具使用和人为活动频繁成正比, 受耕作和人为活动影响最大的是 >5 mm 的水稳定性团聚体。于君宝等^[63]研究结果表明, 随着黑土开垦年限的延长, 各粒级有机无机复合体组分中有机碳及其组分均表现出下降的趋势, 黑土有机碳组分中, 受耕作影响最大的是胡敏素, 其次是胡敏酸和富里酸, 耕作改变了土壤有机碳在剖面中的分布格局。总的来说, 我国的耕作制度存在很多不合理的地方, 在改变耕作制度提高农业产量和增加经济效益的同时, 需结合不同的农田生态系统类型自身的特点, 采用恰当的耕作方式, 以达到增加碳汇/减排的目的。

3.2 施肥因素及其影响

施肥主要增加了土壤矿质养分, 改善了土壤的 pH 值和有机物的 C/N 值等性状, 提高了微生物的活性, 促进了植物的生长, 对土壤碳的可矿化量、微生物碳含量及微生物活性具有重要影响。长期定位试验表明, 长期施用有机肥能显著提高土壤活性有机碳的含量; 有机肥配施无机肥, 土壤活性有机碳含量上升较快; 长期施用化学肥料, 能提高难氧化有机碳含量, 增加土壤有机碳的氧化稳定性^[64]。孙天聪等^[65]在研究长期施肥对有机碳在不同粒级土壤团聚体中分布的影响时表明, 长期施肥, 特别是化肥与有机肥配合施用有利于该粒径团聚体的形成, 对耕层土壤 2~5 mm 团聚体含量影响最大; 与不施肥对照相比, 长期施肥处理能使土壤有机碳有较大幅度增加。Shen 等^[66]研究施肥对土壤可氧化碳、微生物量碳和可矿化量碳的影响时发现, 施厩肥、厩肥+氮磷钾肥可以增加土壤可氧化碳、微生物碳和可矿化碳的含量; 单施氮磷钾肥, 只增加微生物量碳和可矿化量碳含量, 而减少可氧化碳含量。史奕等^[67]研究表明, 不同施肥条件下, 0~10 cm 土层不同粒级水稳定性团聚体微粒有机碳含量不

同, 施氮+猪圈肥处理的由大粒级水稳定性团聚体包裹的微粒有机碳含量略高于其他处理。总之, 施肥可以显著提高土壤有机碳(特别是微生物量碳、易氧化碳、颗粒有机碳)含量, 促进轻组有机碳与重组有机碳的转化。

另外, 施用无机肥、粪肥、秸秆和牧草还田等也会影响土壤有机碳的含量。施用有机肥, 可增加土壤活性有机碳组分, 提高土壤微生物对有机碳的利用率; 秸秆(牧草)还田可增加土壤微生物量碳及其周转率, 从而在加速有机碳分解的同时弥补土壤原有碳的损失。刘淑霞等^[68]长期定位试验的研究结果表明, 有机碳及各组分含量为有机肥与化肥配施>秸秆与化肥配施>单施化肥>不施肥; 有机物质与化肥配施能使HA/FA比值和胡敏酸的E₄/E₆比值都有所提高, 显著地增加土壤中活性有机碳的含量; 有机肥与化肥长期配施, 对改善土壤腐殖质的腐殖化程度和提高其活性, 降低土壤有机碳的抗氧化能力, 提高土壤养分供应能力具有良好的作用。杨长明等^[69]研究不同施肥模式对潮土有机碳组分及团聚体稳定性的影响, 结果表明: 与单施化肥处理(NPK)比较, NPK+S(秸秆)和NPK+M(厩肥)处理显著增加土壤耕作层(0~20 cm)的总有机碳含量和微生物生物量碳(MBC)和可矿化碳(MNC); 有机无机肥配施, 明显增加土壤易氧化有机碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)、轻组有机碳(LFOC)和水溶性有机碳(WSOC)以及水团聚体(WSA)含量。宇万太等^[70]研究表明, 化肥均衡施用和施用循环肥均能显著提高土壤微生物量碳含量($P < 0.05$), 化肥均衡施用配合循环肥能显著提高土壤微生物量碳的周转强度, 缩短周转时间($P < 0.05$)。胡诚等^[71]也发现, 在整个培肥试验阶段微生物生物量碳都明显增加, 有机肥对提高土壤微生物生物量碳的作用很明显, 不同秸秆还田方式(全还、双倍麦还和麦还)的微生物量碳的季节变化较大。

3.3 森林砍伐及其影响

森林采伐是人类经营森林资源常用的一种活动方式, 这种活动对土壤有机碳的影响的研究工作已很深入。一般来说森林采伐特别是皆伐后, 林冠消失, 改变了林地原有的平衡状态及其环境条件, 土壤微生物活动的数量和质量受到了限制, 加上森林采伐时的集、运材过程破坏了林地覆盖层的地被物, 表土裸露、疏松, 遇到降雨即可造成表土有机碳的直接流失, 从而加速了土壤有机碳的释放; 但适当强度采伐的林分结构及功能的变化可稳定在生

态系统阈值内, 既能保持系统的平衡, 又能调节林内环境因子, 有利于系统内的元素转化利用。

Johnson等^[72~74]总结了73个研究森林收获的研究结果, 认为在一般情况下森林收获对森林土壤有机碳的影响不大; 一部分研究结果认为是减少的趋势, 但是却发现不同的收获方法对土壤有机碳有不同的影响。Laiho等^[75]在研究粗放经营的针硬阔林采伐后营造集约经营针叶林对土壤有机碳的影响时发现, 全树收获的情况下, 土壤有机碳稍有下降; 如果森林收获前, 每年对林下植被喷洒除草剂, 森林采伐更新后, 土壤有机碳连续下降; 对林下植被喷洒除草剂显著降低硬阔叶林的土壤有机碳储量, 下降的幅度几乎是人工针叶林的2倍; 有机碳的积累在3种采伐方式下(仅收获树干、全树收获和全树收获+地表植被)基本相似; 造林后, 林下植被在不喷洒除草剂的情况下, 有机碳的积累最高。骆土寿等^[76]研究了海南岛霸王岭热带山地雨林不同择伐强度经营试验初期土壤碳储量, 认为采伐会减少土壤储蓄的有机碳, 尤其是强度采伐迹地, 择伐后初期林地土壤有机碳含量都有所降低。王旭等^[77]在研究长白山阔叶红松林皆伐迹地土壤呼吸作用时指出, 林伐后13 a的皆伐迹地在整个生长季节土壤呼吸速率约为林地的75%, 土壤根系量减少是造成阔叶红松林皆伐后土壤呼吸强度减弱的重要原因。方晰等^[78]探讨不同经营方式对杉木林采伐迹地土壤有机碳储量的影响时发现, 4种不同经营方式的采伐迹地土壤层(0~60 cm)中的有机碳储量有明显的差异, 比采伐前已郁闭人工杉木林地有机碳储量减少35.4%, 高于农用后撂荒地和自然更新的采伐迹地。

综上所述, 森林采伐迹地在自然演替和恢复的过程中, 植被、环境和土壤之间相互作用, 共同形成了一个“植被-环境-土壤”系统, 它在不同演替阶段可能表现出不同的特征。森林砍伐在初期可能导致土壤有机碳的大量流失, 土壤呼吸作用的增加, 随着时间的推移, 土壤呼吸作用将减少, 从而可能导致固碳能力的增加。另一方面营造结构简单的人工林有利于保持森林地土壤中的有机碳储量, 若能在造林整地时, 把采伐后剩余的生物质埋入土壤更有利于土壤碳的保持和减少土壤碳的流失。

3.4 火干扰及其影响

随着研究工作的不断深入, 火烧作为森林主要管理措施对土壤有机碳影响亦愈来愈受重视。森林火干扰作为一种突发事件, 剧烈的改变着生态系统的结构与功能, 影响森林演替、森林生物量和生产

力以及生物地球化学循环, 从而使得整个系统失去了原有的平衡状态。Andreae 等^[79] 估算全球每年火灾释放大约 4 Pg 的碳到大气中, 相当于每年人类化石燃料燃烧释放量的 70%^[80]。

大量的研究工作表明火烧可引起森林土壤有机碳组成和输出的变化, 变化程度取决于火烧的频率和强度。森林大火主要使森林土壤有机碳在土壤剖面分布发生变化, 总的土壤有机碳含量没有减少。Kraemer 等^[81] 经过长期观测表明, 燃烧过的林地土壤有机碳 25 a 后没有较大的变化。McKee^[82] 研究了低强度的有控燃烧, 认为燃烧只是使地表 A0 层变薄了, 在 10 a 中土壤上层 (5~10 cm) 中的碳反而增加了, 部分原因是燃烧后的碳和未燃烧尽的有机碳被淋溶到土壤中去了。另一部分研究者认为强火干扰的情况下土壤有机碳含量出现不同程度的下降, 土壤各组分碳素将重新分布。唐季林等^[83] 在四川西南部对云南松林的研究表明, 在中、弱度地表火干扰下, 云南松林地表有机碳平均损失 20% 以下, 而在强度火烧迹地, 5 a 后表层土壤有机碳仍未能恢复; Sands^[84] 观察了澳大利亚辐射松 *Pinus radiata* 林地, 在大火 24 a 后, 发现高强度燃烧导致有机碳减少了 40%~50%; Dyrness 等^[85] 发现, 燃烧后土壤有机碳减少了 5%~80%。Johnson 等^[86] 总结了 48 个火烧后有机碳的变化, 认为总体上, 10 a 后土壤有机碳增加, 在短期内没有影响, 在 0~5 a 和 6~10 a, 野生火导致有机碳增加, 而控制火却使土壤有机碳含量下降。总的来说, 长时间内低强度的森林火干扰并不会导致土壤有机碳含量下降, 计划火干扰森林系统的碳吸收能力, 高强度火干扰的情况下土壤有机碳会出现不同程度的下降。

4 结语

在全球温室气体持续上升的今天, 土壤已经被看成是有效缓解大气 CO₂ 浓度上升的累积库, 其中土壤有机碳的作用和重要性不言而喻。由于不合理的土地利用和不适宜的管理措施所引起的土壤有机碳的损失, 已经导致土壤质量的下降和温室效应的加剧。通过采用推荐的农业管理措施 (免耕、有机培肥、轮作等) 促使土壤碳库由“源”到“汇”的转变以及对有机碳各组分的影响得到了广泛的研究, 但是国内对土地利用和管理措施对土壤有机碳的影响并未引起足够的重视。因此, 对我国在该方面的研究提出以下几点建议: ①鉴于土壤有机碳储量改变与土壤有机碳组分、有机碳动态及残留改变

密切相关, 而且由于不同组分的有机碳周转时间不一样, 加强开展土地利用变化对土壤有机碳影响的长期生态定位观察, 以便于更加深入地研究土地利用变化对土壤有机碳的长期效应。②加强土壤有机碳相关圈层 (如生物圈、大气圈、水圈和岩石圈等) 发生物质交换的研究, 进一步明确“源”和“汇”的问题。③加强林 (果) 草、农牧交错区系统土壤有机碳库研究, 尤其是对一些敏感指标 (微生物量碳、轻组有机碳和颗粒态有机碳) 进行定位监测。鉴于农林间作可以增加植被生产力和土壤有机碳含量, 并且改善土壤的水热状况, 而目前关于间作对土壤有机碳的影响尤其对土壤有机碳组分的研究较少, 因此关于这方面的研究有待于进一步深入。④加强多因子交互作用影响研究, 通过建立多因子模型, 更加准确、深刻反映不同典型地区土壤有机碳的变化, 从兼顾作物高产和农业可持续发展的角度出发, 研究耕作和施肥耦合与土壤有机碳平衡的关系。

参考文献:

- [1] LAI R. World soils and the greenhouse effect [J]. Global Change Newsletter, 1999, 37: 4~5.
- [2] HOUGHTON R A, HACKLER J L, LAWRENCE K T. The U. S. carbon budget: Contributions from land use change [J]. Science, 1999, 285: 574~578.
- [3] 赵鑫, 宇万太, 李建东. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展 [J]. 应用生态学报, 2006, 17 (11): 2203~2209.
- [4] 张于光, 张小全, 肖烨. 米亚罗林区土地利用变化对土壤有机碳和微生物量碳的影响 [J]. 应用生态学报, 2006, 17 (11): 2029~2033.
- [5] PARTON W J, SCHIMEL D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands [J]. Soil Sci Soc Am, 51: 1173~1179.
- [6] SIX J, ELLIOT E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. Soil Sci Soc Am, 1998, 62 (5): 1367~1377.
- [7] CHRISTENSEN B T. Carbon in primary and secondary organic mineral complexes [C] // structure and Organic matter storage in agricultural soils CRC press, Boca, Raton, 1998: 97~165.
- [8] GREGORICH E G, ELLERT B H. Light fraction and macro organic matter in mineral soils. In: soil sampling and methods of analysis (ed by M. R. Carter) [J]. Canadian Society of Soil Science, 1993: 397~407.
- [9] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 土壤活性有机质的研究进展 [J]. 土壤肥料, 2000 (6): 3~7.
- [10] 辛刚, 颜丽, 汪景宽, 等. 不同开垦年限黑土有机质变化的研究 [J]. 土壤通报, 2002, 33 (5): 332~335.
- [11] 吴建国, 张小全, 徐德应, 等. 土地利用变化对土壤物理组

分中有机碳分配的影响 [J]. 林业科学, 2002, 38 (4): 19-29.

[12] BERBOUX. Modeling vertical distribution of carbon in oxisols of the western Brazilian Amazon [J]. Soil Science, 1998, 163: 941- 951.

[13] SOLOMOND. Use effects on soil organic matter properties of chromic luvisols in semiarid northern Tanzania: carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2000, 78: 203- 213.

[14] MOTAVALLI. The impact of land clearing and agricultural practices on soil organic C fractions and CO₂ efflux in the Northern Guamaquifer [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2000, 79: 17- 27.

[15] 李正才, 傅懋毅, 杨校生. 经营干扰对森林土壤有机碳的影响研究概述 [J]. 浙江林学院学报, 2005, 22 (4): 469-474.

[16] BOWMAN R A, VIGIL LM F, NIELSEN D C, et al. Soil organic matter changes in intensively cropped dryland systems [J]. Soil Sci Soc Am, 1999, 63: 186- 191.

[17] 周广胜, 王玉辉. 全球生态学 [M]. 北京: 气象出版社, 2003: 199- 213.

[18] 杨玉盛, 陈光, 王义祥. 格氏栲人工林和杉木人工林碳库及分配 [J]. 林业科学, 2006, 42 (10): 43- 47.

[19] 张履勤, 章明奎. 林地与农地转换过程中红壤有机碳、氮和磷库的演变 [J]. 浙江林学院学报, 2006, 23 (1): 75- 79.

[20] 陈桂秋, 黄道友, 苏以荣, 等. 红壤丘陵区土地不同利用方式对土壤有机质的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24 (2): 256- 260.

[21] 胡亚林, 汪思龙, 颜绍馗, 等. 杉木人工林取代天然次生阔叶林对土壤生物活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16 (8): 1411- 1416.

[22] POST W M, KWON W M. Soil carbon sequestration and land use change: Processes and potential [J]. Global Change Biology, 2000 (6): 317- 327.

[23] HUGHES R F, KAUFFMAN J B, JARAMILLO V J. Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico [J]. Ecological Applications, 2000, 10 (2): 515- 527.

[24] CONANT RT, PAUSTIAN K, ELLIOTT E T. Grassland management and conversion to grassland: Effects on soil carbon [J]. Ecology Applications, 2001 (11): 343- 355.

[25] NEILL C, MELILLO J M, STEUDLER P A. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the southwestern Brazilian Amazon [J]. Ecological Applications, 1997, 7: 1216- 1225.

[26] SAGE R F, WEDIN D A, LIM R. The biogeography of C4 photosynthesis: Patterns and controlling factors Sage RF, Monson R K. C4 Plant Biology [M]. San Diego: Academic Press, 1999.

[27] HOUGHTON R A. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850 [C] // Lai R, Kimble J, eds. Soils and Global Change. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1995: 45- 65.

[28] DAVIDSON E A, ACKERMAN I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils [J]. Biogeochemistry, 1993, 20: 161- 193.

[29] 李明峰, 董云社, 齐玉春. 农垦对温带草地生态系统CO₂、CH₄、N₂O 通量的影响 [J]. 中国农业科学, 2004, 37 (12): 1960- 1965.

[30] 张文丽, 陈世苹, 苗海霞. 开垦对克氏针茅草地生态系统碳通量的影响 [J]. 植物生态学报, 2008, 32 (6): 1301- 1311.

[31] 文海燕, 赵哈林, 傅华. 开垦和封育年限对退化沙质草地土壤性状的影响 [J]. 草业学报, 2005, 14 (1): 31- 37.

[32] 李月梅, 曹广民, 王跃思. 开垦对海北高寒草甸土壤有机碳的影响 [J]. 生态学杂志, 2006, 25 (8): 911- 915.

[33] PRENTICE I C. Biome modeling and the carbon cycle [A]. Springer-Verlag: Berlin, 1993 (15): 219- 238.

[34] 钟华平, 樊江文, 于贵瑞. 草地生态系统碳蓄积的研究进展 [J]. 草业科学, 2005, 22 (1): 4- 11.

[35] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响 [J]. 生态学报, 1997, 17 (5): 469- 476.

[36] 李春莉, 赵萌莉, 韩国栋, 等. 不同放牧压力下荒漠草原土壤有机碳特征及其与植被之间关系的研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22 (5): 134- 138.

[37] 马秀枝, 王艳芬, 汪诗平. 放牧对内蒙古锡林河流域草原土壤碳组分的影响 [J]. 植物生态学报, 2005, 29 (4): 569- 576.

[38] 傅华, 陈亚民, 王彦荣, 等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素 [J]. 生态学报, 2004, 24 (3): 469- 476.

[39] 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.

[40] 张国盛, 黄高宝, YIN CHAN. 农田土壤有机碳固定潜力研究进展 [J]. 生态学报, 2005, 25 (2): 351- 357.

[41] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地不同土地利用和管理方式对土壤质量性状的影响 [J]. 应用生态学报, 2003, 14 (10): 1681- 1686.

[42] 武天云, JEFF SCHOENAU, 李凤民, 等. 耕作对黄土高原和北美大草原三种典型农业土壤有机碳的影响 [J]. 应用生态学报, 2003, 14 (12): 2213- 2218.

[43] 张心昱, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 不同农业土地利用方式和管理对土壤有机碳的影响 [J]. 生态学报, 2006, 26 (10): 3198- 3204.

[44] 唐国勇, 彭佩钦, 苏以荣, 等. 洞庭湖区不同利用方式下农田土壤有机碳含量特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15 (2): 219- 222.

[45] 迟光宇, 王俊, 陈欣, 等. 三江平原不同土地利用方式下土壤有机碳的动态变化 [J]. 土壤, 2006, 38 (6): 755- 761.

[46] 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响 [J]. 生态学杂志, 2001, 20 (2): 16- 19.

[47] 张春霞, 郝明德, 魏孝荣. 不同农田生态系统土壤微生物生物量碳的变化研究 [J]. 中国生态学报, 2006, 14 (1): 81- 83.

[48] JANZEN H H. Soil organic matter characteristics after long-term cropping to various spring wheat rotations. [J]. Can J

Soil Sci, 67 (4): 845- 856.

[49] 赵同谦, 张华, 徐华山. 黄河湿地孟津段不同植物群落类型土壤有机质含量变化特征研究 [J]. 地球科学进展, 2008, 23 (6): 638- 643.

[50] 彭佩钦, 张文菊, 童成立. 洞庭湖典型湿地土壤碳、氮和微生物碳、氮及其垂直分布 [J]. 水土保持学报, 2005, 19 (1): 49- 53.

[51] 刘子刚, 张坤民. 黑龙江省三江平原湿地土壤碳储量变化 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45 (6): 788- 791.

[52] 刘景双, 杨继松, 于君宝, 等. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究 [J]. 水土保持学报, 2003, 17 (3): 5- 8.

[53] 张文菊, 吴金水, 童成立. 三江平原湿地沉积有机碳密度和碳储量变异分析 [J]. 自然资源学报, 2005, 20 (4): 537- 544.

[54] 田昆, 常凤来, 陆梅. 人为活动对云南纳帕海湿地土壤碳氮变化的影响 [J]. 土壤学报, 2004, 41 (5): 681- 686.

[55] 黄靖宇, 宋长春, 宋艳宇. 湿地垦殖对土壤微生物量及土壤溶解有机碳、氮的影响 [J]. 环境科学, 2008, 29 (5): 1380- 1387.

[56] 张磊. 土地耕作后微生物量碳和水溶性有机碳的动态特征 [J]. 水土保持学报, 2008, 22 (2): 146- 150.

[57] LAL R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland [J]. Environmental Pollution, 2002, 116: 353- 362.

[58] 罗友进, 王子芳, 高明. 不同耕作制度对紫色水稻土活性有机质及碳库管理指数的影响 [J]. 水土保持学报, 2007, 22 (5): 55- 59.

[59] 孙国峰, 陈阜, 李琳. 耕作措施对长期免耕双季稻田土壤碳库的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2007, 12 (6): 45- 49.

[60] 蔡立群, 齐鹏, 张仁陟. 保护性耕作对麦- 豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响 [J]. 水土保持学报, 2008, 22 (2): 141- 145.

[61] 李琳, 伍芬琳, 张海林. 双季稻区保护性耕作下土壤有机碳及碳库管理指数的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 (1): 248- 253.

[62] 章明奎, 何振立, 陈国潮. 利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响 [J]. 土壤学报, 1997, 34 (4): 359- 366.

[63] 于君宝, 刘淑霞, 刘景双. 开垦对黑土有机碳在有机无机复合体分配的影响 [J]. 土壤通报, 2004, 35 (6): 695- 700.

[64] 张付申. 长期施肥条件下土和黄绵土有机质氧化稳定性研究 [J]. 土壤肥料, 1996, 6: 32- 36.

[65] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响 [J]. 中国农业科学, 2005, 38 (9): 1841- 1848.

[66] SHEN H, XU Z H, YAN X L. Effect of fertilization on oxidizable carbon, microbial biomass carbon, and mineralizable carbon under different agro-ecosystems [J]. Commun, 2001, 32 (9-10): 1575- 1588.

[67] 史奕, 张璐, 陈欣. 不同经营方式对黑土水稳定性团聚体组成及微粒有机质积累分布的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2005, 13 (2): 122- 124.

[68] 刘淑霞, 王鸿斌, 赵兰坡, 等. 不同施肥方式下黑土有机碳的变化规律研究 [J]. 河南农业科学, 2008, 2: 47- 52.

[69] 杨长明, 欧阳竹, 董玉红. 不同施肥模式对潮土有机碳组分及团聚体稳定性的影响 [J]. 生态学杂志, 2005, 24 (8): 887- 892.

[70] 宇万太, 赵鑫, 姜子绍, 等. 不同施肥制度对潮棕壤微生物量碳的影响 [J]. 生态学杂志, 2007, 26 (10): 1574- 1578.

[71] 胡诚, 曹志平, 叶钟年, 等. 不同的土壤培肥措施对低肥力农田土壤微生物生物量碳的影响 [J]. 生态学报, 2006, 26 (3): 808- 814.

[72] JOHNSON D W, HENDERSON P. Effects of forest management and elevated carbon dioxide on soil carbon storage. Lal R. Soil Management and Greenhouse Effect [C]. Boca Raton: CRC Press, 1995: 137- 145.

[73] JOHNSON D W. Effects of forest management on soil carbon storage [J]. Water Air Soil Pollut, 1992, 64: 83- 120.

[74] JONHSON C E, JONHSON A H, HUNTINGTON T G. Whole tree clear-cutting effects on soil horizons and organic matter pools [J]. Am Soc Soil Sci, 1991, 55: 497- 502.

[75] LAIHO R, SANCHEZB F, TIARKS A. Impacts of intensive forestry on early rotation trends in site carbon pools in the southeastern US [J]. For Eco Manage, 2002, 5881: 1- 13.

[76] 骆寿, 陈步峰, 陈永富. 海南岛霸王岭热带山地雨林采伐经营初期土壤碳氮储量 [J]. 林业科学, 2000, 13 (2): 123- 128.

[77] 王旭, 周广胜, 蒋延玲. 长白山阔叶红松林皆伐迹地土壤呼吸作用 [J]. 植物生态学, 2007, 31 (3): 355- 362.

[78] 方晰, 田大伦, 项文化. 不同经营方式对杉木林采伐迹地土壤C储量的影响 [J]. 中南林学院学报, 2004, 24 (1): 1- 5.

[79] ANDREAE M O, MERLET P. Emission of trace gases and aero soils from biomass burning. Glob [J]. Biogeochem Cyc, 2001, 15: 955- 9661.

[80] THONICKE K, VENEVSKY S, SITCH S, et al. The role of fire disturbance for global vegetation dynamics coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model Glob [J]. Eco Biogeography, 2001, 10: 661- 677.

[81] KRAEMER J F, HEMANN R K. Broadcast burning: 25-year effects on forest soil in the western flanks of the Cascade mountains [J]. For Sci, 1979, 25: 427- 439.

[82] MCKEE W H. Changes in Soil Fertility Following Prescribed Burning on Coastal Plain Pine Sites, Southeastern Forest Experiment Station [R]. Washington: USDA Forest Service, 1982.

[83] 唐季林, 张菁. 林火对云南松林土壤性质的影响 [J]. 北京林业大学学报, 1995, 17 (2): 44- 49.

[84] SANDS R. Physical Changes of Sandy Soils Planted to Radiate Pine [R]. Oregon: IUFRO Symposium on Forest Site and Continuous Productivity, 1983: 146- 152.

[85] DYRESS C T. Effect of wildfire on soil chemistry in four forest types in interior Alaska [J]. For Res Can, 1989, 19: 1389- 1396.

[86] JOHNSON D W, CURTIS P S. Effect of forest management on soil C and N storage [J]. For Eco Manage, 2001, 140: 227- 238.

(责任编辑: 刘新永)