

陈朝,吕昌河,范兰,武红. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展. 生态学报 2011 31(18):5358-5371.

Chen Z, Lu C H, Fan L, Wu H. Effects of land use change on soil organic carbon: a review. Acta Ecologica Sinica 2011 31(18):5358-5371.

土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展

陈 朝^{1,2}, 吕昌河^{1,*}, 范 兰^{1,2}, 武 红^{1,2}

(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)

摘要: 土壤有机碳是陆地碳库的重要组成部分,也是当前全球碳循环和全球变化研究的热点。土地利用/覆被变化及土地管理变化通过影响土壤有机碳的储量和分布,进而影响温室气体排放和陆地生态系统的碳通量。研究土地利用变化影响下的土壤有机碳储量及其动态变化规律,有助于加深理解全球气候变化与土地利用变化之间的关系。在阅读国内外有关文献的基础上,分别从土地利用及其管理方式变化的角度,概括了土地利用变化对土壤有机碳的影响过程与机理;针对当前研究的两大类方法,即实验方法和模型方法,分类详细介绍了它们各自的特点以及存在的一些问题。在此基础上,提出今后土地利用变化对土壤有机碳影响研究的发展趋势。

关键词: 土地利用变化; 土地管理变化; 土壤有机碳

Effects of land use change on soil organic carbon: a review

CHEN Zhao^{1,2}, LÜ Changhe^{1,*}, FAN Lan^{1,2}, WU Hong^{1,2}

1 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: As the largest carbon pool of terrestrial ecosystems and is the main container and carrier of carbon sequestration in the terrestrial ecosystem, soil plays an important role in the global carbon cycling. Soil organic carbon (SOC) covering more than half of the carbon storage in the soil carbon pool is an important contributor to the variation of atmospheric CO₂ concentration. To measure and evaluate the quantity and dynamic change of SOC is essential for understanding soil carbon sequestration processes, and thus the global carbon balance.

Land use/cover change affects not only the concentration and distribution of SOC directly, but also the characteristics of SOC indirectly by influencing the factors of SOC formation and transformation, and further influence greenhouse gas emissions and carbon flux in the terrestrial ecosystem. Literature results reveal that conversion of farmland to forest or grassland usually leads to the net SOC sequestration, while reclamation of grassland or forestland generally decreases the SOC concentration. Conversion of forestland to grassland is most likely to decrease the net SOC sequestration rate.

Land management activities affect SOC balance due to fertilization, irrigation, direct additions of C in organic amendments, and the amount of carbon left after biomass removal activities, such as crop harvest, timber harvest, fire, or grazing. Decomposition largely controls C outputs, as highly influenced by changes in moisture and temperature regimes, and the level of soil disturbance resulting from the management activities. In most major agricultural, silvicultural and pastoral systems, recommended or good management practices such as fertilisation, irrigation, conservation tillage (minimum and no-tillage), and retention of plant residue, commonly led to the SOC increasing. On the contrary, traditional management measures such as conventional tillage, cleaning for natural vegetation, whole tree harvest practices, severe fires, long-term heavy grazing, and pest outbreaks, decrease C inputs and thus SOC storage in most cases.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41071063)

收稿日期: 2010-11-21; 修订日期: 2011-04-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luch@igsrr.ac.cn

Land use changes at present or in the past are critical in determining the distribution and size of global or regional terrestrial carbon sources and sinks. Accurate estimations of land use/cover composition and changes in the terrestrial ecosystem are increasingly important not only for estimating the carbon balance but also for mitigating climate changes and guaranteeing food security. Studies on SOC storage and its dynamic change caused by land use change are important to deepen the understanding of relationship between land use and global climate change. By literature review, this paper summarizes major research progresses on the effects of land use change on SOC at home and abroad, explaining the process and mechanism of SOC change induced by changes of land use and land management mainly in farmland, forest and grassland ecosystems. Further, it summarized characteristics, applications and existing problems of two principal research methods, i. e., experimental methods and model approaches. Finally, research trends on the effects of land use change on SOC are overviewed.

Key Words: land use change; land management change; soil organic carbon

土壤碳库是大气碳库的 3.3 倍,生物碳库的 4.5 倍,因而成为陆地生态系统最大的碳库^[1-2]。土壤有机碳(SOC)库占到土壤碳库的一半以上^[1],与大气成分进行活性交换的 SOC 大约占到陆地生态系统碳的 2/3^[3],所以 SOC 的微小变化将会极大的缓和或加速大气 CO₂ 浓度的提高,进而改变全球碳循环^[4]。另一方面, SOC 对土壤的物理、化学、热学特征及土壤生物活性都有重大影响,增加 SOC 含量能改善土壤微团聚体结构,增加土壤结构稳定性和抗蚀性,提高土壤保水、保肥能力,对维持土壤质量和保持稳定的产量起着关键的作用^[5]。土壤碳固存是一种自然、成本节约和环境友好的过程,也是提高土壤质量实现粮食安全这一全球化问题的重要策略^[6]。近年来,由于土壤及 SOC 在缓和“温室效应”方面和保障粮食安全方面的潜在作用,越来越多的研究开始关注土壤及 SOC。《联合国气候变化公约》和《京都议定书》以及《联合国防治荒漠化公约》和《联合国生物多样性公约》都承认 SOC 的重要性,并指出需要量化 SOC 的储量与变化^[7]。

土地利用/土地覆被变化(LUCC)是全球环境变化研究的核心领域^[8],是驱动陆地生态系统碳循环的重要原因^[9],因此,精确估测土地利用与覆被变化以评估区域和陆地碳平衡显得越来越重要^[10]。据 IPCC 的报告,每年有 1.6 Pg 的碳由 LUCC 排放至大气中,是仅次于化石燃料燃烧排放的 7.2 Pg C 的第二大大气碳源^[11]。土地利用变化通过改变地表反射率和糙度^[12]、通过改变植被和土壤碳库的方式^[13],影响地表的热量平衡、大气温室气体浓度和全球气候进而影响全球的粮食安全^[14-15]。

已有的研究发现,自然生态系统转换到农业生态系统,其土地利用方式的改变会使 SOC 库在温带地区降低 60%、热带地区降低 75% 以上^[1]。严重的 SOC 库缩减将使土壤质量、生物产量和水资源质量下降,也可能使预期的全球变暖现象恶化与全球粮食安全威胁加重^[1,16]。所以,了解土地利用变化对 SOC 的影响对认识气候变化与粮食安全都具有重要的意义。

1 土地利用变化对 SOC 影响

土地利用变化可分为两种基本类型,即用途转换和集约度的升降^[17],前者是土地利用类型或方式的转变,后者可以理解为土地管理方式的变化,二者的变化都强烈影响着陆地生态系统的状态、性质和功能^[18]。SOC 的储量是进入土壤的植物残体量及其在土壤微生物作用下分解损失量二者之间动态平衡的结果^[19],土地利用变化既可以通过影响地表净初级生产量(NPP)和死有机物质的滞留直接影响 SOC 的储量输入,也可以通过潜在改变土壤的生物、化学与物理过程而间接影响 SOC 的储量输出^[20-21],因此,土地利用变化是影响 SOC 动态平衡的最主要人为因素。

1.1 土地类型转变对 SOC 的影响

土地类型转变尤其是农、林、牧利用类型之间的转变必然导致 SOC 储量的变化。从国外的研究结果来看,农地转向草地和林地会增加 SOC 的净固存率,且随着转换时间的延长, SOC 净固存率有减小趋势,但置信区较低,一般低于 50%^[2,22-26],这反映出 SOC 在土地利用类型变化初期的恢复速率大于后期^[27]。草地开垦为

农地后 SOC 下降^[2 24 28],但草地转向造林地不确定性较大,可能增加也可能减少 SOC^[29-31]。林地转向草地很可能会使 SOC 净固存率有小幅下降,也可能提高 SOC 净固存率^[29 32],林地转向农地则显著降低了 SOC 的净固存率^[2 24]。泥碳与湿地转向农地后的 SOC 净固存率下降,而湿地恢复却能使 SOC 净固存率增加^[9 33]。更为复杂的土地类型转化,如:弃耕地上的植被恢复、农地转向湿地后的植被恢复、草地转向湿地后的植被恢复可使 SOC 净固存率增加,但不确定性也相对较大^[34-35]。表 1 总结整理了国外学者在这方面的主要研究结论。

表 1 土地利用转变下的 SOC 潜在变化

Table 1 Changes in SOC storage induced by land-use conversion

土地利用变化 Land use changes	SOC 净固存率 [*] Net SOC sequestration rate /(Mg C hm ⁻² a ⁻¹)	不确定性 ^{**} Uncertainty	参考文献 References
农地g 农牧轮作地 Arable to ley: arable rotation	1.6	—	[23]
农地g 草地 Arable to grassland(50 a,35 a)	0.3—0.8,0.63	—	[22]
农地g 草地 Arable to grassland(15—25 a)	0.3—1.9	±0.6,110%	[24 2]
农地g 永久牧场 Arable to permanent pasture	0.27	—	[25]
农地g 林地 Arable to forestry(50 a)	0.26—0.35	—	[26]
农地g 林地 Arable to forestry(25 a)	0.3—0.6	>50%	[24 2]
农地g 林地 Arable to forestry	0.5—1.4	>50%	[25]
草地g 农地 Grassland to arable(20 a)	-0.95	±0.3,95% CI	[29 28]
草地g 农地 Grassland to arable	-1.0— -1.7,	>50%	[24 2]
草地g 造林地 Grassland to afforestation(90 a)	0.1	±0.02,95% CI	[29]
草地g 造林地 Grassland to afforestation(14—53 a)	-0.18—0.23	—	[30]
草地g 造林地 Grassland to afforestation(10 a)	0.5—0.7	—	[31]
沼泽地g 草地 Moorland to grassland	-0.9— -1.1	—	[29]
林地g 农地 Forestry to arable	-0.6	—	[24]
林地g 农地 Forestry to arable(45 a)	-0.2	—	[2]
林地g 草地 Forestry to grassland	-0.1	±0.1,95% CI	[29]
林地g 草地 Forestry to grassland(8—25 a)	-0.9—0.91	—	[32]
林地g 草地 Forestry to grassland(80 a)	0.15—0.22	—	[32]
泥炭地g 农地 Peatland to cultivation	-2.2— -5.4	—	[33]
湿地g 农地(温带或寒带) Wetland to arable (temperate and boreal)	-1.0— -19	—	[9]
湿地恢复 Wetland restoration	0.1—1.0	—	[9]
弃耕地上的植被恢复 Revegetation on abandoned arable	0.3—0.6	>50%	[34]
农地转向湿地后的植被恢复 Revegetation on wetlands from arable	2.2—4.6	>50%	[35]
草地转向湿地后的植被恢复 Revegetation on wetlands from grassland	0.8—3.9	>50%	[35]

* SOC 固存率为均值,正值表示净 SOC 增加,负值为减少; CI(confidence interval): 置信区间; ** 土地利用变化历史年数; 不确定性,是指一定置信区间下相对于均值统计的标准差及范围

我国土地类型转变对 SOC 影响的研究起步较晚,但研究内容丰富,主要是针对特定的地区和生态群落进行的^[36],如:在典型生态脆弱带黄土丘陵沟壑区,研究者发现林草地转为农地会使 SOC 降低^[37-38],但农地转为林草地却使 SOC 增加^[39-40],并且转为灌木林地或野生草地,比转化为人工林更有利于 SOC 的固存^[6];在东部丘陵山区,有些学者研究了北方山地林区和南方红壤丘陵区、亚热带山区的林地与其他土地利用类型之间的转换对 SOC 库的影响,结果表明:天然林转变为次生林(或人工林)、果园或坡耕地后,其表层 SOC 都大幅下降^[4],次生林转变为人工林、草地、农地后, SOC 也出现降低,但转变为灌木林后 SOC 增加^[41-42],农地和草地转变为人工林后 SOC 有所提高^[42]。很多学者研究了我国东部集约化平原区的农地利用变化对 SOC 的影响,发现东部平原区农地转为林、草地一般会显著提升 SOC 含量^[43-44],但短期内亚热带水田转为林地和撂荒草地却会使 SOC 降低^[45]。在农地内部的流转中,温带水田转为旱地、水浇地可使 SOC 提高^[44 46],旱地转为水浇地和菜地则使 SOC 大幅提高^[46],但亚热带水田转为旱地却使 SOC 大幅下降^[45]。在青藏高原高寒区,自然林转

为人工林、草地和农地会使 SOC 下降^[47-48] 转为灌草地却使 SOC 得到提高^[48]; 农地退耕为人工林、草地都使 SOC 增加^[49] 林、草地转为农地却使 SOC 显著下降^[50] 这在自然条件同样较差的西南岩溶农业区也有同样的规律^[51]。由于缺乏全面、详细的实测数据, 对全国范围内的土地利用类型转变对 SOC 库的总体估算相对较少^[52-53]。表 2 列出了中国学者在典型生态区研究的一些代表性成果。

表 2 中国土地利用变化与 SOC

Table 2 Land use change and soil organic carbon storage in China

典型生态区 Typical ecological zones	土地利用变化 Land use changes	SOC 含量或密度变化 SOC content/(kgC/m ²) or density changes	参考文献 References
温带干旱、半干旱区 Temperate arid and semi arid areas	坡耕地g 草地(15 a)	0.17% (0—70 cm)	[40]
	农地g 林地(25 a)、农地g 荒草地(25 a)	1.77%、0.98% (0—20 cm)	[39]
	林地g 农地(1 a、5 a、10 a)	-1.45%、-2.91%、-3.54% (0—20 cm)	[37]
	草甸草地g 农地(10 a)、荒漠草原g 农地(10 a)	-5.38—-5.05kgC/m ² 、 -0.97kgC/m ² (0—100 cm)	[38]
温带湿润半湿润区 Temperate humid and semi-humid areas	旱地g 林地(19 a)、旱地g 草地(19 a)、草地g 林地(19 a)	1.15%—1.39%、1.05%—1.45%、 1.06%—2.28% (0—20 cm)	[43]
	水田g 旱地(18 a)、水田g 水浇地(18 a)、旱地g 水浇地(18 a)、荒地g 水浇地(18 a)	0.44%、0.35%、0.357%、0.337% (0—20 cm)	[46]
	次生林g 农地、次生林g 草地、农地g 人工林(25 a)、草地g 人工林(25 a)	-0.632%、-0.369%、0.567%、0.304% (0—110 cm)	[42]
	水田g 水浇地(14 a)、水田g 撂荒地(9 a)、水田g 林地(14 a)	0.073%、0.367%、0.717% (0—20 cm)	[44]
亚热带湿润半湿润区 Subtropical humid and semi-humid areas	林地g 旱地(21 a)、未利用地(草灌)g 旱地(21 a)、旱地g 林地(8 a)、农地g 园地(21 a)、农地g 石漠(21 a)	-2.421%、-0.945%、-0.28%、1.754%、 -2.473% (0—20cm)	[51]
	次生林g 人工林(15—50 a)、次生林g 灌木林(>50 a)、次生林g 农地	-0.461—-1.591%、0.279%、 -1.189% (0—10cm)	[41]
	天然林g 人工林(次生林)(20 a)、天然林g 果园(20 a)、天然林g 坡耕地(7 a)	-3.08—-3.504 kgC/m ² 、-4.082 kgC/m ² 、 -5.103 kgC/m ² (0—20 cm)	[4]
	水田g 旱地、水田g 林地(4—5 a)、农地g 撂荒地(4—5 a)	-0.562% (0—20 cm)、-0.435% (0—20 cm)、 -0.127% (0—35 cm)	[45]
青藏高原高寒区 The Qinghai-Tibet Plateau	草地g 农地(30 a)、草地退化(沙化)(30 a)	-8.9 kgC/m ² 、-16 kgC/m ² (0—70 cm)	[50]
	农地g 人工林(5 a)、农地g 林草间作地(8 a)	0.419 kgC/m ² 、1.280 kgC/m ² (0—20 cm)	[49]
	自然林g 草地(25 a)、自然林g 灌丛(25 a)、自然林g 人工林(25 a)、自然林g 坡耕地(>15a)	-0.498%、1.611%、-2.071%、 -3.21% (0—20 cm)	[48]
	自然林g 人工林(45 a)、自然林g 人工林(25 a)、自然林g 农地(45 a)	-8.369%、-9.07%、-11.392% (0—20 cm)	[47]

“-”表示 SOC 均值含量(质量百分比)或密度下降

土地利用/覆被类型变化不仅直接影响 SOC 的含量和分布, 还通过影响与 SOC 形成和转化有关的因子而间接影响 SOC^[36]。如林地转为农地和草地一般会使 SOC 降低, 究其原因, 首先是植被净生产力降低(或残留物移除)减少了 SOC 输入量外, 其次是覆被类型改变, 使地表土壤温度升高因而加快了 SOC 分解, 原来稳定的有机碳变得不稳定并加大了渗透量^[54]。土地利用变化后, SOC 损失的绝对量还取决于气候条件、管理措施及其原来土壤的初始碳含量, 有机碳含量越丰富的土壤, 损失量越大^[55]。天然林或次生林转变为灌木林通常使 SOC 增加, 主要是灌木生长稠密, 地下部分细根的比例高且周转速度快, 且有大量根系的脱落物、分泌物留存在土壤中^[41]; 天然林转变为人工林, 其 SOC 恢复过程要比次生林快, 其速率还取决于树种和环境因子。凋落物多、根生长快的树种, 其林地 SOC 恢复过程相对较快^[56]。草地开垦为农地一般情况下会使 SOC 降低, 原因是开垦活动减少了碳素向土壤输入, 增强了有机质分解和土壤侵蚀活动, 破坏了土壤颗粒有机碳和土壤团聚体^[57]。农地转为林、草地一般会使 SOC 提高, 这是由于林、草地凋落物量和质量均较高且易分解, 土壤有机质稳定性增强, 而且随着林、草地郁闭度的提高, 地表温度降低, 土壤湿度和水分得以保持, 从而降低了

SOC 的分解速率,促进了 SOC 的积累^[42, 58],但也有学者对比我国温带与亚热带农田转变为林地对 SOC 的影响后指出,在短时间尺度内,农田向林地转变也可能使 SOC 降低^[45]。因此,土地利用变化对 SOC 的影响,因气候、土壤、生物以及土地管理措施的不同而存在较大差异,在考虑这一复杂的影响过程与机制时,不仅需要考察区域差异性,还应该考虑时间尺度效应。

1.2 土地管理方式变化对 SOC 的影响

土地管理方式变化通过改变土壤的碳输入速率和土壤有机质损失速率影响土壤碳收支,如自然植被的清除、轮垦、耕地、施肥、作物残余物还田、土地撂荒、有机土壤的农业利用等^[59]。Post 等^[32]总结分析了各种土地管理措施对 SOC 含量变化的影响,认为只要具备了以下几个条件的任何一个,都将有利于土壤碳固存:①增加有机质向土壤的输入速率;②降低土壤中有机质(尤其是轻组有机质组分)的分解速率;③增加有机质在土壤剖面中的分布深度;④增强土壤团聚体内颗粒有机质或有机矿质复合体等对有机质的物理保护作用。

1.2.1 农地

影响农田中土壤碳库的主要管理类型可分为:残余物管理类型、耕作管理、肥料管理(矿肥和有机改良)、作物的选择和耕作系统的强度(例如:连作与休耕时期的轮作)、灌溉管理,以及轮作等^[21]。传统耕作方式,一般会引起 SOC 的损失,主要原因是其耕作方式会破坏土壤团粒结构,使土壤温度和湿度发生变化,加快氧化和矿化过程,并提高可溶性有机碳或颗粒有机碳的淋溶和迁移,加速土壤侵蚀^[60]。秸秆燃烧、湿地排水、翻耕以及类似的措施,去除作物残留物、夏闲和无覆盖播种,以及过度使用杀虫剂等均可使土壤碳库迅速下降^[61]。优良的管理措施如秸秆还田、使用堆肥和 N 肥、采用牧草与作物轮作和少、免耕等,可以明显增加 SOC 固存率^[15, 33, 62]。保护性耕作如免耕、覆盖等措施,增加了地表归还生物量,减弱了表土扰动和土壤有机质的氧化与矿化^[63],使得土壤水稳性大团聚体数量增加,团聚体中的碳含量也相应增加,从而提高了 SOC 库^[64]。有研究表明,多年的保护性耕作使北美地区农田土壤有机质含量明显增加,超过 10a 可使农田耕层 SOC 含量增加 7%—10%^[65]。施肥尤其是有机肥与无机肥的配施提升活性 SOC 的含量和氧化过程的稳定性,促进轻组 SOC 与重组 SOC 的转化^[64],将保护性耕作与合理配置施肥结合可显著提升 SOC,有实验数据表明,在不投入 N 肥的情况下免耕对增加 SOC 的作用,不如施 N 肥的明显^[66]。中国学者的长期定位实验观测研究^[61, 67-68]也表明,综合采用新的、科学的农业措施包括保护性耕作、秸秆还田、覆盖作物、合理施肥、应用深根且富含木质素的作物等,会使碳损失量的 60%—70% 被重新被固定, SOC 会得到较大提高。

1.2.2 林地

不同的森林管理活动,如轮伐期的长度、树种的选择、排水、采伐做法(全树或锯材原木、更新、部分采伐或疏伐)、整地活动(计划火烧、松土)以及施肥等,均会影响 SOC 库^[69],其中采伐与火烧是造成林地 SOC 减少的重要原因。一般认为,森林采伐特别是皆伐后,地表生物量大量减少,地表温度升高,水分蒸发加快,土壤微生物分解活动增强,加上表土扰动可能带来侵蚀, SOC 将会减少,但适度采伐的林地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。部分研究结果认为森林收获使森林 SOC 呈减少的趋势,但不同的收获方法对 SOC 的影响差异明显^[70],如全树收获的情况下, SOC 稍有下降,但若森林收获前后对林下植被喷洒除草剂,则 SOC 呈显著下降^[71];强度采伐迹地,择伐后初期林地 SOC 含量都会有所降低^[72],如有学者研究发现在亚热带常绿阔叶林和杉木林皆伐 106 d 后,土壤有机质含量分别降低 34.7% 和 24.4%^[73]。深入的研究发现,亚热带杉木林皆伐后前 4 个月土壤呼吸显著高于未伐地,但伐后 1 a 内的平均土壤呼吸则与未伐地无显著差异^[74]。我国学者对长白山阔叶红松林皆伐后 13 a 的皆伐迹地的观测发现,在整个生长季节土壤呼吸速率约为林地的 75%^[75],这说明森林砍伐在初期可能导致 SOC 大量流失,土壤呼吸作用加强,随着时间的推移,土壤呼吸作用将减弱,土壤固碳能力可能会提高。不同强度火干扰对林地 SOC 有不同的影响,一般而言,低强度火干扰长时间内不会导致 SOC 减少,而高强度火干扰则会使 SOC 出现不同程度的下降^[76-77]。合理的林地管理措施可以增加林地 SOC,如增加林地储量、水土保持、减少风和火的干扰、林间道与沟渠灌排网络的设计、采用间伐减少森林砍伐量、提高生物多样性、短期木材林与能源作物轮作、肥料

施用等^[28], 这些措施不仅可以维持或增加现有土壤碳库, 还可以预防或减缓森林砍伐、限制森林退化, 从而加强林地利用的可持续性。

1.2.3 草地

影响草地 SOC 库的管理措施主要包括火烧、放牧、肥料管理、石灰施用、灌溉、有机土壤上的排水、高或低产量草种的再播种以及固 N 豆类的混播等^[78], 其中放牧是人类活动作用于草原土壤的最重要的干扰方式。一般情况下, 不同强度的放牧都会造成草地表层 (0—30 cm) SOC 的下降, 且表现为过牧 > 重牧 > 轻牧 > 中牧, 而补播、围封和禁牧将使 SOC 增加^[79]。但也有研究发现, 适度放牧有利于物理崩解过程和提高土壤对植物残体的吸收与降解速率, 会增加 SOC^[80]; 在北美混合草原和我国温带草原的定位试验和监测调查发现, 短期的轻度、中等甚至重度放牧, SOC 固存率会有所增加, 但长期放牧管理造成碳固存下降^[80-81]; 特别是过度放牧, 由于牲畜采食减少了植物向土壤的碳素归还量, 加上过度放牧对土壤物理化学性质的干扰, 加速了土壤的呼吸作用, 造成 SOC 的损失^[82]。N 肥投入对草地 SOC 的影响效应尚存在很大的不确定性, 有学者认为 N 素会被土壤有机质吸附、固定, 从而抑制有机质分解, 可增加 SOC 固存率^[83], 但也有学者认为 N 肥输入通过破坏有机矿质复合体来加剧活性碳溶出, 进而减少了 SOC 储存^[84], 还有学者认为 N 肥输入使得碳素输入与输出相互抵消, 对 SOC 影响不大^[85]。草地施 N 肥过程会伴随 N₂O 排放, 固 N 作物如豆类作物是对 N 肥的良好替代, 也不会增加 NO 化物温室气体的排放^[86]。重建或修复开垦牧场可大幅增加 SOC, 在自然保护区和高草草原地区尤为明显^[5 87]。单一草地转化为草-豆混合或改良草种时, 后者因具有较高的地上、地下生物量和较高的碳密度, SOC 固存率较高^[29]。

2 土地利用变化对 SOC 影响的主要研究方法

土地利用变化对 SOC 影响的研究方法, 涉及到土地利用本身的变化和 SOC 的动态变化而呈现多样化, 总结近年来国内外学者的研究如下。

2.1 实验方法

土地利用变化对 SOC 的影响是一个长期过程, 长期定位观测可获得第一手较为精准的数据因而成为众多学者的首选。总体而言, 实验方法可分为两类: 直接测定与间接获取。

采用田间实验方法直接测定需要在不同时间的同一土地利用方式下重复采样分析, 这种方法虽然需要较长的时间和严格的控制条件^[42], 但是这是研究 SOC 变化最精确的方法^[88]。在观测流程上, IPCC^[21-22 89] 1994 年提出的“清单”方法以及后来一系列修订方法已被用于估算多个国家和区域尺度的土壤碳蓄积变化, 但这种“一步”方法缺乏广泛验证, 不能反映 SOC 变化机理和非线性过程^[90], 也没有考虑到可能发生在土地利用和土地管理变化之后的 SOC 变化这种动态模式^[7]。在观测技术方面, 近年来, 先进的 C 同位素方法、涡度相关技术也开始为一些学者应用于 SOC 的相关研究, 如于贵瑞等^[91] 根据碳的稳定性同位素 (¹³C) 和放射性同位素 (¹⁴C) 在陆地生态系统长期动态过程中的作用, 探讨了同位素示踪技术在 SOC 来源、周转周期、土壤 CO₂ 通量的变化和组分区分、同位素富集等领域的应用, 并对中国陆地生态系统通量观测研究网络及涡度相关通量观测技术和方法作出了重要评估^[92]。

间接获取的方法包括相邻样地成对比较、空间代替时间方法和基于土壤剖面与类型、生物气候带的碳密度方法。相邻样地成对比较法就是选用一个或两个样点代表当前土地利用与邻近的代表过去土地利用的样地相比较^[93], 该方法摆脱了长时间重复样地实验观测, 能够迅速获取土地利用变化信息下的 SOC 动态。空间代替时间方法与相邻样地成对比较法相似, 只不过邻近样地具有不同的土地利用变化观测时间, 该方法可模拟某类型土地利用变化对 SOC 的长期影响过程与趋势。这两种方法需要的时间较短、易于操作, 为大多研究者所采用^[93-94]。Paul 等学者^[88] 总结了 43 项研究结果后发现, 50% 的研究应用相邻样地比较的方法, 27% 的研究用空间代替时间的方法, 而只有 23% 的研究用重复测定的直接观测方法, 这与 Guo、Gifford^[24] 及 Murty 等^[2] 总结的结果相似, 也充分说明了间接获取方法的实用性。碳密度方法主要是将土壤剖面数据获得的土壤碳密度与土壤类型图或植被类型图面积相乘, 来估算不同国家或区域 SOC 总量, 但因数据源精度的差异,

可能带来估算结果较大的不确定性。方精云^[95]利用 1: 1000 万中国土壤类型图和第一次土壤普查剖面资料估算了我国碳储量分别为 185.69 Pg; 王绍强^[52]采用 1: 400 万中国土壤类型分布图和第二次全国土壤普查典型土种剖面资料估算我国碳库为 92.42 Pg; 于东升^[96]则根据 1: 100 万中国土壤图与《中国土种志》及各省土种志估算我国碳储量为 89.14 Pg。三者研究结果差异显著,但后两者的结果接近。

2.2 模型方法

近年来,越来越多的学者开始使用模型方法来定量研究土地利用变化对 SOC 的影响,总体来看,模型可分为三类:

第一类以生物地理和生物地球化学模型为主,主流模型有 BIOME^[97]、MAPSS^[98]、CENTURY^[99]、DNDC^[100]、ROTH-C^[101]、EPIC^[102]等。这类模型侧重于研究不同的环境因子(气候、土壤条件等)和土地管理措施(施肥、灌溉、耕作制度与措施等)下的 SOC 动态。就目前的研究来看,一部分研究者使用该类模型方法研究了历史的、现在的和未来的 SOC 库变化^[5]和不同国家、区域尺度的 SOC 差异与变化^[103],另一部分学者则将土地利用变化、气候变化数据等多种数据与该类模型结合^[20,104]分析土地利用变化与气候变化对 NPP、植被碳储存、土壤异养呼吸、碳储存与 NEP 的影响。调查和实测数据验证结果表明,该类模型的模拟值与实测值通常有较好的一致性,但该类模型在应用于不同区域时需要验证和参数调试^[105]。

第二类以土地利用变化分析模型为主,侧重于土地利用或管理方式的转变过程对 SOC 的影响,这类模型可分为概念模型、分析模型、经验回归模型、线性/非线性规划与模拟模型^[106]。近年来,较多的研究者关注了不同国家尺度的土地利用变化对 SOC 储量变化的影响^[107-108]。而且,越来越多的学者也将情景分析方法融入到这类模型中,探讨气候变化、土地利用、经济发展等多情景模式下的全球或区域尺度的 LUCC 与陆地碳库变化之间的关系^[109-110],情景方法的融入降低了不同尺度的未来可能的气候变化和土地利用变化情景下碳库变化研究的不确定性。

第三类以土地利用变化与陆地生态系统碳循环耦合模型为主,该类模型通常由动态的生物-经济模型框架组成,它能同时捕捉社会经济行为和生物物理过程,并且能够融合 GIS 和 RS 方法^[106]。由 Houghton^[111]所建立的、关于土地利用变化与陆地生态系统碳循环关系研究的“簿记”模型,是此类模型的典型代表,得到普遍认可与应用,影响较大。较多的学者运用此模型分析了长时间序列的土地利用变化等人类活动对陆地碳储量的影响^[112-113]。由于土地利用变化驱动过程涉及到较多的社会经济因素,将生态模型与社会经济模型耦合,研究经济驱动下的土地利用决策与土壤碳动态之间的关系也成为研究热点^[114]。

3 研究展望

总体来看,国内外学者关于土地利用变化对 SOC 的研究涉及到全球、国家、区域、生态群落等多层次景观尺度,由于缺乏水域、城镇用地和未利用地的土壤实测资料^[53],当前的研究内容主要涉及农、林、牧土地利用方式及类型相互转换对 SOC 储量和分布等方面的影响。由于影响 SOC 的因素众多,土壤质地、气候条件等不同都可以使 SOC 的变化存在着较大的区域差异,因此,国内外学者对土地利用变化影响下的 SOC 库评估通常具有较大的不确定性,大多数的评估不确定性在 50% 以上^[33]。通过综合集成方法可有效降低研究结果的不确定性。

3.1 多学科、多时空尺度的综合研究

当前,国际上土壤碳库与全球变化的研究十分活跃,一个明显的特点是研究的综合性与学科交叉性,体现在陆地和生态系统中水文过程和养分过程与碳循环的关系的整体行为,以及利用与管理、土地覆被变化对陆地碳循环的影响,研究和揭示人类利用对这些碳循环过程的影响及其动力学^[115]。土地利用、气候变化、土壤性质是影响 SOC 的众多因素中比较重要的因子。越来越多的学者将土地利用变化与全球变化因素结合起来,研究土壤物理特性与 SOC、N 等元素的生物地球化学循环^[80,104]。土地管理、土地经济与计量数学等经典理论也渐渐融入到土地利用方式变化对 SOC 影响的人文因素分析与规划决策当中^[106,109,114]。

从研究尺度上来看,近年来,土地利用变化对土壤碳库影响的研究,已经从区域尺度和较短时间尺度扩展

到全球与国家尺度和长时间尺度^[1,112-113],但目前的研究尚不能很好地揭示过去、现在和预测未来 LUC 对陆地碳循环的时空影响^[116]。

未来研究需要更深入的定量分析过去及当前的 LUC 的碳源、碳汇效应,关注农、林、牧以外的土地利用与土地管理对 SOC 库的影响,注意深层 SOC 变化的测定和估算,从而进一步探求气候变化、LUC 同陆地生态系统碳循环之间的相互作用机制^[117-118]。

3.2 多方法的集成研究

实验方法是精确获取与分析 SOC 数据的原始途径,模型方法是提高土壤估碳水平的最佳手段,因此,在实验方法的基础上,开发和应用土地利用与生态系统的耦合模型是土地利用变化对 SOC 影响研究的必然趋势。国内外众多学者已开始充分利用历史文献记载、历史地形图、树木年轮、沉积和孢粉分析、3S 技术与数理统计等方法获取和分析土地利用过程数据^[117,119],通过田间试验或土壤普查、文献史料数据获取土壤碳数据,而将两者用土地利用变化与生态模型方法联系起来,并结合情景分析方法,系统分析预测未来土地利用变化对土壤碳的可能影响。如中国学者提出的陆地生态系统碳循环的地球信息科学方法已被广泛应用,该方法强调观测数据与模型验证、动态与静态分析、尺度转换、模型耦合^[116],而近来被众多学者关注的开源建模系统 GEFSOC^[7],该工具整合了多个国家的土地利用与管理模式,并与 3 个广泛应用的土壤碳动态评估模型(Century、RothC、IPCC 区域土壤碳评估模型)耦合,已被用于多个国家或区域尺度上的土壤碳库存管理和土地利用变化对 SOC 影响的评估。

模型方法尤其是生态系统估碳模型有其适用性和局限性。在第 236 次香山科学会议上,中国众多学者已经意识到我国无论是土地的集约化程度,还是土壤的被干扰程度都是不能套用国外已有的模型来解释^[105],因此,加强模型的验证与调试,开发与应用符合各国国情的陆地生态系统碳循环与基于地理信息系统及遥感等技术的土地利用变化系统耦合模型,开展实验测定与系统模拟的综合集成研究,定量评价和预测碳循环在社会、经济、环境方面的影响,应是未来土地利用与陆地碳循环研究方法的突破方向。

SOC 固碳量受气候、土壤、生态系统、土地利用、土地管理和历史、计量时间等因素影响,由于各因素的时空变异性,在土地利用变化对 SOC 的影响研究过程中还需要考虑研究的时空尺度。有学者指出在样点尺度、生态系统尺度、区域尺度、全球尺度上,尤其是在 SOC 检测较难的区域尺度上,应该选用适宜的 SOC 估算方法,否则可能带来差异较大的估算精度^[90],而在时间尺度上,尤其是土地利用和土地管理变化的历史过程往往被忽略^[107],如仅仅从静态的土地利用类型之间的截面数据横向比较来对比 SOC 的变化,忽视了不同时期纵向的土地利用变化动态历史过程,使结果往往不能很好的揭示土地利用变化过程及时间效应对 SOC 的影响。因此,突出土地利用变化对 SOC 影响的时空尺度效应也应是未来综合集成研究的重点之一。

References:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] Murty D, Kirschbaum M U F, Mcmurtrie R E, Megilvray H. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology*, 2002, 8(2): 105-123.
- [3] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [4] Yang Y S, Xie J S, Sheng H, Chen G S, Li X, Yang Z J. The impact of land use/cover change on storage and quality of soil organic carbon in midsubtropical mountainous area of southern China. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(1): 49-57.
- [5] Ardö J, Olsson L. Assessment of soil organic carbon in semi-arid Sudan using GIS and the CENTURY model. *Journal of Arid Environments*, 2003, 54(4): 633-651.
- [6] Chen L D, Gong J, Fu B J, Huang Z L, Huang Y L, Gui L D. Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area, loess plateau of China. *Ecological Research*, 2007, 22(4): 641-648.
- [7] Milne E, Adamat R A, Batjes N H, Bernoux M, Bhattacharyya T, Cerri C C, Cerri C E P, Coleman K, Easter M, Falloon P, Feller C, Gicheru P, Kamoni P, Killian K, Pal D K, Paustian K, Powlson D S, Rawajfih Z, Sessay M, Williams S, Wokabi S. National and sub-national assessments of soil organic carbon stocks and changes: the GEFSOC modelling system. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2007, 122(1):

- 3-12.
- [8] Li X B. A review of the international researches on land use/land cover change. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(6): 553-558.
- [9] Watson R T, Noble I R, Bolin B, Eds. Land-use, Land-use change and forestry // IPCC, ed. A Special Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [10] Gregorich E G, Rochette P, McGuire S, Liang B C, Lessard R. Soluble organic carbon and carbon dioxide fluxes in maize fields receiving spring applied manure. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(1): 209-214.
- [11] Solomon S, Qin D, Manning M, Eds. Summary for policymakers // IPCC, ed. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007.
- [12] Brovkin V, Claussen M, Driesschaert E, Fichefet T, Kicklighter D, Loutre M F, Matthews H D, Ramankutty N, Schaeffer M, Sokolov A. Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity. *Climate Dynamics*, 2006, 26(6): 587-600.
- [13] Houghton R A, Goodale C L. Effects of land-use change on the carbon balance of terrestrial ecosystems // De Fries R, Asner G, Houghton R, eds. Ecosystems and Land Use Change. Washington DC: American Geophysical Union, 2004, 153: 85-98.
- [14] Foley J A, Costa M H, Delire C, Ramankutty N, Snyder P. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers Ecology and the Environment*, 2003, 1(1): 38-44.
- [15] Smith P. Land use change and soil organic carbon dynamics. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 2008, 81(2): 169-178.
- [16] Smith P, Powlson D S. Sustainability of soil management practices—a global perspective // Abbott L K, Murphy D V, eds. Soil Biological Fertility—A Key to Sustainable Land Use in Agriculture. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003: 241-254.
- [17] Li X B. Explanation of Land Use Changes. *Progress in Geography*, 2002, 21(3): 195-203.
- [18] Secretariat IGBP. GLP (2005) Science Plan and Implementation Strategy. IGBP Report No. 53/IHDP Report No 19 // Young Bed. Stockholm, 2005.
- [19] Post W M, King A M, Wullschlegel S D. Soil organic matter models and global estimates of soil organic carbon // Smith P, Powlson D S, eds. Evaluation of Soil Organic Matter Models Using existing Long-Term Datasets. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996: 201-224.
- [20] Zhou T, Shi P J. Impacts of land use change on soil organic carbon change in China. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(2): 138-143.
- [21] IPCC. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry // Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, Krug T, Kruger D, Pipatti R, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, Wagner F, eds. Hayama: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/IGES, 2003.
- [22] IPCC. Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF). Special Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [23] Smith P, Powlson D S, Glendining M J, Smith J U. Potential for carbon sequestration in European soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments. *Global Change Biology*, 1997, 3(1): 67-79.
- [24] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [25] Ostle N J, Levy P E, Evans C D, Smith P. UK land use and soil carbon sequestration. *Land Use Policy*, 2009, 26(S1): S274-S283.
- [26] Morris S J, Bohm S, Haile-Mariam S, Paul E A. Evaluation of carbon accrual in afforested agricultural soils. *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1145-1156.
- [27] Coleman K, Jenkinson D S, Crocker G J, Grace P R, Klir J, Korschens M, Poulton P R, Richter D D. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. *Geoderma*, 1997, 81(1/2): 29-44.
- [28] Dawson J J C, Smith P. Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. *Science of the Total Environment*, 2007, 382(2/3): 165-190.
- [29] Soussana J F, Loiseau P, Vuichard N, Ceschia E, Balesdent J, Chevallier T, Arrouays D. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management*, 2004, 20(2): 219-230.
- [30] Ritter E. Carbon, nitrogen and phosphorus in volcanic soils following afforestation with native birch (*Betula pubescens*) and introduced larch (*Larix sibirica*) in Iceland. *Plant and Soil*, 2007, 295(1/2): 239-251.
- [31] Davis M, Nordmeyer A, Henley D, Watt M. Ecosystem carbon accretion 10 years after afforestation of depleted subhumid grassland planted with three densities of *Pinus nigra*. *Global Change Biology*, 2007, 13(7): 1414-1422.
- [32] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [33] Freibauer A, Rounsevell M D A, Smith P, Verhagen J. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, 2004, 122: 1-23.
- [34] Poulton P R. Geescroft wilderness, 1883—1995 // Powlson D S, Smith P, Smith J U, eds. Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1996: 385-390.
- [35] Kamp T, Gattinger A, Wild U, Munch J C. Methane and nitrous oxide emissions from drained and restored peat in the Danube valley.

- Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie. Berlin: Parey, 2001. 193.
- [36] Wang Y F, Chen Z Z. Distribution of soil organic carbon in the major grasslands of XiLinGuoLe, Inner Mongolia, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, (6): 66-72.
- [37] Zha X C, Tang K L. Study on soil degeneration of reclaimed forest-land in loess hilly forest region. *Arid Land Geography*, 2001, 24(4): 359-364.
- [38] Wang G X, Ma H Y, Wang Y B, Chang J. Impacts of land use change on environment in the middle reaches of the Heihe River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(4): 359-367.
- [39] Gong J, Chen L D, Fu B J, Hu C X, Wei W. Effects of vegetation restoration on soil nutrient in a small catchment in Hilly Loess Area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 93-96.
- [40] Fu B J, Chen L D, Ma K M. The effect of land use change on the regional environment in the YangJuanGou catchment in the Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(3): 241-246.
- [41] Li Z C, Xu D Y, Fu M Y, Sun X Z, Xi J R. Effects of land-use change on vertical distribution and storage of soil organic carbon in North Subtropical Areas. *Forest Research*, 2007, 20(6): 744-749.
- [42] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. Impact of land-use change on soil carbon storage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 593-599.
- [43] Fu B J, Guo X D, Chen L D, Ma K M, Li J R. Land use changes and soil nutrient changes: a case study in Zunhua County, Hebei Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(6): 926-931.
- [44] Jiang Y, Zhang Y G, Liang W J, Wen D Z. Profile distribution and storage of soil organic carbon in an Aquic Brown Soil as affected by land use. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(3): 544-550.
- [45] Shi L J, Zheng L B, Mei X Y, Yu L Z, Jia Z C. Characteristics of soil organic carbon and total nitrogen under different land use types in Shanghai. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, (9): 2279-2287.
- [46] Kong X B, Zang F R, Wang R, Xu Y. The impact of land use type changes on soil nutrient in suburban area: the case of Daxing District in Beijing. *Geographical Research*, 2005, 24(2): 213-221.
- [47] Zhang Y G, Zhang X Q, Xiao Y. Effects of land use change on soil organic carbon and microbial biomass carbon in Miyaluo forest area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2029-2033.
- [48] Liu S L, Fu B J, Chen L D, Lu Y H, Ma K M. Effects of land use changes on soil properties in Wolong Nature Reserve. *Geographical Research*, 2002, 21(6): 682-688.
- [49] Li Y M. Changes of organic carbon in soil under different land use patterns in Alpine agricultural region of Qinghai. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2010, (10): 5191-5193.
- [50] Wang G X, Cheng G D, Shen Y P. Soil organic carbon pool of grasslands on the Tibetan Plateau and its global implication. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 693-700.
- [51] Jiang Y J, Yuan D X, Zhang C, Kuang M S, Wang J L, Xie S Y, Zhang G, He R S. Impact of land use change on soil properties in a typical Karst agricultural region: a case study of Xiaojiang water shed, Yunnan. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(5): 751-760.
- [52] Wang S Q, Zhou C H, Li K R, Zhu S L, Huang F H. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 533-544.
- [53] Liu J Y, Wang S Q, Chen J M, Liu M L, Zhuang D F. Storages of soil organic carbon and nitrogen and land use changes in China: 1990-2000. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 483-496.
- [54] Bouwman A F, Leemans R. The role of forest soils in the global carbon cycle//McFee W W, Kelly J M, eds. *Carbon Forms and Function in Forest Soils*. Madison: Soil Science Society of America, Inc, 1995: 503-525.
- [55] Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1): 99-105.
- [56] Xu D Y. The effect of human management activities on the carbon in forest soils. *World Forestry Research*, 1994, (5): 26-31.
- [57] Xiao S S, Dong Y S, Qi Y C, Peng Q, He Y T, Yang Z J. Advance in responses of soil organic carbon pool of grassland ecosystem to human effects and global changes. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(10): 1138-1148.
- [58] Laganière J, Angers D A, Paré D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 439-453.
- [59] Li K R. *Land Use Change, Net Emission of Greenhouse Gases and the Carbon Cycle in Terrestrial Ecosystems*. Beijing: China Meteorological Press, 2002, 152-152.
- [60] Lal R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 353-362.
- [61] Zhu Y L, Han J G, Wu J S. Effect of agricultural practices on soil organic carbon dynamics. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(5): 648-651.

- [62] Falloon P, Smith P, Powlson D S. Carbon sequestration in arable land—the case for field margins. *Soil Use Manage*, 2004, 20: 240–247.
- [63] Reicosky D C, Dugas W A, Torbert H A. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 1997, 41(1/2): 105–118.
- [64] Zhao X, Yu W T, Li J D, Jiang Z S. Research advances in soil organic carbon and its fractions under different management patterns. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2203–2209.
- [65] Yang X M, Kay B D. Rotation and tillage effects on soil organic carbon sequestration in a typical Hapludalf in Southern Ontario. *Soil Tillage Research*, 2001, 59(3/4): 107–114.
- [66] West T O, Marland G. Net carbon flux from agriculture: carbon emissions, carbon sequestration, crop yield, and land-use change. *Biogeochemistry*, 2003, 63(1): 73–83.
- [67] Chen S H, Zhu Z L, Liu D H, Shu L, Wang C Q. Influence of straw mulching with no-till on soil nutrients and carbon pool management index. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 806–809.
- [68] Hu C, Qiao Y, Li S L, Chen Y F, Liu G J. Vertical distribution and storage of soil organic carbon under long-term fertilization. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 689–692.
- [69] Liski J, Pussinen A, Pingoud K, Mäkipää R, Karjalainen T. Which rotation length is favourable to carbon sequestration? *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(11): 2004–2013.
- [70] Johnson D W. Effects of forest management on soil carbon storage. *Water, Air and Soil Pollution*, 1992, 64(1/2): 83–120.
- [71] Laiho R, Sanchezb F, Tiarks A, Dougherty P M, Trettin C C. Impacts of intensive forestry on early rotation trends in site carbon pools in the southeastern US. *Forest Ecology Management*, 2003, 174(1/3): 177–189.
- [72] Luo T S, Chen B F, Chen Y F, Yang Y C, Yang X S, Li D J. Variation of the soil carbon and nitrogen for initial stage after the felling in tropical montane rainforest of Bawangling, Hainan Island. *Forest Research*, 2000, 13(2): 123–128.
- [73] Zhang D H, Fan S H. Change of soil fertility in the evergreen broad-leaved and Chinese fir forest lands in sub-tropical after clear cuttings. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2002, 8(2): 115–119.
- [74] Yang Y S, Chen G S, Wang X G, Xie J S, Dong B, Li Z, Gao R. Effect of clear-cutting on soil respiration of Chinese fir plantation. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 584–590.
- [75] Wang X, Zhou G S, Jiang Y L, Cao M C, Zeng W, Song J. Soil respiration in a clear-cut broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountain. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 355–362.
- [76] Johnson D W, Curtis P S. Effect of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management*, 2001, 140(2/3): 227–238.
- [77] Dyress C T, van Cleve K, Levison J D. The Effect of wildfire on soil chemistry in four forest types in interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, 19(11): 1389–1396.
- [78] Ogle S M, Conant R T, Paustian K. Deriving grassland management factors for a carbon accounting approach developed by the intergovernmental panel on climate change. *Environmental Management*, 2004, 33(4): 474–484.
- [79] Shi F, Li Y E, Gao Q Z, Wan Y F, Qin X B, Jin L, Liu Y T, Wu Y J. Effects of managements on soil organic carbon of grassland in China. *Pratacul Tural Science*, 2009, 26(3): 9–15.
- [80] Derner J D, Schuman G E. Carbon sequestration and rangelands: A synthesis of land management and precipitation effects. *Journal Soil Water Conservation*, 2007, 62(2): 77–85.
- [81] Liu N, Zhang Y J. Effects of grazing on soil organic carbon and total nitrogen in typical steppe. *Pratacultural Science*, 2010, 27(4): 11–14.
- [82] Lin H L, Wang J, Xu Z, Chen Z. Research progress and trend of the carbon cycle in grassland agroecosystem. *Pratacultural Science*, 2005, 22(4): 59–62.
- [83] Rice C W. Soil organic C and N in rangeland soils under elevated CO₂ and land management//Proceedings of Advances in Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory, Measurements, and Monitoring. Raleigh: USDA-ARS, USDA-FS, USDA-NRCS, US Dept of Energy, NASA and National Council for Air and Stream Improvement, 2000.
- [84] Mack M C, Schuur E A G, Bret-Harte M S, Shaver G R, Chapin F S. Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization. *Nature*, 2004, 431(7007): 440–443.
- [85] Ünlü K, Özenirler G, Yurteri C. Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in Central Turkey. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(4): 609–620.
- [86] Mortenson M C, Schuman G E, Ingram L J. Carbon sequestration in rangelands interseeded with yellow-flowering alfalfa (*Medicago sativa* ssp. *falcata*). *Environmental Management*, 2004, 33(S1): S475–S481.
- [87] Olsson L, Ardö J. Soil carbon sequestration in degraded semiarid agro-ecosystems—perils and potentials. *Ambio—A Journal of the Human*

- Environment ,2002 ,31(6) : 471-477.
- [88] Paul K I ,Polglase P J ,Nyakuengama J G ,Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology Management* ,2002 ,168(1/3) : 241-257.
- [89] OECD ,IPCC. Greenhouse Gas Inventory Workbook ,Final Draft: IPCC/OECD Joint Program ,1996.
- [90] Chang R Y ,Liu G H ,Fu B J. Review on the methods for soil carbon sequestration at regional scale. *Geographical Research* ,2010 ,29(9) : 1616-1628.
- [91] Yu G R ,Wang S Q ,Chen P Q ,Li Q K. Isotope tracer approaches in soil organic carbon cycle research. *Advance in Earth Sciences* ,2005 ,20(5) : 568-577.
- [92] Yu G R ,Wen X F ,Sun X M ,Tanner B D ,Lee X H ,Chen J Y. Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement. *Agricultural and Forest Meteorology* ,2006 ,137(3/4) : 125-137.
- [93] Powers J S. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in northeastern Costa Rica. *Ecosystems* ,2004 ,7(2) : 134-146.
- [94] Käetterer T ,Andersson L ,Andrén O ,Persson J. Long-term impact of chronosequential land use change on soil carbon stocks on a Swedish farm. *Nutrient Cycling Agroecosystems* ,2008 ,81(2) : 145-155.
- [95] Fang J Y ,Liu G H ,Xu H L. Carbon cycle and global significance of the terrestrial ecosystem in China//Wang ,G C ,Wen ,Y P ,eds. Related processes of greenhouse gas concentrations and monitoring emissions. Beijing: Press of Environmental Science in China ,1996. 129-139.
- [96] Yu D S ,Shi X Z ,Sun W X ,Wang H J ,Liu Q H ,Zhao Y C. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1: 1000000 soil database. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,2005 ,16(12) : 2279-2283.
- [97] Prentice I C ,Sykes T ,Cramer W. A simulation model for the transient effects of climate change on forest landscapes. *Ecological Modeling* ,1993 ,65(1/2) : 51-70.
- [98] Members V. Vegetation/ecosystem modeling and analysis project: Comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental-scale study of terrestrial ecosystem responses to climate change and CO₂ doubling. *Global Biogeochem Cycles* ,1995 ,9(4) : 407-437.
- [99] Parton W J ,Schimel D S ,Cole C V ,Ojima D S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal* ,1987 ,51(5) : 1173-1179.
- [100] IEOS. Users Guide for the DNDC Model ,Version 7.7. NH ,USA: University of New Hampshire ,2002. 57.
- [101] Jenkinson D S ,Hart P B S ,Rayner J H. Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments at rothamsted. *Intecol Bulletin* ,1987 ,15: 1-8.
- [102] Izaurrealde R C ,Williams J R ,McGill W B ,Rosenberg N J ,Jakas M C Q. Simulating soil C dynamics with EPIC: model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling* ,2006 ,192(3/4) : 362-384.
- [103] Li C S. Loss of soil carbon threatens chinese agriculture: a comparison on agroecosystem carbon pool in China and the US. *Quaternary Sciences* ,2000 ,(4) : 345-350.
- [104] Gao Z Q ,Liu J Y ,Cao M K ,Li K R ,Tao B. Impacts of land-use and climate changes on ecosystem productivity and carbon cycle in the cropping-grazing transitional zone in China. *Science in China Series D: Earth Sciences* ,2005 ,48(9) : 1479-1491.
- [105] Zhao S C. Evolution mechanism and development trend of agricultural soil carbon pool — 236th Xiangshan Science Conference Sidelights. *Advance in Earth Sciences* ,2005 ,20(5) : 587-590.
- [106] Upadhyay T P ,Solberg B ,Sankhayan P L. Use of models to analyse land-use changes , forest/soil degradation and carbon sequestration with special reference to Himalayan region: a review and analysis. *Forest Policy and Economics* ,2006 ,9(4) : 349-371.
- [107] Schulp C J E ,Verburg P H. Effect of land use history and site factors on spatial variation of soil organic carbon across a physiographic region. *Agriculture Ecosystems and Environment* ,2009 ,133(1/2) : 86-97.
- [108] Woodbury P B ,Heath L S ,Smith J E. Effects of land use change on soil carbon cycling in the conterminous United States from 1900 to 2050. *Global Biogeochemical Cycles* ,2007 ,21: GB3006 ,doi: 10. 1029/2007GB002950.
- [109] Geoghegan J ,Lawrence D ,Schneider L C ,Tully K. Accounting for carbon stocks in models of land-use change—an application to Southern Yucatan. *Regional Environmental Change* ,2010 ,10(3) : 247-260.
- [110] Tappeiner U ,Tasser E ,Leitinger G ,Cernusca A ,Tappeiner G. Effects of historical and likely future scenarios of land use on above- and belowground vegetation carbon stocks of an alpine valley. *Ecosystems* ,2008 ,11(8) : 1383-1400.
- [111] Houghton R A ,Hobbie J E ,Mellilo J M. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to atmosphere. *Ecological Monographs* ,1983 ,53(3) : 235-262.
- [112] Olofsson J ,Hickler T. Effects of human land-use on the global carbon cycle during the last 6000 years. *Vegetation History and Archaeobotany* ,2008 ,17(5) : 605-615.

- [113] Ge Q S, Dai J H, He F N, Pan Y, Wang M M. Land use changes and their relations with carbon cycles over the past 300 a in China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(6): 871-884.
- [114] Schneider U A. Soil organic carbon changes in dynamic land use decision models. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2007, 119(3/4): 359-367.
- [115] Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: facing the challenge of global change and food security. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(4): 384-393.
- [116] Liu J Y, Yu G R, Wang S Q, Yue T X, Gao Z Q. A method of geo-information science for studying carbon cycle and its mechanism of terrestrial ecosystems. *Geographical Research*, 2003, 22(4): 397-405.
- [117] Tao B, Ge Q S, Li K R, Shao X M. Progress in the studies on carbon cycle in terrestrial ecosystem. *Geographical Research*, 2001, 20(5): 564-575.
- [118] Huang Y, Sun W J, Zhang W, Yu Y Q. Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: a mini-review. *Scientia Sinica: Vitae*, 2010, (7): 577-586.
- [119] Yadav V, Malanson G. Spatially explicit historical land use land cover and soil organic carbon transformations in Southern Illinois. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 123(4): 280-292.

参考文献:

- [8] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向. *地理学报*, 1996, 51(6): 553-558.
- [17] 李秀彬. 土地利用变化的解释. *地理科学进展*, 2002, (3): 195-203.
- [20] 周涛, 史培军. 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响. *地球科学进展*, 2006, 21(2): 138-143.
- [36] 王艳芬, 陈佐忠. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响. *植物生态学报*, 1998, (6): 66-72.
- [37] 查小春, 唐克丽. 黄土丘陵区林区开垦地土壤退化研究. *干旱区地理*, 2001, 24(4): 359-364.
- [38] 王根绪, 马海燕, 王一博, 常娟. 黑河流域中游土地利用变化的环境影响. *冰川冻土*, 2003, 25(4): 359-367.
- [39] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 虎陈霞, 卫伟. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 93-96.
- [40] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响——以延安市羊圈沟流域为例. *地理学报*, 1999, 54(3): 241-246.
- [41] 李正才, 徐德应, 傅懋毅, 孙雪忠, 奚金荣. 北亚热带土地利用变化对土壤有机碳垂直分布特征及储量的影响. *林业科学研究*, 2007, 20(6): 744-749.
- [42] 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. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 593-599.
- [43] 傅伯杰, 郭旭东, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 土地利用变化与土壤养分的变化——以河北省遵化县为例. *生态学报*, 2001, 21(6): 926-931.
- [44] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 闻大中. 潮棕壤不同利用方式有机碳剖面分布及碳储量. *中国农业科学*, 2005, 38(3): 544-550.
- [45] 史利江, 郑丽波, 梅雪英. 上海市不同土地利用方式下的土壤碳氮特征. *应用生态学报*, 2010, (9): 2279-2287.
- [46] 孔祥斌, 张凤荣, 王茹, 徐艳. 城乡交错带土地利用变化对土壤养分的影响——以北京市大兴区为例. *地理研究*, 2005, 24(2): 213-221.
- [47] 张于光, 张小全, 肖焯. 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. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2029-2033.
- [48] 刘世梁, 傅伯杰, 陈利顶, 吕一河, 马克明. 卧龙自然保护区土地利用变化对土壤性质的影响. *地理研究*, 2002, 21(6): 682-688.
- [49] 李月梅. 青海高寒农区不同土地利用方式下土壤有机碳含量变化研究. *安徽农业科学*, 2010, (10): 5191-5193.
- [50] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 693-700.
- [51] 蒋勇军, 袁道先, 章程, 况明生, 王建力, 谢世友, 张贵, 何绕生. 典型岩溶农业区土地利用变化对土壤性质的影响——以云南小江流域为例. *地理学报*, 2005, 60(5): 751-760.
- [52] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.
- [53] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 刘明亮, 庄大方. 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.
- [55] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因素及其研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99-105.
- [56] 徐德应. 人类经营活动对森林土壤碳的影响. *世界林业研究*, 1994, (5): 26-31.
- [57] 肖胜生, 董云社, 齐玉春, 彭琴, 何亚婷, 杨智杰. 草地生态系统土壤有机碳库对人为干扰和全球变化的响应研究进展. *地球科学进展*, 2009, 24(10): 1138-1148.
- [59] 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. 北京: 气象出版社, 2002, 152-152.
- [61] 朱咏莉, 韩建刚, 吴金水. 农业管理措施对土壤有机碳动态变化的影响. *土壤通报*, 2004, 35(5): 648-651.
- [64] 赵鑫, 宇万太, 李建东, 姜子绍. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2203-2209.

- [67] 陈尚洪,朱钟麟,刘定辉. 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究. 植物营养与肥料学报,2008,14(4): 806-809.
- [68] 胡诚,乔艳,李双来,陈云峰,刘国际. 长期不同施肥方式下土壤有机碳的垂直分布及碳储量. 中国生态农业学报,2010,18(4): 689-692.
- [72] 骆士寿,陈步峰,陈永富,杨彦臣,李大江. 海南岛霸王岭热带山地雨林采伐经营初期土壤碳氮储量. 林业科学研究,2000,13(2): 123-128.
- [73] 张鼎华,范少辉. 亚热带常绿阔叶林和杉木林皆伐后林地土壤肥力的变化. 应用与环境生物学报,2002,8(2): 115-119.
- [74] 杨玉盛,陈光水,王小国,谢锦升,董彬,李震,高人. 皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响. 土壤学报,2005,42(4): 584-590.
- [75] 王旭,周广胜,蒋延玲,曹铭昌,曾伟,宋健. 长白山阔叶红松林皆伐迹地土壤呼吸作用. 植物生态学报,2007,31(3): 355-362.
- [79] 石锋,李玉娥,高清竹,万运帆,秦晓波,金琳,刘运通,武艳娟. 管理措施对我国草地土壤有机碳的影响. 草业科学,2009,26(3): 9-15.
- [81] 刘楠,张英俊. 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响. 草业科学,2010,27(4): 11-14.
- [82] 林慧龙,王军,徐震,陈钟. 草地农业生态系统中的碳循环研究动态. 草业科学,2005,22(4): 59-62.
- [90] 常瑞英,刘国华,傅伯杰. 区域尺度土壤固碳量估算方法评述. 地理研究,2010,29(9): 1616-1628.
- [91] 于贵瑞,王绍强,陈泮勤,李庆康. 碳同位素技术在土壤碳循环研究中的应用. 地球科学进展,2005,20(5): 568-577.
- [95] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义//王庚辰,温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社,1996: 129-139.
- [96] 于东升,史学正,孙维侠,王洪杰,刘庆花,赵永存. 基于 1: 100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. 应用生态学报,2005,16(12): 2279-2283.
- [103] 李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患——中美农业生态系统碳循环对比研究. 第四纪研究,2000,(4): 345-350.
- [105] 赵生才. 我国农田土壤碳库演变机制及发展趋势——第 236 次香山科学会议侧记. 地球科学进展,2005,20(5): 587-590.
- [115] 潘根兴,赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全. 地球科学进展,2005(4): 384-393.
- [116] 刘纪远,于贵瑞,王绍强,岳天祥,高志强. 陆地生态系统碳循环及其机理研究的地球信息科学方法初探. 地理研究,2003,22(4): 397-405.
- [117] 陶波,葛全胜,李克让,邵雪梅. 陆地生态系统碳循环研究进展. 地理研究,2001,20(5): 564-575.
- [118] 黄耀,孙文娟,张稳,于永强. 中国陆地生态系统土壤有机碳变化研究进展. 中国科学: 生命科学,2010,(7): 577-586.