

森林经营管理对土壤碳固定的影响研究进展

田耀武^{1,2}, 黄志霖^{2*}, 肖文发², 谭名照³

(1. 河南科技大学 林学院, 河南 洛阳 471003; 2. 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 3. 重庆市林业科学研究院, 重庆 400036)

摘要: 森林土壤有机碳(SOC)对全球碳循环有着重要的作用, 森林 SOC 积累和分解直接影响陆地生态系统碳存储和全球碳平衡。碳汇的基本策略是把 CO₂ 固定于植被体, 削减温室气体的排放量。森林经营管理对土壤碳库固定与存储影响明显且持续时期较长。鉴于此, 综合分析了森林收获、轮伐期、氮肥施入、树种等营林措施对土壤碳库变化的影响及其不确定性, 指出了当前森林土壤有机碳研究面临的一些问题和今后的研究方向。

关键词: 森林管理; 土壤有机碳; 碳固定; 碳储量

中图分类号: S157.1 文献标志码: A 文章编号: 1004-3268(2012)07-0001-06

Advances on Effect of Forest Management on Soil Carbon Sequestration

TIAN Yao-wu^{1,2}, HUANG Zhi-lin², XIAO Wen-fa², TAN Ming-zhao³

(1. College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;
2. State Forestry Administration Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
3. Chongqing Academy of Forestry, Chongqing 400036, China)

Abstract: Forest soil organic carbon (SOC) is an important component of global carbon cycle, and the changes of its accumulation and decomposition directly affect terrestrial ecosystem carbon storage and global carbon balance. Forestry can generate a sink for greenhouse gases. Afforestation is a common strategy that leads to the incorporation of carbon dioxide (CO₂) in plant biomass. Adapted management of existing forests may have a less obvious or slower effect on the terrestrial C pool. It is mainly relevant in countries that already have a large forest cover. This paper reviewed soil organic carbon was affected by harvesting, rotation, thinning, fertilizer application and tree-species selection, which have an impact on the forest productivity and consequently on C sequestration in the ecosystem. Some related issues and further research directions were discussed.

Key words: forest management; soil organic carbon(SOC); Carbon sequestration; Carbon stock

陆地生态系统碳循环、碳源与碳汇格局及其驱动机制、陆地生态系统固碳潜力及其可持续性是当前广泛关注的国际气候变化前沿科学问题。对土壤有机碳的主导控制因子及其控制过程认识不足, 对大气碳收支评估不准确, 是出现未知碳汇、预测气候

变化及其影响不确定性的主要原因。森林生态系统碳储量占陆地总量的 80% 以上, 森林土壤有机碳(SOC)占地球土壤有机碳的 70% 以上^[1-2], 森林土壤碳的固定和分解直接影响陆地生态系统碳存储和全球碳平衡。森林凋落物、根沉积碳输入和碳释放

收稿日期: 2012-03-20

基金项目: “十二五”林业科技支撑计划项目(2011BAD38B04); 林业公益性行业科研专项(201104008); 河南科技大学博士科研基金项目(09001445)

作者简介: 田耀武(1975-), 男, 河南许昌人, 副教授, 博士, 主要从事森林生态学方面的研究。E-mail: tianyaowu@126.com

* 通讯作者: 黄志霖(1966-), 男, 河南信阳人, 副研究员, 博士, 主要从事森林生态学方面的研究。E-mail: hzlin66@163.com

的平衡决定森林土壤碳储量^[3]。森林生态系统碳固定潜力及其维持机制、森林土壤系统碳存储过程及其稳定性变化机制研究的不深入性,导致了陆地生态系统碳汇潜力评估的不确定性^[4-5]。森林经营措施对土壤固碳潜力和持续固碳能力的影响研究没有一致性结论^[5]。科学计量中国森林碳储量、评估碳汇潜力及其动态,探讨森林经营管理措施对土壤碳储量的影响,是目前生态林业研究的热点之一。因此,综述森林生态系统土壤碳的研究成果,分析森林经营措施对土壤碳库储量的影响,以期为提高森林碳汇功能、科学经营管理森林提供理论基础。

1 气候变化对森林土壤碳库储量的影响

全球气温升高,森林初级生产力和土壤有机质(SOM)分解率将同时加速^[6],土壤碳储量的平衡将发生移动。森林土壤可能对气温变化的响应更为强烈^[7]。Rustad 等^[6]研究表明,温度升高,土壤呼吸增加,有机质分解量大于植被生产力的增加量,SOM 含量将降低,在寒冷地区这种趋势可能更加显著^[8];但也有研究认为,气候变暖,SOM 分解的主体成分是不稳定性碳^[9],在几十年内土壤有机碳储量的变化不大^[10]。Kirschbaum^[8]和 Powlson^[11]认为,

SOM 对气候变化响应的不一致可能是受 SOM 化学组分(性质)的影响^[12],土壤微生物生物过程受 SOM 性质、有效性、可获得性、湿度和温度等外界条件的影响,但与矿质土壤结合的稳定 SOM 受温度影响较小^[13]。在稳定态的 SOM 中,土壤微生物对气候变化适应性强,土壤呼吸温度敏感性降低^[14]。

森林土壤碳储量还随纬度的变化而变化。周国模等^[2]认为,中国不同纬度区域的森林土壤碳储量在森林总碳储量中所占的比重不同,在高纬度的北方森林中约占 84%,在中纬度的温带森林中约占 63%,在低纬度热带森林中约占 50%,即森林土壤碳储量在森林总碳库中所占的比重随着纬度的降低而降低。森林土壤平均碳密度也呈现类似的变化规律,以高纬度的北方森林土壤最大,中纬度的温带森林土壤次之,低纬度的热带森林最小。但表 1 显示,高纬度的北京妙峰山林场土壤碳密度为 3.78~7.85 kg/m²,而广东鹤山人工林土壤碳密度最高为 11.46 kg/m²,几乎为北京地区土壤碳密度的 2 倍。何友军等^[15]报道,湖南会同常绿阔叶林土壤碳密度更是高达 39.2 kg/m²,为北京地区妙峰山林场土壤碳密度的 10 倍,这表明,森林土壤碳含量不但在空间上有较大的分异性,而且不同学者的测定方法也具有较大的不确定性。

表 1 森林土壤碳含量或碳密度

研究地点	森林类型	分布深度/cm	碳含量/(g/kg)	碳密度/(kg/m ²)	文献	备注
北京市妙峰山林场	侧柏林	0~60	6.83	5.30	[16]	
	刺槐林	0~60	5.17	3.78		
	侧柏、油松	0~60	10.79	7.48		
	栓皮栎林	0~60	12.87	7.85		
陕西省乔北林业局	柴松针叶林	0~90		10.75	[17]	天然林分
陕西省千阳县城关镇庙岭村	侧柏人工幼林			4.15	[18]	土壤层、乔木层、灌草层和枯落物层的碳储量按公式分配
	刺槐人工幼林			4.36		
河北省木兰林管局	华北落叶松人工林	0~130		15.71	[19]	林龄和优势木平均高的土壤有机碳拟合方程
长江中上游	防护林	全土层		2.57	[20]	防护林
中南林学院树木园	樟树	0~100		14.69	[21]	樟树林
湖南会同	常绿阔叶林	0~20	39.2		[15]	地带性森林
	第 1 代杉木林	0~20	37.8			
	第 2 代杉木林	0~20	24.7			
长白山自然保护区北坡	阔叶红松林	0~100		14.61	[22]	原始林地
	白桦山杨	0~80		11.94		次生成熟林
	白桦山杨	0~81		12.58		次生幼林
广东鹤山	柠檬桉	0~100		10.56	[23]	人工林
	湿地松	0~100		10.46		
	马占相思	0~100		11.46		
江西兴国县	所有林分	0~20		2.47	[24]	林地总面积 2 260 km ²
		0~100		6.36		

2 林地土壤结构对森林土壤碳储量的影响

森林土壤结构与性质不但影响碳的固定速率,而且也影响已固定碳向稳定态碳的转化;土壤有机碳的固定过程也影响碳的稳定性。高湿、低温等抑制土壤呼吸的因素能加速碳的固定^[25]。黏土矿物活性表面大、氧化性高,矿物表面有机质易吸附形成束缚带,使碳在较短的时期内形成复杂化合物,稳定性就高^[26];土壤团聚过程也影响土壤碳的稳定,如土壤微团聚体内固定的 SOM 稳定性较高。SOM 的稳定性是 SOM 分子固有的对外界变化适应的结果。黏结于氧化物和胶体矿物表面的 SOM,使微生物难于接近^[27],稳定性高。肥沃的黏性土地上和地下部分凋落物产量高,能固定更多的碳。土壤金属离子更易形成有机物—金属—矿质复合物形态,SOM 更不易被分解。碳被稳定后,即使经历了土地利用方式和气候变化,SOM 的量和性质并不改变。如,俄国西伯利亚大草原尽管经历了农耕和全球气候变暖,但土壤碳的存贮量并没有变化^[28]。土壤碳的稳定性与植被生产力并不一定相关,Hagedorn 等^[26]通过¹³C 示踪试验表明,林木采伐后较低生产力的壤质土的新固定碳量可能比肥沃的高生产力砂土地高得多,这也充分表明土壤性质对碳的固定具有重要影响。

3 森林更新对土壤碳储量的影响

一般认为造林后土壤碳储量开始迅速下降,然后缓慢上升。温带地区土壤碳储量上升时间一般少于 1 a,热带地区时间会更长一些^[1]。与其他类型的生态系统相比,森林生态系统碳密度较高^[29]。毁林、造田和城市开发等人类活动使陆地碳库储量日益减少。森林砍伐后的农业垦殖使得在开始 20 a 内土壤的平均有机碳减少,导致大量的土壤有机碳损失。如果森林采伐后转化为牧场,则 5 a 内土壤碳含量将减少 20%;如果毁林种农作物,则 5 a 内土壤有机碳含量将减少 40%^[29]。森林更新或退耕还林后,地上部分生物碳量增加,同时土壤碳库碳量也得到补充,土壤系统碳输入和碳输出将达到一个新的平衡^[30],目前观测到的碳汇是过去碳损失的一个逆转,造林使全碳储量平均增加了 18%^[31]。最初碳的固定发生在森林地被层,地被层厚度和化学性质随树种的变化而不同^[27]。不同森林树种会造成地下碳分配比例、根系生长速率、根系生物量及枯落物

等诸多因子的差异,最终导致人工林土壤碳储量和碳排放量方面存在较大差异。

Huang 等^[32]对中国千烟洲人工林 1983—2004 年期间的植被和土壤碳通量进行了研究,认为植树造林在最初 7 a,土壤碳下降约 20%,之后呈上升趋势。植树造林最终将显著增加生态系统的碳贮量。刘畅^[33]测定的河北省塞罕坝机械林场羊草草甸草原碳密度(0~30 cm)为 0.30 kg/m²、樟子松人工林为 0.14 kg/m²、落叶松为 0.26 kg/m²;杨渺^[34]以农田为对照,研究几种具有不同经济价值的人工林模式(苦竹、苦竹+光皮桦木、光皮桦木、牛鞭草)的土壤碳汇特征,结果表明,造林 5 a 后,新营造的几种植被模式的碳含量都低于农田,均产生土壤碳的流失。程先富等^[24]认为,土壤 SOC 含量受母岩、植被和地形影响,坡向与 SOC 含量呈显著正相关关系,海拔与 SOC 含量呈极显著正相关关系。

林龄也影响土壤碳储量。造林初期土壤扰动大,土壤有机质矿化强,土壤微生物呼吸产生的碳损失与凋落物碳固定不平衡,土壤碳含量可能无变化甚至损失,土壤上层矿质土输入的碳抵消土壤下层已固定碳的损失^[35]。在南卡罗来纳(美国)火炬松林地试验中,生物量的 80% 发生了碳固定,一些发生在森林地被物,一小部分结束于矿质土中。Vesterdal 等^[35]研究认为,欧洲西北部人工林生态系统中土壤对碳固定的贡献约为 30%。碳的放射性同位元素分析和¹³C 示踪试验表明,凋落物碳被转移进矿质土中,但它仍然能保持不稳定性并能通过分解作用而损失掉^[26]。

造林后,林地土壤比地上部分生物量固定碳少且效率较低。砂质土林地土壤养分可利用性较低,不利于土壤微生物生物过程,土壤固定的 SOC 不稳定。Berger 等^[36]在对挪威云杉林和云杉阔叶混交林分贫瘠土壤的土壤存贮评估报告中认为,当土壤中铝离子储量较低时,碳储量与土壤铝离子浓度呈正相关,因为酸性土壤 SOM 的分解较慢。

造林前土地利用方式也影响造林后土壤碳的固定潜力。草地土壤上层碳存贮量较大,根密度较高,造林后土壤碳储量变化较小^[31]。Zerva 等^[37]研究认为,草地(新西兰)、耕地(西班牙)、泥炭地(英格兰)造林后土壤 SOC 损失量较大,碳储量减小,随后碳储量增加。相反,林地转为农田后,碳损耗量较大,但农地转为林地(退耕)后,碳固定潜力也较大。林地土壤碳固定速率比地上部分慢,农地造林后净碳固定花费时间较长,林地地被物转为 SOC 迅速,但转化后的 SOC 不稳定,易发生分解^[38]。

4 树种对土壤碳储量的影响

关于树种对碳储量影响的研究较少。热带森林生态系统在全球碳循环中起着核心作用,特别是在全球其他用地不断增加的情况下,陆地碳存储量下降,生物多样性遭到破坏。尽管热带森林生态系统作用重大,但是有关热带森林生物多样性及碳循环的研究文献较少,多数研究集中在温带森林生态系统中^[38]。树木多样性会促进树木生长并产生较大的树冠,降低土壤温度和增加土壤湿度;土壤环境的这一变化为土壤微生物提供良好的生态环境,土壤环境的变化主要作用于微生物的呼吸作用而不是土壤微生物的数量。旱季里,混交林树木生物量及生长显著高于纯林,而土壤呼吸情况恰恰相反,这与植物和微生物在旱季休眠有关。与阔叶树相比,浅根松柏科树种在森林地被物中固定 SOM 较多,在矿质土中很少进行碳的固定。相同生物量,高干材密度的阔叶树比低干材密度的树种能固定更多的碳。不同生态位物种相互补充,使混交林分生物量比纯林要高。

表 2 显示出欧洲树种土壤碳库的差异。松林土壤碳库量最低,而山毛榉林具有最高的土壤碳密度。物种生物量也代表生境条件,欧洲赤松生长在浅干土壤内,碳储量较低,山毛榉林土壤较为肥沃^[39]。

表 2 部分欧洲树种干材密度和土壤平均碳贮量

树种	干材密度/ (kg/m ³)	生物量碳/ (t/hm ²)	土壤碳/ (t/hm ²)	总碳量/ (t/hm ²)
欧洲赤松	490	60	62	122
挪威云杉	430	74	140	214
欧洲白冷杉	410	100	128	228
山毛榉	680	119	147	266
橡木	660	83	102	185

Vesterdal 等^[35]的研究表明,黑松、锡特卡云杉和挪威云杉比欧洲山毛榉和橡树具有较高的土壤碳储量,松下地被物比山毛榉具有更高的碳储量,松和云杉凋落物分解较慢,阔叶树分解较快。Berger 等^[36]研究表明,纯挪威云杉比云杉阔叶混交林分具有更高的土壤碳储量,认为在贫瘠土壤上云杉使土壤碳库增加程度比肥沃土壤上多。树种对矿质土的影响并不一致。云杉更替山毛榉林后碳从矿质土部分释放,云杉根系并没有穿透矿质土。根系深度与土壤碳相关,根生长越深越能有效地进行土壤碳的固定。模型模拟结果表明,花旗松和山毛榉林分的长期碳固定比挪威云杉林分要高。松林间植山毛榉后,山毛榉根系延伸到更深层的土壤中,使深层土壤

碳梯度发生了变化。松、山毛榉混交林分碳固定于更深层的矿质土壤,但碳能否被转化为稳定态碳有待进一步研究。但松林移栽山毛榉后土壤全碳储量的增加是比较低的。

总之,树种在较短时间内就能影响森林地被物碳储量。不同树种地下生物产量不同,树种影响到土壤稳定态碳的固定,但凋落物对土壤稳定态碳的影响程度并没有相关报道。

5 施肥对土壤碳储量的影响

氮肥对土壤碳库的影响依赖于土壤发育过程。氮肥刺激生物量,但对土壤碳库影响比较复杂。它刺激微生物分解 SOM,导致净碳土壤损失和氧化态氮的形成。地上生物碳固定的影响部分被 N₂O 产物抵消^[40]。土壤 C/N 比率下降,表明氮对土壤的持续影响比碳固定要强^[5,41]。氮肥能刺激林木的生长,使凋落物和根际沉积带增加向土壤输入碳量,氮的施用使林木生长量和 SOM 含量均增加。唐国勇等^[42]研究了施肥对干热河谷生态恢复区 4 年生印楝、新银合欢和大叶相思生长量及土壤碳氮含量的影响。结果表明,生态恢复区 SOC 比恢复前高 7.8%,施肥措施是生态恢复区 SOC 和总氮(TN)含量变异的主要原因。但有研究认为,氮的使用降低了根生物量^[43],氮肥增加了林木凋落物养分含量,刺激了土壤有机质的分解^[44]。相反研究认为,矿质氮的输入抑制了土壤微生物木质素降解酶活性,增加了其化学稳定性,延缓了下层凋落物和 SOM 的分解速率,即氮刺激新鲜凋落物的先期分解,但抑制后期腐殖质的分解。放射性¹³C 和示踪试验表明,氮增加了土壤中稳定性腐殖质含量,增加了土壤碳储量^[26]。Franklin 等^[45]研究表明,瑞典成熟松林 20 a 高氮量的施肥使森林地被碳库增加 2 倍(5~9 t/hm²)。森林施肥导致大量土壤碳的固定,但是,这是特定地点的研究结果,并非一般性结论^[46-48]。

6 问题与展望

森林经营管理措施对土壤碳固定与转化有一定的影响。森林生态系统较高碳固定速率的前提是具有较高地上地下凋落物量,这些凋落物参与碳循环。碳的固定依赖于主伐或间伐过程中土壤扰动程度,以及林分结构抗受损的稳定性程度。碳固定有 2 个重要因素,一是森林生态系统中通过凋落物形式输入的碳的数量和性质,二是 SOM 进行的分解作用。

土壤性质影响 SOM 稳定性。稳定的土壤碳库构成需要几十年或更长时间。最优的森林经营管理

措施首先要有较高的生产量,尽量避免土壤扰动,减少碳的输出。森林管理直接影响碳向土壤的输移量。有机矿质复合物是碳土壤固定过程中的重要成分,避免土壤扰动对稳定的有机矿质复合物的形成极其重要。

森林土壤的碳汇作用有相当大的潜力,然而,此方面的研究还存在许多不确定性。关于森林生态系统碳汇时空分布和源汇存储率变化机制还不清楚,特别是通过森林土壤碳汇能否精准估算全球 CO₂ “失汇”问题。对森林土壤碳源汇潜力及其持久性的认识尚不清楚,所以迫切需要大量不同森林类型土壤有机碳实测数据以及对土壤有机碳测定方法和动态综合模型的改进,以期对森林土壤碳动态做出准确评价。

参考文献:

- [1] 史军,刘纪远,高志强,等.造林对土壤碳储量影响的研究[J].生态学报,2005,24(4): 410-416.
- [2] 周国模,刘恩斌,余光辉.森林土壤碳库研究方法进展[J].浙江林学院学报,2006,23(2): 207-216.
- [3] 刘国华,傅伯杰,方精云.中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J].生态学报,2000,20(5): 733-740.
- [4] 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.
- [5] 李正,许鸿源,李界秋,等.化学农药对土壤碳氮平衡的影响[J].现代农业科技,2009(3): 121-122.
- [6] Rustad L, Campbell J, Marion G, *et al.* A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming[J]. *Oecologia*, 2001, 126(4): 543-562.
- [7] 杨玉盛,陈光水,王小国,等.皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响[J].土壤学报,2005,42(4): 584-590.
- [8] Kirschbaum M U. Soil respiration under prolonged soil warming: Are rate reductions caused by acclimation or substrate loss[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(11): 1870-1877.
- [9] Melillo J, Steudler P, Aber J, *et al.* Soil warming and carbon-cycle. Feedbacks to the climate system[J]. *Science*, 2002, 298: 2173-2176.
- [10] 周莉,李保国,周广胜.土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J].地球科学进展,2005,20(1): 99-104.
- [11] Powlson D. Will soil amplify climate change[J]. *Nature*, 2005, 433: 204-205.
- [12] Liski J, Nissinen A, Erhard M, *et al.* Climate effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 575-584.
- [13] Hobbie S E, Schimel J P, Trumbore S, *et al.* Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils[J]. *Global Change Biology*, 2000, 6(1): 196-210.
- [14] Luo Y, Wan S, Hui D, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413: 622-625.
- [15] 何友军,王清奎,汪思龙,等.杉木人工林土壤微生物生物量碳氮特征及其与土壤养分的关系[J].应用生态学报,2006,17(12): 2292-2296.
- [16] 梁启鹏,余新晓,庞卓,等.不同林分土壤有机碳密度研究[J].生态环境学报,2010,19(4): 889-893.
- [17] 杨晓梅,程积民,孟蕾.黄土高原天然柴松林碳储量与碳密度特征[J].中国水土保持科学,2010,8(2): 41-45.
- [18] 王蕾,张景群,王晓芳,等.黄土高原两种人工林幼林生态系统碳汇能力评价[J].东北林业大学学报,2010,38(7): 75-78.
- [19] 杜红梅,王超,高红真.华北落叶松人工林碳汇功能的研究[J].中国生态农业学报,2009,17(4): 756-759.
- [20] 张林,王礼茂,王睿博.长江中上游防护林体系森林植被碳贮量及固碳潜力估算[J].长江流域资源与环境,2009,18(2): 111-115.
- [21] 雷丕锋,项文化,田大伦,等.樟树人工林生态系统碳素贮量与分布研究[J].生态学报,2004,23(4): 25-30.
- [22] 杨丽韞,罗天祥,吴松涛.长白山原始阔叶红松林不同演替阶段地下生物量与碳、氮贮量的比较[J].应用生态学报,2005,16(7): 1195-1199.
- [23] 李跃林,胡成志,张云,等.几种人工林土壤碳储量研究[J].福建林业科技,2004,31(4): 4-7.
- [24] 程先富,史学正,于东升,等.兴国县森林土壤有机碳库及其与环境因子的关系[J].地理研究,2004,23(2): 211-217.
- [25] 骆士寿,陈步峰,李意德,等.海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究[J].生态学报,2001,21(12): 2013-2017.
- [26] Hagedorn F, Spinnler D, Bundt M, *et al.* The input and fate of new C in two forest soils under elevated CO₂[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(6): 862-872.
- [27] Six J, Conant R T, Paul E A, *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [28] Torn M S, Lapenis A G, Timofeev A, *et al.* Organic carbon and carbon isotopes in modern and 100-year-old-soil archives of the Russian steppe[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(10): 941-953.

- [29] 赵鑫,宇万太,李建东,等.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.
- [30] 闫美芳,张新时,江源,等.主要管理措施对人工林土壤碳的影响[J].生态学报,2010,29(11):2265-2271.
- [31] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis[J]. Global Change Biology, 2002,8(4): 345-360.
- [32] Huang M, Ji J J, Li K R. The ecosystem carbon accumulation after conversion of grasslands to pine plantations in subtropical red soil of South China[J]. Tellus B, 2007,59(3): 439-448.
- [33] 刘畅.河北塞罕坝草甸草原和樟子松、落叶松人工林土壤可溶性有机碳的初步研究——兼论草地造林对土壤有机碳的影响[D].北京:北京大学,2008.
- [34] 杨渺.退耕地土壤有机碳库特征及碳周转相关因子对植被恢复模式的响应[D].雅安:四川农业大学,2008.
- [35] Vesterdal L, Raulund-Rasmussen K. Forest floor chemistry under seven tree species along a soil fertility gradient[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1998,28(11): 1636-1647.
- [36] Berger T, Neubauer C, Glatzel G. Factors controlling soil carbon and nitrogen stores in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 159(1): 3-14.
- [37] Zerva A, Ball T, Smith K A, et al. Soil carbon dynamics in a Sitka spruce [(*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.)] chronosequence on a peaty gley[J]. Forest Ecology and Management, 2005,205(3): 227-240.
- [38] 刘世荣,王晖,栾军伟.中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J].生态学报,2011,31(19): 5437-5448.
- [39] Callesen I, Liski J, Raulund-Rasmussen K, et al. Soil carbon stores in Nordic well-drained forest soils relationships with climate and texture class[J]. Global Change Biology, 2003,9(3): 358-370.
- [40] 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): 48-53.
- [41] 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,2000,37(6):3-7.
- [42] 唐国勇,李昆,张昌顺.施肥对干热河谷生态恢复区林木生长及土壤碳氮含量的影响[J].水土保持学报,2009,23(4):60-64.
- [43] 秦胜金,张玉树,胡晓霞,等.不同利用方式下土壤对磷的吸附-解吸特征[J].现代农业科技,2011(24): 285-287.
- [44] Paul K, Polglase P, Nyakuengama J, et al. Change in soil carbon following afforestation[J]. Forest Ecology and Management, 2002,168(3):241-257.
- [45] Franklin O, Höglberg P, Ekblad A, et al. Pine forest floor carbon and accumulation in response to N and P, K additions: Bomb ^{14}C modelling and respiration studies[J]. Ecosystems, 2003,6(7):644-658.
- [46] Chen W, Chen J M, Price D T, et al. Carbon offset potentials of four alternative forest management strategies in Canada: A simulation study[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2000,5(2): 143-169.
- [47] 徐新良,曹明奎,李克让.中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J].地理科学进展,2007,26(6):1-10.
- [48] 张剑,汪思龙,王清奎,等.不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化[J].中国生态农业学报,2009,17(1):41-47.