

人工林经营与全球变化减缓

冯瑞芳,杨万勤*,张 健

(四川农业大学林学院园艺学院,四川 雅安 625014)

摘要:以全球变暖和大气 CO₂ 浓度增加为主要特征的全球气候变化正在改变着陆地生态系统的结构和功能,威胁着人类的生存与健康,因而受到世界各国政府和科学家的普遍关注。森林,特别是森林土壤在全球碳循环中扮演着碳源、汇、库的角色,但其受到气候、森林类型和土地利用与覆被变化等自然和人为因素的综合调控。人工林的碳汇作用被认为是减缓全球变化的一种可能机制和最有可能的选择而成为全球变化减缓研究的核心内容。人工林土壤的碳汇功能受到经营水平的调控,同时还受到全球变暖的反馈作用。因此,人工林土壤碳汇形成机制及调控技术、基于增强土壤碳汇功能增强的人工林经营与管理技术、人工林生态系统的碳通量以及人工林碳汇与碳贸易等是未来全球变化和林业生态工程研究的重点内容。

关键词:人工林;全球变化减缓;碳汇/源

文章编号:1000-0933(2006)11-3870-08 **中图分类号:**Q945.11;Q948.1;S718.5 **文献标识码:**A

Artificial forest management for global change mitigation

FENG Rui-Fang, YANG Wan-Qin*, ZHANG Jian (Faculty of Forestry & Horticulture, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3870~3877.

Abstract: Global change has been concerned about worldwide because climate change characterized by global warming and atmospheric CO₂ enrichment is changing the structure and function of terrestrial ecosystem, and in turn threatening the human existence and health. Therefore, global change mitigation is one of the most essential scientific issues in climate change researches. As an important source, sink, and pool in global carbon cycle, forest plays an important role in mitigating global change. Soil carbon sequestration, storage and emission varied greatly with latitude, altitude, forest types, land use and cover change (LUCC) and forest management. Forest soil will become a gigantic carbon source of atmospheric CO₂ when the forest was transformed into grassland or cropland. This implies that the functions of forest soil as carbon pool and sink increase, the function as carbon source decrease by improving the structure and function of forest ecosystem, and forest plantation increase the carbon stock and sink in terrestrial ecosystem. Consequently, soil carbon sequestration has led to a widespread interest in the role of forest soil carbon sink enhancement in global change mitigation, and more and more attentions were paid to the potential of soil carbon sequestration in forest plantation recently.

Soil carbon sequestration by artificial forest has been considered as a "truly win-win strategy" and the most promising choice to decrease the rate of enrichment of atmospheric concentration of carbon dioxide by Lal, a famous soil scientist. Therefore, soil carbon sequestration potential of artificial forest is a key scientific issue of global change mitigation. However, soil carbon sequestration potential depends greatly on artificial forest management. Firstly, land use history determines the SOC stock and source in the early stage of artificial forest due to the differences of soil substrates. The soil with higher SOC stock maybe becomes

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30471378);四川省重大应用基础研究计划资助项目

收稿日期:2006-01-04;**修订日期:**2006-09-20

作者简介:冯瑞芳(1982~),女,山西人,硕士,主要从事土壤生态与全球变化研究。E-mail: yanerfei411@163.com

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangwq@cib.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30471378) and Key Project of Applied & Basic Research of Sichuan

Received date: 2006-01-04; **Accepted date:** 2006-09-20

Biography: FENG Rui-Fang, Master, mainly engaged in soil ecology and global change.

a carbon source when establishing artificial forest. Secondly, the tree species composition in artificial forest influences the carbon storage and the potential for carbon sequestration by controlling litter the quantity, chemical composition, organic carbon input, and by regulating microclimate and soil microbial activity. Artificial forest with well structure may enhance the potential of soil carbon sequestration and increase the carbon stocks in soil. Thirdly, site preparation is an important perturbation that can affect soil carbon stock and carbon source for a long period after the event due to changes in soil structure. A careful site preparation can enhance greatly soil carbon stock by increasing organic matter inputs. Harvesting can decrease sharply soil carbon stock mainly resulting from decreasing the organic carbon input and altering soil water and temperature regimes that accelerate decomposition rate of organic matter. The effect of fertilization on soil carbon sink and source remains uncertain. The results about the responses of soil carbon sequestration to global warming and atmospheric CO₂ enrichment are still uncertain due to the simultaneous increases of organic carbon input by litter and output by microbial respiration. Atmospheric CO₂ enrichment may increase the soil carbon sink and pool through the positive impact on NPP because of CO₂ fertilization. However, the increment effect by CO₂ fertilization will be counteracted by negative effects related to global warming. Briefly, there remains to be uncertainty about the responses of forest soil carbon sink to global change.

As described above, it is doubtless that artificial forest, especially forest soil, acts as an important carbon sink and pool in global change, increase the terrestrial carbon sink, and mitigate global change although the changes of soil carbon sequestration still remain uncertain. Therefore, it is very important to deeply study soil carbon sequestration potential in artificial forest and its role in mitigating global change in the future. Based on the ecological significance of artificial forest soil and the uncertainty in global change effects, further studies for global change mitigation and adaptation should pay more attention to the following fields: (1) to clarify the formation mechanism of soil carbon sink and its enhancement technologies, (2) to enhance the carbon sequestration potential and carbon stock through improving the forest management level, which is an important strategy to mitigate global change, (3) to conduct an intensive study of carbon flux among atmosphere, vegetation and soil in man-made forest, and (4) to develop the strategies suitable for carbon trade of soil carbon sequestration by artificial forest.

Key words: artificial forest; globe change mitigation; carbon source/sink

以全球变暖和大气 CO₂ 浓度升高为主要特征的全球变化正改变着陆地生态系统的结构和功能,威胁着人类的生存与健康,因而受到世界各国政府和科学家的普遍关注^[1~4]。由于全球正在变暖的事实已不容置疑^[4],全球变化减缓与适应将继续成为全球变化研究的焦点。中国已成为世界上第二大温室气体排放国,2020 年可能成为世界上第一大温室气体排放国,如果不能有效解决《京都议定书》(Kyoto Protocol)中有关碳减排与增汇的科技问题,在未来的全球环境履约谈判中将可能陷入很被动的局面。可见,碳减排与增汇是我国政府和科学家必须面对的、不可回避的重大生态与环境科技问题。

通过植树造林和人工林经营等增强陆地碳汇功能是清洁发展机制(Clean development mechanism, CDM)中最主要的途径之一,其对于减缓全球变暖具有重要意义。目前有关人工林经营及其在全球碳循环中的作用和地位的研究较多^[2, 5~8],但很难见到反映该方面的综述报道。因此,本文就国内外相关研究进展及其存在的问题进行了探讨,以期能为将来的研究提供科学依据。

1 森林植被和土壤的碳汇、库、源功能

森林植被和土壤在全球碳循环中扮演着汇(sink)、库(pool)、源(source)的角色,具有不可替代的作用和地位^[9]。尽管全球森林总面积仅占陆地面积的 30%,但森林植被的碳库约占植被碳库总量的 86%^[10],而且森林植被的碳固定能力和碳密度也远高于草地和农田^[11, 12]。IPCC(2000)的报告指出,森林光合和呼吸作用与大气之间的年碳交换量高达陆地生态系统总量的 90%。森林植被每年从大气中吸收 120 GtC,其中植物呼吸返回大气约 60 GtC^[10]。可见,森林植被也是全球碳循环的重要的源。

森林植被固定的 CO₂ 中,大约 50%通过地上/地下凋落物进入土壤,成为较为稳定的 SOC 库,使森林土壤成为全球碳循环中的一个巨大碳汇^[7~9]。全球森林土壤碳贮量约为 784.3 GtC,占全球土壤碳库(2011 GtC)的

39 %^[6~8]。如果将根系的碳储量计算在内,森林土壤碳储量将占全球土壤碳库的 50 %左右,使森林土壤成为全球碳循环中十分重要的碳库^[9]。同时,土壤有机物质通过微生物和动物呼吸作用分解返回 50 GtC,干扰返回约 9 GtC,使森林土壤成为全球碳循环中的碳源^[6~8]。这意味着,森林土壤是全球碳循环中相当重要的碳汇、库、源,土壤有机碳库的轻微变化将直接影响大气 CO₂ 浓度^[6~8, 13~16]。

2 影响森林土壤碳源、汇、库功能的因素

气候、植被、土地利用与覆被变化(Land use and coverage change, LUCC)等自然和人为因素通过对植物光合固定和生产力以及输入到土壤生态系统中的有机物质的质量和数量的影响而控制着 SOC 的积累和分解速率,调控着土壤碳源、汇、库功能和动态^[9]。

2.1 气候控制着森林土壤碳汇、库、源功能的总体格局 由经纬度和海拔控制的气温、光照、降水等气候特征通过对林冠光合固碳能力和生产力的影响直接控制着森林植被地上部分的碳源、汇、库功能。森林植被通过地上部分的凋落物和根系凋落物向土壤中输入有机碳,使土壤成为一个巨大的有机碳汇。随着温度、光照强度和降水量增加,森林的光合固碳能力越强,森林生产力越高,植被碳汇功能越强^[8, 17],而且森林通过地上部分和根系凋落物输入到土壤中的有机碳将增加,土壤碳汇和碳库的作用越显著。例如,热带、温带和北方森林土壤的碳密度分别为 122、122 tC hm⁻² 和 296 tC hm⁻²^[17],土壤与植被碳密度的比值分别为 0.8、1.3 和 5.6,土壤与植被碳储量的比值分别为 0.9~1.2、1.2~3 和 3~17^[8]。但森林土壤的碳汇、库、源动态还受到土壤温度和湿度控制的微生物活性的影响。如果森林土壤的温湿度较高,土壤微生物活性较高,对 SOC 的分解较强,土壤碳源增强,土壤碳库储量和碳汇功能降低^[8, 17]。可见,气候是控制森林土壤碳汇、库、源分布格局的最为重要的因素,通过对人工林结构和功能以及土壤温湿度的调控,将有可能减少碳的排放和促进碳汇增加。

2.2 森林植被类型影响着土壤有机碳库储量和质量 森林植被类型主要通过 3 种机制控制 SOC 的储量和质量。首先,森林类型不同,光合固碳能力和生产力不同, SOC 输入量不同;其次,凋落物输入到土壤中的有机物质的质量因林型而异,从而影响到土壤微生物的活性,最终对土壤碳源和碳库产生显著影响。当凋落物的 C/N 比、木质素/N 比较高时,土壤微生物活性相对较低,通过土壤呼吸释放到大气中的 CO₂ 较少,土壤矿化作用较弱, SOC 累积明显。相反,如果 C/N 比、木质素/N 较低时,微生物活性相对较高,土壤矿化作用较强,通过土壤呼吸释放到大气中的 CO₂ 量较大, SOC 的累积速率较慢;第三,森林植物群落的结构不同,林下的微气候差异较大,从而影响到土壤微生物活性,对 SOC 的累积产生较大影响^[18]。可见,通过对森林生态系统结构和功能的调控将可能增加 SOC 固定和储量,减少碳排放。

2.3 LUCC 显著改变森林土壤的碳源、汇、库功能 LUCC 主要通过改变土壤结构、水热动态和土壤有机物质含量影响 SOC 的分解和积累速率,从而对土壤碳储量和碳流产生显著影响^[19]。土地利用过程是一个通过人类活动将自然生态系统转变为人工生态系统的过程,不合理的土地利用可使森林土壤变成大的碳源,增加大气 CO₂ 浓度,加剧全球气候变化。例如,森林被改造为农田之后, SOC 的来源减少、土壤微生物活性升高、土壤碳的释放量增加,使土壤碳库储量和碳汇功能降低,土壤成为一个巨大的碳源^[8]。LUCC 导致的土壤碳库损失占碳库总量的 20 %~50 %^[20~22],每年因砍伐热带雨林引起的土壤碳汇损失约 1.5~1.7 PgC,高于陆地植被年净碳吸收量(1 PgC)^[10],而构建人工林等合理的土地利用方式可增加土壤 SOC 储量^[23, 24]。可见, LUCC 可显著影响森林土壤 SOC 储量,通过构建合理的人工林生态系统可增强陆地碳汇功能,减缓全球变化。

3 人工林对减缓全球变化具有重要作用

联合国粮农组织(FAO)2006 年公布的《2005 年世界森林资源评估报告》指出,2005 年世界森林面积为 40 亿 hm²,占全球陆地面积的 30 %。其中,天然林和天然次生林面积为 38.6 亿 hm²,占全球森林面积的 96.2 %,人工林为 1.4 亿 hm²,占 3.8 %^[13]。由于人工林经营能够转变土地的退化过程,增强对大气 CO₂ 的吸收,已成为减缓全球变化的一项有效措施^[25~30],Lal 将提高人工林的经营和管理水平、增强人工林土壤碳汇功能称之为一种“双赢策略(Truly win-win strategy)”和“减缓全球变化的一种可能机制和最有希望的选择”^[8]。目前,许多欧美国家正在将大面积的弃耕农地恢复成森林植被^[27~30]。中国及一些发展中国家也在大力开展植树造

林,这不仅增加了全球森林面积,而且增强了森林的碳汇功能^[31]。20 世纪 70 年代以来,我国人工林面积不断增加,年造林面积超过 100 万 hm^2 ,正在形成三北防护林、长江中上游防护林和沿海防护林、太行山绿化工程和平原绿化工程等五大防护林体系以及用材和防护林、南方速生林、特种林和果树生产等四大基地,这些林业生态工程项目建设已形成了森林资源总面积和总蓄积量双增的格局,森林碳储量明显递增,人工林碳汇对中国陆地碳汇增强的贡献率高达 39 %^[1~3, 31~33]。因此,就全球范围而言,扩大人工林面积,提高人工林的经营和管理水平,将可能显著增强陆地生态系统的碳汇功能,减缓全球变化。

人工林通过各种途径来增强森林的碳汇功能。首先,植树造林增加了森林植被的覆盖面积,并通过光合固定将大气中的碳吸收储存起来,增加了地上部分的碳储量,增强了生态系统的碳汇功能^[25]。其次,人工林与草地或农田相比,林地表面可以积累更多的凋落物,可以部分抵消地表碳的损失,对土壤-大气系统的 CO_2 平衡发挥重要作用。此外,人工林土壤碳库也因其具有较大的库容量,且土壤碳周转速率慢,受各种干扰影响小,能维持较长时期的碳储藏^[27],从而对人工林生态系统的碳汇功能产生重要影响。Galdo 等^[34]对意大利东北部传统农田、造林地和永久草地土壤碳动态的研究表明,造林促进了 SOC 的固定,促进有机碳与微团聚体和粘土结合,提高了受物理保护的土壤有机物质组分中碳的稳定性。由于 SOC 主要以腐殖质形式存在,并受到物理保护,因而比活的生物量临时吸收的 CO_2 更为持久。此外,人工林还通过将森林生物量作为能源来替代矿物燃料,或作为原材料来替代钢铁、水泥、铝材等能源密集型产品,从而减少温室气体的排放^[30]。可见,人工林及其林下的土壤对于减缓全球变化具有十分重要的作用。

4 人工林经营对森林碳汇功能的影响

土地利用历史、树种组成、人工林的群落结构、整地、采伐和施肥等人工林经营和管理水平可能通过对林木生产力、土壤碳循环等的影响而对土壤有机碳固定、储存和排放产生不同程度的影响^[6~8, 35, 36],从而影响人工林植被和土壤在减缓全球变化中的效应。

4.1 土地利用历史 土地利用历史(人工林地上原先生长的植物物种、耕作制度、植物残留物和化肥的施用等)通过对光合固定作用和土壤 C、N 代谢作用的影响而对人工林碳汇产生较大的影响,尤其是对土壤不稳定有机碳储量具有显著的作用^[6]。这是因为土地利用历史在很大程度上决定着人工林经营初期土壤的碳含量、分布和分解模式,最终会影响到造林后人工林生态系统的碳动态。Guo 等^[37]对全球 74 篇关于土地利用变化对森林碳储量影响的文献进行分析后发现,从草地到人工林的土地利用转变,土壤碳储量下降 10 %,而从农田到人工林的土地利用转变,土壤碳储量增加 18 %。Laclau 等^[38]对南美 14 年生人工松林与当地牧草地进行比较,发现牧草地转化为松树人工林能极大地增加生物量碳库($52.3 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2}$),是草地的 20 倍。因此,土地利用历史是影响人工林碳汇功能的一个重要因素。

4.2 树种组成 人工林的树种组成不同,冠层的光合固定能力不同,引起凋落物的种类、产量和质量也不同,从而对人工林生态系统碳汇和碳源功能产生不同影响。例如,瑞典中部挪威云杉林每年的固碳量为 $70 \sim 220 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,俄罗斯西伯利亚东部边界 200 年生的欧洲赤松林年固碳量为 $440 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,意大利中部人工山毛榉林为每年 $450 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[39]。Xu 等^[40]研究表明,种植竹子(*Phyllostachys pubescens*)使 SOC、易氧化 SOC、可溶性 SOC 都有所增长,不仅增强了碳固定,而且加速了土壤碳循环,提高了营养元素和微生物的活性。另外,同一树种处于不同气候带,固碳量不同。例如,美国马萨诸塞州、缅甸和日本中部的落叶混交林的年固碳量分别为 $140 \sim 280 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $290 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $128 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[41]。因此,根据当地的气候和土壤条件,选择光合固定能力较强的树种构建人工林对于提高人工林的碳汇功能具有重要的作用。

4.3 人工林结构 人工林的结构决定了人工林群落的冠层结构、叶面积指数以及植物种类对资源的竞争格局等。人工林结构的不同会引起群落物种组成的不同,并通过植物本身的呼吸、土壤微生物的活动、凋落物的质量及分解速率等许多功能过程变化,最终引致人工林生态系统碳汇功能的改变^[9]。Li 等对子午岭植被自然恢复过程中 SOC 密度的研究表明,随着人工林结构的变化, SOC 固定和储量发生显著变化^[42]。Guo 等的研究表明,杉木林和常绿阔叶林的土壤碳库存在很大的差异,改善杉木林的结构显著增加了 SOC 储量^[43]。因此,

结构合理的人工林生态系统可极大地增强森林的碳汇功能,缓解全球变化。但人工林生态系统的构建必须根据顶极气候学说等生态学原理。

4.4 采伐 森林采伐改变了人工林的结构和土壤水热条件,引起有机物质分解速率、土壤呼吸速率及根系分布的变化,而且裸露的土壤会加剧土壤的侵蚀和 SOC 的淋溶作用,进而影响到林地土壤碳源、汇功能^[39~44]。著名的“Covington Curve”表明,在森林收获后的 20a 内 SOC 储量将会急剧下降近 50 %^[45],且需经 20~50a 才可使土壤碳含量增加^[46,47]。这是因为采伐降低了土壤有机物质的输入,促进了 SOC 的矿化,增加了可溶性有机碳的淋溶,从而导致 SOC 库的降低^[48]。森林采伐后土壤呼吸所释放的碳高于幼树固定的碳,影响了森林的固碳能力,至少在短时期内会引起碳库的缩小^[8]。但也有一些研究表明,采伐后的几年内森林植被的碳库会增加^[49,50],原因是在适当的采伐强度下,如果在采伐时能给予很好的保护措施,采伐后大量的林地残留物质将有可能弥补有机物质输入量的减少,缓解森林收获引起的自然生态过程失调和 SOC 库的减小^[48,51]。可见,作为一种重要的人工林经营与管理技术,采伐可能对土壤碳汇产生不同的影响,合理的采伐技术是保护和增强土壤碳汇的重要措施。

4.5 整地 整地通过减小土壤的紧实度,改善土壤的物理结构,增强了下层土壤的疏松度。而下层土壤更有益于种子的生长和活力的保持,提高种苗成活率。同时,整地可提高根际土壤的含水量,良好的土壤排水状况能够促进树木的生长,增强林地的碳汇功能。Zou 等^[52]发现,辐射松(*Pinus radiata*)的根系生长与土壤的物理性状参数间有很大的相关性。因此,旨在增强土壤质量的整地措施对增强人工林的碳汇功能至关重要。

4.6 施肥 施肥是人工林经营与管理中广泛应用的一项措施。许多森林生态系统受 N 限制,增加 N 输入能够增强 NPP 和 SOC 的储量,但也可能通过对凋落物和土壤 C/N 比的改变而促进了土壤呼吸排放,降低土壤有机碳固定和储量。Parker 等^[53]的研究表明,施 N 显著降低了林地凋落物的 C/N 比(从 30.6 至 23.4),林地凋落物和土壤的 C、N 储量均低于对照。另外,有机污泥(Biosolids)的应用为林地土壤的碳吸收提供了另一个有效的途径。Harrison 等^[54]对美国华盛顿大学的一块林地施肥后表明,有机污泥的应用能够增加地下 45cm 深处的 SOC 含量和储量。林地施肥有可能对土壤碳汇产生不同的影响,适当的施肥技术可能增强人工林土壤碳汇功能。

可见,结合林地的自然环境条件,采取合理的人工林经营与管理措施关乎人工林生态系统能否发挥对大气 CO₂ 吸收与固定的碳汇效应。

5 人工林对全球变化的响应

5.1 林木生理对全球变化的响应 林木生理对全球变化的响应是过去 20 多年中全球变化研究的重点之一,并且主要集中在林木对大气 CO₂ 浓度增加的生理响应方面^[55~58]。有研究表明,在水分供应和湿度正常的情况下,当大气 CO₂ 浓度为 400~700 mmol mol⁻¹ 时,苗木的光合速率升高,干重、直径和高度都有所增加,但如果 CO₂ 浓度继续增加时,CO₂ 的施肥作用消失,甚至有所下降^[66]。还有研究表明,大气 CO₂ 浓度增加可促进 C₃ 植物的生长,增加 C₃ 植物的生物量,而对 C₄ 植物没显著影响^[57],即具有不同代谢途径的树种对全球变化重要环境因子的敏感度不同。此外,CO₂ 浓度增加可使林木的分枝加多,叶面积加大,叶子变厚,从而降低对 CO₂ 和水的传导率,使水分的利用效率增加^[57,58]。但 Walker 等的研究表明,至今大多数的田间 CO₂ 浓度增加实验并没有发现森林植被在高 CO₂ 浓度下会降低水分损失^[29]。这可能是由于伴随大气 CO₂ 浓度增加的是全球变暖,全球变暖虽然促进了植物生长发育,但改变了水分平衡。因此,林木生长对全球变化响应的研究结果还具有很大的不确定性,深入研究林木生理对全球变化的响应与适应机制是提高人工林经营与管理水平的重要依据,亟待深入研究。

5.2 人工林的物种组成和群落结构对全球变化的响应 每个物种具有其独特的生长型、生活型及生态型,因而对全球变化的响应与适应也各不相同。蒋高明等^[59]的研究表明,不同的物种对高温的适应性不同。沙地灌木杨柴和油蒿(*Artemisia ordosica* Kraschen)比沙柳(*Salix cheilophila* Schneid)在高温下具有较高的光合速率,而且沙柳的光系统 II 在高温受到了严重的抑制,杨柴和油蒿则未受到影响,表明深根系杨柴和油蒿比插条栽

植的沙柳更适于在高温干旱的环境下生长。肖春旺等^[60]研究表明,增温对柠条幼苗生长影响不显著,而对油蒿幼苗生长影响显著,表明物种之间存在对环境变化适应的差异性。

人工林群落结构对全球变化的响应体现在多个方面。首先,全球变化通过对物种组成和人工林群落竞争的影响,引起群落结构和功能的变化。在全球变化背景下,群落内光环境可能发生改变,到达森林下层的光比例增多,林下植物对光资源竞争出现新的格局,非耐荫树种幼苗会借此机会迅速生长,进而改变人工林的群落结构^[61]。其次,以 CO_2 浓度升高为主要特征的全球气候变化还会改变群落内种群的大小。特别是缩小优势种群大小和从属种群大小之间的差异,进而改变群落内物种对光、热、水、肥等资源的竞争关系^[62],最终导致人工林群落结构和功能的变化^[63],影响人工林生态系统作为碳汇的潜力。此外,全球变化可以通过改变植物的死亡率以及随后的幼苗生长而影响人工林群落结构的变化。

因此,对人工林物种组成与群落结构对全球变化响应机理的深入研究,有助于较准确地预测人工林生态系统对以大气 CO_2 浓度增加为主要特征的全球气候变化的响应。

5.3 人工林土壤生态系统对全球变化的响应 人工林土壤有机碳固定对减缓气候变化具有重要作用^[7, 64],但全球变化也可能显著影响土壤生态系统的结构和功能。在全球变化背景下,植被的生长速度加快,促使光合产物流向根系,使土壤有机质增多,从而增强土壤碳汇功能,促进土壤矿质化过程和植物根系对水分的吸收^[65~68]。例如,Dilustro 等^[69]的研究表明,随着 CO_2 浓度的增高,细根的产量增加,即潜在的土壤碳输入率增加。但有研究表明,升高 CO_2 浓度后土壤碳汇并没有增加,这可能与温度的变化有关。Melillo 等^[64]发现土壤变暖加速了有机物质的分解以及 CO_2 向大气的释放。这可能是由于大气 CO_2 浓度上升所引起的温度升高加强了有机物的分解作用,提高了土壤生态系统的呼吸量,促进土壤碳排放,进而降低了土壤碳储量^[70~72]。可见,全球变化,尤其是全球变暖对人工林土壤碳汇和碳库功能具有显著的影响,但研究结果还具有不确定性。

6 问题与展望

6.1 深入研究人工林土壤的碳汇形成机制及其调控技术 由于人工林地上部分的碳固定能力较高,过去的研究更加注重了植被的固碳功能,对土壤有机碳固定的研究远远不够^[6~8]。由于人工林土壤有机碳的固定、储存和排放受到包括气候、土地利用历史、树种组成和群落结构、土壤理化性质、人类活动干扰等许多生物和非生物因素的控制^[9],因而揭示人工林土壤的碳汇形成机制,将有助于探讨人工林土壤碳汇、库、源的调控技术,提高人工林经营与管理的水平,增强人工林生态系统的碳汇功能。

6.2 进一步提高人工林的经营和管理水平,增强土壤碳汇/库功能 由于人工林被认为是减缓全球变化的最有效途径,因而人工林经营与管理成为当前全球变化减缓研究中的热点之一。但由于人工林普遍存在树种单一、结构和功能较差、病虫害频繁发生等特点,因而植被和土壤碳固定潜力亟待提高,同时也意味着人工林还具有很大的碳汇增强空间。因此,在未来的研究中应进一步加强人工林生态系统经营与管理的研究,增强人工林植被和土壤碳汇/库功能。

6.3 深入研究人工林生态系统的碳通量 陆地生态系统碳通量研究是研究陆地生态系统碳汇/源动态及其调控对策的重要研究平台。目前,欧美国家正在实施陆地生态系统碳通量测定计划(EuroFlux 和 AmeriFlux)^[73],中国科学家在“973”项目和国家自然科学基金项目等的支持下,正在积极开展中国陆地生态系统碳通量研究(ChinaFLUX)^[1, 2]。这些研究对于揭示“碳失汇”之谜和积极应对全球变化具有十分重要的意义。但已有的碳通量主要采用生物量-蓄积量模型法、微气象学的涡度相关技术和箱式/气相色谱以及 3S 技术,由于生态系统水平的碳通量测定的精确性和统一性不够,研究结果还具有很大的不确定性;已有的碳通量研究网络对于人工林生态系统的碳通量研究不够重视,对人工林在碳增汇方面的贡献估算还不够。作为世界上人工林面积最大的国家之一,加强中国人工林生态系统的碳通量研究不仅是林业生态工程理论和实践的需要,更是我国在国际环境履约表达国家立场和维护国家利益的战略需求。

6.4 人工林碳汇与碳贸易 发展中国家以植树造林方式与发达国家进行碳贸易,构建人工林已成为一个国家或地区承担温室气体减排义务的替代途径,是事关签约国政府如何正确履行《京都协议书》的重大生态、环

境、经济和外交问题^[1~3, 74]。目前,欧美等发达国家都在加大造林碳吸收、碳有效储存时间和碳增汇对策技术的研究力度,为在环境履约谈判中最大限度地争取国家利益作积极准备。作为一个发展中国家,我国具有大面积的人工林和退化土地,如何在增强人工林碳汇功能的同时制定适应于全球碳贸易及国内生态补偿机制的途径和对策是事关我国在国际环境履约中维护国家形象和国家利益以及协调国内生态、经济和社会和谐发展的重大科技需求,亟待加强这方面的研究。

References:

- [1] Chen P Q, Huang Y, Yu G R. Carbon Cycle of the Earth System. Beijing: Science Press, 2004. 1~585.
- [2] Yu G R. Global Change, Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem. Beijing: Meteorology Press, 2003. 1~460.
- [3] Hu H F, Liu G H. Carbon sequestration of China's National Natural Forest Protection Project. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 291~296.
- [4] Oreskes N. The scientific consensus on climate change. *Science*, 2004, 306: 1686.
- [5] Lei P F, Xiang W H, Tian D L, *et al.* Carbon storage and distribution in *Cinnamomum camphor* plantation. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 26(1): 291~296.
- [6] Marland G, Garten Jr C T, Post W M, *et al.* Studies on enhancing carbon sequestration in soils. *Energy*, 2004, 29: 1643~1650.
- [7] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123: 1~22.
- [8] Lal R. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220: 242~258.
- [9] Yang W Q, Zhang J, Hu T X, *et al.* *Forest Soil Ecology*. Chengdu: Sichuan S&T Press, 2006. 1~480.
- [10] IPCC. Land Use, Land Use Change and Forestry. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 373.
- [11] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 518~522.
- [12] Wang X K, Feng Z W, Oyang Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 13~16.
- [13] FAO. Production Yearbook. Food & Agric. Organization, Rome, Italy, 2006. 1~348.
- [14] Detwiler R P, Hall C A S. Tropical forests and the global carbon cycle. *Science*, 1988, 239: 42~47.
- [15] Bouwman A F, Leemans R. The role of forest soils in the global carbon cycle. In: McFee W, Kelly J M. Carbon Forms and Functions in Forest Soils. Soil Science Society American, Madison, WI, 1995. 503~525.
- [16] Sedjo R A. Temperate forest ecosystems in the global carbon cycle. *Ambio*, 1992, 21: 274~277.
- [17] Jabor G E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol Appl*, 2000, 10: 423~436.
- [18] Prentice I C. The carbon cycle and the atmospheric carbon dioxide. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. International Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, UK, 2001. 183~237.
- [19] Fang Y T, Mo J M, Sandra Brown, *et al.* Storage and distribution of soil organic carbon in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 135~142.
- [20] Li K R, Wang S Q, Cao M K. Carbon stocks in vegetation and soil in China. *Science in China (Series D)*, 2003, 33: 72~80.
- [21] Schlesinger W H. Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. In: Trabalka J R, Reichle D E eds. *The Changing Carbon Cycle: A Global Analyses*. New York: Springer-Verlag, 1985. 194~220.
- [22] Post W M, Mann L K. Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation. In: Bouwman A F ed. *Soils and the Greenhouse Effect*. New York: Wiley and Sons, 1990. 401~406.
- [23] Davidson E A, Ackerman I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*, 1993, 20: 161~193.
- [24] Lal R, Bruce J P. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environmental Science and Policy*, 1999, 2: 177~185.
- [25] Johnston M H, Homan P S, Engstrom J K, *et al.* Changes in ecosystem carbon storage over 40 years on an old field/forest landscape in east-central Minnesota. *Forest Ecol. Manag*, 1996, 83: 17~26.
- [26] Claussen E. An Effective Approach to Climate Change. *Science*, 2004, 306: 816.
- [27] IGBP. Terrestrial Carbon Working Group. CLIMATE: The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol. *Science*, 1998, 280: 1393~1394.
- [28] Silver W L, Ostertag R, Lugo A E. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. *Rest. Ecol*, 2000, 8: 394~407.
- [29] Walker B H, Steffen W L, Canadell J eds. *The Terrestrial Biosphere and Global Change*, IGBP book series 4. Cambridge University Press, 1999. 1~18.
- [30] Fearnside P M. Forests and global warming mitigation in Brazil: opportunities in the Brazilian forest sector for responses to global warming under the "development mechanism". *Biomass and Bioenergy*, 1999, 16: 171~189.
- [31] Li X Y, Tang H P. Carbon sequestration: manners suitable for carbon trade in China and function of terrestrial vegetation. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(2): 200~209.
- [32] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292: 2320~2322.
- [33] Fang J Y. Forest productivity in China and its response to global climate change. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 513~517.
- [34] Galdo I D, Six J, Peressotti A, *et al.* Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1204~1213.
- [35] Hoover C M. Soil carbon sequestration and forest management: challenges and opportunities. In: Kimble J M, Heath L S, Birdsey R A eds. *The Potential of US Forest Soil to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2003. 211~238.
- [36] Norby R J, O'Neill E G, Wullschlegel S D. Belowground responses to atmospheric carbon dioxide in forests. In: W. W. McFee and J M eds. *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*. Soil Science Society American, Madison, WI, 1995. 397~418.
- [37] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biol*, 2002, 8: 345~360.
- [38] Laclau P. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and natives cypress forests in northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 2003, 180: 317~333.
- [39] Nyland R D. *Silviculture: Concepts and Applications(2nd)*. McGraw Hill, Boston, 2001. 1~682.
- [40] Xu Q F, Xu J M. Changes in soil carbon pools induced by substitution of plantation for native forest. *Pedosphere*, 2003, 133: 271~278.
- [41] Mao Z J. Summary of estimation methods and research advances of the carbon balance of forest ecosystems. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(6): 731~738.
- [42] Li Y Y, Shao M A, Zheng J Y, *et al.* Spatial-temporal changes of soil organic carbon during vegetation recovery at Ziwliling, China. *Pedosphere*, 2005, 15(5): 601~610.
- [43] Guo J F, Wang Y S, Chen G S, *et al.* Soil C and N pools in Chinese fir and evergreen broadleaf forests and their changes with slash burning in mid-subtropical China. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 56~63.

- [44] Elliot W J. Soil erosion in forest ecosystems and carbon dynamics. In: Kimble J M, Heath L S, Birdsey R A, eds. *The Potential of US Forest Soil to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2003. 175~190.
- [45] Covington W W. Changes in forest floor organic matter and nutrient content following clear cutting in northern hardwoods. *Eco*, 1981, 62: 41~48.
- [46] Cohen W B, Harmon M E, Wallin D O. Two decades of carbon flux from forests of the Pacific Northwest. *Bioscience*, 1996, 46: 836~844.
- [47] Black T A, Harden J W. Effect of timber harvest on soil carbon storage at Blodgett experimental forest, California. *Canadian Journal of Forest Research*, 1995, 25: 1385~1396.
- [48] Yanai R D, Currie W S, Goodale C L. Soil carbon dynamics after forest harvest: an ecosystem paradigm reconsidered. *Ecosystems*, 2003, 56: 197~212.
- [49] Mattson K G, Swank W T. Soil and detrital carbon dynamics following forest cutting in the southern Appalachians. *Biol. Fertil. Soils*, 1989, 7: 247~253.
- [50] Johnson D W, Todd D E. Effects of harvesting intensity on forest productivity and soil carbon storage in a mixed oak forest. In: Lal R, Kimble J M, Follett R F, Stewart B A eds. *Management of Carbon Sequestration in Soils*. CRC Press, Boca Raton, FL, 1998. 351~363.
- [51] Post W M. Impact of soil restoration, management and land use history on forest soil carbon. In: Kimble J M, Heath L S, Birdsey R A, Lal R eds. *The Potential of US Forest Soil to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2003. 191~199.
- [52] Zou C. Effect of soil air-filled porosity, soil organic matter and soil strength on primary root growth of radiate pine seedlings. *Plant Soil*, 2001, 236: 105~115.
- [53] Parker J L, Fernandez I J, Rustad L E, *et al.* Effects of nitrogen enrichment, wildfire, and harvesting on forest soil carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am.* 2001, 65: 1248~1255.
- [54] Harrison R B, Henry C L, Cole D W, *et al.* Long-term changes in organic matter in soils receiving application of municipal biosolids. In: McFee W, Kelly J M eds. *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*. Soil Science Society American, Madison, WI, 1995. 139~153.
- [55] Smith P, Powlson D S. Considering manure and carbon sequestration. *Science*, 2000, 287: 428~429.
- [56] Hsiao T C, Jackson R B. Interactive effects of water stress and elevated CO₂ on growth, photosynthesis, and water use efficiency. In: Luo Y, Mooney H A eds. *Carbon Dioxide and Environmental Stress*. Academic Press, San Diego, 1999. 3~31.
- [57] Bolley H W, Johnson H B, Marino B D, *et al.* Increase in C₃ plant water-use efficiency and biomass over Glacial to present CO₂ concentrations. *Nature*, 1993, 361: 61~64.
- [58] Jiang G M, Han X G. Response of plant growth to elevated [CO₂]: A Review on the chief methods and basic conclusions based on experiments in the external countries in past decade. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 42: 434~438.
- [59] Jiang G M, Zhu G J. Effects of natural high temperature and irradiation on photosynthesis and related parameters in three arid sandy shrub species. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 525~529.
- [60] Xiao C W, Zhang X S, Zhao J Z, *et al.* Response of seedlings of three dominant shrubs to climate warming in Ordos Plateau. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(7): 736~741.
- [61] Hattenschwiler S, Körner C. Biomass allocation and canopy development in spruce forest ecosystem under CO₂ and increased N deposition. *Oecologia*, 1998, 113: 104~114.
- [62] Lovelock C E, Winter K, Mersits R, *et al.* Response of communities of tropical tree species to elevated CO₂ in a forest clearing. *Oecologia*, 1998, 116: 207~218.
- [63] Medly B E, Dewar R C. A model of the long-term response of carbon allocation and productivity of forests to increased CO₂ concentration and nitrogen deposition. *Global Change Biol*, 1996, 2: 367~376.
- [64] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, *et al.* Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science*, 2002, 298: 2173~2176.
- [65] Schlesinger W H. Carbon sequestration in soils. *Science*, 1999, 286: 2095.
- [66] Curtis P S. A meta-analysis of leaf gas exchange and nitrogen in trees grown under elevated carbon dioxide. *Plant Cell and Environment*, 1996, 19: 127.
- [67] Norby R J, O'Neill E G, Wullschlegel S D. Below ground responses to atmospheric carbon dioxide in forests. In: McFee W, Kelly J M eds. *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*. Soil Science Society American, Madison, WI, 1995. 397~417.
- [68] Nisbet, T. Implications of climate change: soil and water. Forest Commission, Edinburgh, 2002. 53~67.
- [69] Dilustro J J, Day E P, Drake B G, *et al.* Abundance, production and mortality of fine roots under elevated atmospheric CO₂ in an oak-scrub ecosystem. *Environmental and Experimental Botany*, 2002, 48: 149~159.
- [70] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, *et al.* Climatic edaphic and biotic controls over carbon and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochem Cycles*, 1994, 8: 279~293.
- [71] Lin G, Ehleringer J R, Rygielwicz P T, *et al.* Elevated CO₂ and temperature impacts on different components of soil CO₂ efflux in Douglas-fir terraces. *Global Change Biology*, 1999, 5: 157~168.
- [72] Chapin F S III, Shaver A E, Gblin K G, *et al.* Response of arctic tundra to experimental and observed changes in climate. *Ecology*, 1995, 76: 694~711.
- [73] Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, *et al.* Estimates of the annual net carbon and water exchange of forest: The EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 113~175.
- [74] Wang Z, Jiang Y H, Wu J, *et al.* The research on China's potential abatement of CO₂ by technological progress. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 423~431.

参考文献:

- [1] 陈泮勤, 黄耀, 于贵瑞. 地球系统碳循环. 北京: 科学出版社, 2004. 1~595.
- [2] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003. 1~460.
- [3] 胡会峰, 刘国华. 中国天然林保护工程的固碳能力估算. *生态学报*, 2006, 26(1): 291~296.
- [5] 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. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 25~30.
- [9] 杨万勤, 张健, 胡庭兴, 等. 森林土壤生态学. 成都: 四川科学技术出版社, 2006. 1~480.
- [11] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518~522.
- [12] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳蓄积和碳密度研究. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 13~16.
- [19] 方运霆, 莫江明, Sandra Brown. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征. *生态学报*, 2004, 24(1): 135~142.
- [20] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(1): 72~80.
- [31] 李新宇, 唐海萍. 陆地植被的固碳功能与适用于碳贸易的生物固碳方式. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 200~209.
- [33] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应. *植物生态学报*, 2000, 24: 513~517.
- [41] 毛子军. 森林生态系统碳平衡估测方法及其研究进展. *植物生态学报*, 2002, 26(6): 731~738.
- [58] 蒋高明, 韩兴国, 林光辉. 大气 CO₂ 浓度升高对植物的直接影响—国外十余年来模拟实验研究之主要手段及基本结论. *植物生态学报*, 1997, 42: 434~438.
- [59] 蒋高明, 朱桂杰. 高温强光环境条件下 3 种沙地灌木的光合生理特点. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 525~529.
- [60] 肖春旺, 张新时, 赵景柱, 等. 鄂尔多斯高原 3 种优势灌木幼苗对气候变暖的响应. *植物学报*, 2001, 43(7): 736~741.
- [74] 王铮, 蒋铁红, 吴静, 等. 技术进步作用下中国 CO₂ 减排的可能性. *生态学报*, 2006, 26(2): 423~431.