

森林土壤固碳机理研究进展

许炼烽¹, 徐谔为², 李志安^{3*}

1. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655; 2. 华南农业大学林学院, 广东 广州 510642;
3. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650

摘要: 全球碳平衡中, 土壤有机碳储量为 2 000 Pg, 植被碳储量 500 Pg, 大气碳储量 785 Pg, 土壤中有有机碳变化是影响大气温室气体含量的重要因素。中国人工林总量世界第一, 可以通过造林树种的选择, 增加森林土壤的碳汇功能, 它主要通过 4 种机理来实现, 包括稳定性有机-矿物复合体的形成、持久性封存的深层碳的增加、耐分解有机物成份的积累、以及土壤团聚体结构中碳的物理性保护。中国近年来对木材的需求上升, 导致大量短轮伐期人工林的种植, 采伐、火烧炼山、施肥与整地等营林措施对土壤碳汇功能形成重大影响。因而, 通过加强对中国人工林土壤固碳机理的研究, 通过人为措施实现具有较强固碳能力的森林类型, 从而提高人工森林生态系统的固碳能力, 它对中国减排增汇战略具有重要意义, 而加强对不同营林措施对碳汇功能影响的研究是中国当前面临的重大课题。

关键词: 人工林; 营林措施; 土壤; 固碳

中图分类号: S714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5906 (2013) 06-1063-05

引用格式: 许炼烽, 徐谔为, 李志安. 森林土壤固碳机理研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6): 1063-1067.

XU Liangfeng, XU Anwei, LI Zhian. Research progresses in mechanisms of soil carbon sequestration in plantations of China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(6): 1063-1067.

旨在应对气候变化问题的京都议定书于 2005 年生效, 中国作为发展中国家, 在第一个承诺期 (2008—2012) 没有承担温室气体减排义务, 但中国的 CO₂ 排放总量已位居世界第二, 中国正面临节能减排的巨大压力, 在第一承诺期后将被要求承担强制性减排义务^[1-2]。京都议定书同时考虑“减排量”与“移除量”, 移除量主要指优化农林业形成的汇, 特别是称为“京都森林”的新造人工林的固碳。造林同时建立起两个巨大碳库, 即植被碳库与土壤碳库, 全球陆地生态系统碳有 62%~78% 蓄存于森林系统中, 其中 70% 又蓄存于土壤中^[3-5]。从全球碳平衡来看, 地表土壤有机碳储量 2 000 Pg, 植被碳储量 500 Pg, 大气碳储量 785 Pg^[6], 因而, 土壤固碳量的波动对大气碳浓度将产生重大影响, 增加土壤固碳对减缓全球变暖具有重要意义^[7]。

土壤固碳的巨大潜力促使世界各国加强对土壤固碳能力的研究, 对农业土壤的研究已较深入, 提出了诸如点耕、条耕及免耕等有效减少有机碳释放的措施^[8-9]。上世纪 90 年代以来, 逐步开展了森林土壤固碳研究, 显示森林土壤是有巨大潜力的碳汇, 而碳汇功能的大小及潜力的实现与森林类型密

切相关^[10]。由于西方政治经济体制的特殊性, 导致其国家规模上人工林营造的困难, 这与中国形成鲜明对照, 中国森林总面积居世界第 5 位, 而人工林保存面积列世界第 1 位, 达 5 325.7×10⁴ hm² (2007 年国家林业局公告)。但中国人工林普遍质量不高, 生态功能差。以较有代表性的广东省为例, 随着经济的快速发展, 广东省在过去 20 多年里大规模植造林, 然而, 到 2005 年底, 全省林分中, 中、幼林面积达 540.93×10⁴ hm², 占全省乔木林面积的 61.8%。以马尾松和杉木为主的针叶林达 45.12%, 其中松树林占全省乔木林面积的 33.3%。显然, 广东省森林群落结构与树种组成简单, 生态功能差的问题相当突出, 近年来, 全省进行大规模的生态公益林改造, 以期优化森林结构。由于缺乏对森林土壤碳固持机理的理解, 中国大面积的人工林改造没有考虑强化碳汇功能的因素。然而, 提高农林业单位面积土地的储碳量已成为全球减缓温室气体浓度上升的最重要策略之一, 而且它潜力巨大^[2,8]。

1 人工林影响土壤碳汇功能的主要机理

1.1 稳定性有机-矿物复合体的形成

有机-矿物复合体的碳被认为是最为稳定的类

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30870442); 国家自然科学基金委—广东省联合基金项目(U1131001); 国家重点基础研究发展计划专题 (2011CB403204); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05050000)

作者简介: 许炼烽 (1963 年生), 男, 高级工程师, 主要从事生态保护及生态评价研究。E-mail: eia888@163.com

*通信作者

收稿日期: 2013-03-31

型之一,这一类碳的积累取决于有机物结构与土壤矿物类型的配置关系,已发现,与高岭石相结合的有机碳更多通过与氢氧化铝表面的结合,以含多糖有机碳为主,而蒙脱石相结合的有机质主要是通过阳离子的桥键作用,以含芳香类物质的有机碳为主^[11-12]。另一方面,矿物类型还对一个地区土壤的固碳量起关键作用,它主要通过黏粒面积大小起作用,有机碳浓度与土壤吸附面积(SSA)存在显著正相关的关系,有机碳在土壤中的驻留时间也随SSA的增加而延长^[13,14],但并非所有矿物表面在保护性吸附有机碳方面都是同等有效的,在层状硅酸盐中,蒙脱石与有机碳的结合比其它黏土矿物更紧密^[12],由于大的吸附表面,蒙脱石对有机碳有更大的吸附能力。而铁铝氧化物意义更大,它们与有机碳的亲合性比其它黏土矿物表面更紧密^[15-17],富含水英铝石(allophone)土壤有机碳平均驻留时间可达2 000—5 000 a^[18-19]。从土壤矿物特性来看,源于基性岩或超基性岩的铁铝土总是比酸性岩发育土壤含有较高的有机质。在风化完全的热带土壤中,增加磷及石灰(磷灰岩,一种慢释性磷矿石)可以显著增加土壤有机碳积累,主要原因是有机质与含氢氧化铁、铝的高岭石及其它含氢氧化铁、铝的矿物的复合,使有机质受到了保护^[18]。

1.2 持久性封存的深层碳的增加

有些植被类型可使有机物质大量向深层转移,深层碳在减缓温室气体排放上具有重要意义。表层10 cm有机碳分解时间几年至15~40 a,在25 cm以下可长至100 a以上^[18,20],甚至达2 000 a至10 000 a^[21]。深层碳通常是古老而惰性的,同位素示踪显示,1 m以下碳尽管可以释放,但慢很多^[18]。全球看,0~100 cm储碳量为1 462~1 548 Pg C,0~200 cm储碳量为2 376~2 456 Pg C^[22]。这些数据表明,深层碳量相当巨大,特别是对有机土以及热带风化层深厚的土壤,1 m以下的碳量仍非常巨大。在森林土壤上,每年以可溶性有机碳的形式向深层转移的碳量达115~500 kg·hm²,而随土壤溶液漏走的碳只有5~66 kg·hm²,即大部分持留于矿质土层中^[23-25]。在地处南亚热带地区的鹤山生态站,马占相思林可以迅速提高土壤有机碳,特别是大幅增加深层有机碳。马占相思林下有明显的酸化现象,它是豆科植物固氮过程的结果,这种酸化使土壤活性铁铝浓度上升,活性铁铝被认为是减缓土壤有机质分解的关键因素^[14,26]。深层碳动态同样与植被类型密切相关,特定植被类型形成的森林生态系统中,土壤动物异常丰富,土壤动物是有机物下迁的重要因素,另一个因素是有些可溶性有机物易于下迁,并在深层厌氧环境沉积^[27]。下迁碳在化学结构上与原位碳

有明显的区别,如对灰壤的研究显示,B层有机碳含有较多芳香环,上层原位有机碳则较多亚甲基碳^[28]。深层碳能长久保存的主要原因被认为是缺乏新鲜有机物,以致无法支持微生物群落的活动^[21]。

1.3 耐分解有机物成份的积累

土壤有机碳是复杂结构的集合体,其优势结构通常决定碳的稳定性,一般芳香结构类碳比烷基碳稳定,烷基碳比氧烷基碳稳定,有机结构中的一些机团还对微生物分解有抑制作用。但化学结构的碳稳定性效应,主要体现在它与矿质土结合的牢固性,特别是黏粒所结合的碳类型,它是最稳定的碳。对农业土壤的研究显示,大粒级碳以氧烷基碳为主,粉粒级碳以芳香类碳为主,黏粒碳以烷基碳为主^[29]。对森林植被的不饱和始成土的研究显示,B层黏粒中以烷基碳为主,其源于角质和木栓脂的羟基羧酸是主要稳定形式,而在C层黏粒中,以小分子的有机酸为主,而源于木质素的酚类碳在黏粒中很少^[30]。方法上,核磁共振技术可以很好地解析土壤碳结构基团特征^[28],物理性密度法则可以大类上把有机碳分为重组碳与轻组碳(密度为1.85的多钨酸钠溶液)^[31-32],它也是碳结构复杂性的间接评估,一般重组碳在土壤中的持久时间要远比轻组碳长,因为轻组碳一般是与大团聚体相联结,重组碳则与粉粒及黏粒相联结,是有机-矿物复合体的主体(organo-mineral),它形成耐分解的物理性保护,一般在<5 μm的矿物粒子土壤有机碳浓度最高^[33]。在Pordo Rico的研究表明,一些速生人工林与次生林的总碳量差别并不大,但其稳定性重组碳的含量却显著低于次生林^[34],Lemma等^[35]研究表明,在30年左右的植被恢复过后,桉树和松树林的土壤有机碳含量明显高于柏树,这是由于它们产生大量的树脂、蜡质或芳香油类物质使土壤的疏水性明显高于其他林地,从而提高土壤结构稳定性,进而提高碳固定量。因而,不同植被产生的有机物与碳稳定性密切相关。

1.4 土壤团聚体结构中碳的物理性保护

有些人工林有利于改良土壤结构,特别是促进土壤团聚体结构的形成,它反过来又对有机碳起到保护作用,降低微生物分解强度。土壤重组有机碳主要固定于微团聚体内,形成牢固的物理性保护,而轻组碳被固定于大团聚体,在土壤中的驻留时间比重组碳要短很多^[33,36-37]。因而,农业上的保护性耕作,目标主要是提高微团聚体的发育,当团聚体发育不良时,土壤有机碳将加速分解^[8]。

2 营林措施对土壤碳汇功能的影响

林业经营措施对碳稳定机制具有不同程度的影响,人工林树种改造以及轮伐收获、土地翻耕和

残落物管理等措施都会显著改变土壤有机碳的数量及化学特性^[38]。我们在中国科学院鹤山生态站的研究显示，速生的大叶相思和马占相思林土壤有机碳的含量远高于同期种植的柠檬桉林和乡土树种林，而且马占相思林的土壤粒径中，小于 53 μm 的组分高于其他树种，表明其碳库的稳定性较好。土地翻耕、少耕或免耕对土壤有机碳的影响也不同，通常，免耕条件的微团聚体的有机碳浓度显著升高^[39]。造林前的残落物火烧是人工林经营的重要措施，俗称“炼山”，它对人工林土壤碳库具有重要的影响，它直接烧去地表残落物，同时提高土壤温度而影响更深层次有机碳的稳定性^[40-42]。然而，火烧也可能增加一些耐分解成分，使惰性碳库组分增加，这主要是因为火烧会选择性的燃烧新鲜残落物，而且形成芳香族的新多聚合物，这些由于未充分燃烧而呈焦状物质会有上千年的周转时间^[43]。林火同样导致土壤有机碳的变化，但可能是有限时空尺度上的变化，1979年 Kraemer 等发现^[44]，在燃烧过的林地上土壤有机质 25 a 后没有较大的变化，从较长的时间来看，燃烧只是改变了土壤有机质的分布，而总量没有明显的改变。低强度的有控燃烧只是使地表 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质被淋溶到土壤中去^[45]。施肥和林下植被管理也是人工林管理中的重要措施，施肥对土壤有机碳的影响是一个长期而复杂的过程^[46]，如，研究发现杉木幼林施肥 1 a 后，比无施肥土壤的有机质含量变化不大；而幼林施肥 17 a 后，施肥比无施肥的土壤有机质增加 17.13%~23.76%^[47]。土壤施用鸡粪肥后，在所有团聚体中，1.2%有机碳是易于分解的，小于 0.18%有机碳是被团聚体结构物理保护，97.0%以上的有机碳是稳定部分^[48,45]。森林采伐对土壤有机碳含量有一定影响，但通常影响有限^[49-50]，尤其是较低强度的择伐，如骆土寿等^[51]在海南霸王岭山地雨林的测定显示，择伐强度 50%的降低 5.3%，择伐强度 30%的降低 4.5%。在澳大利亚的研究发现南洋杉林下草本植物的剔除降低了水溶性有机碳组分的含量^[52]。

3 提升中国人工林土壤碳汇功能的可能途径

在中国造林或人工林改造过程中，可以通过合适的林型选择，有效提高土壤固碳能力，形成更大的碳汇，即提高黏粒固碳量，增加碳的深层转移，提高耐分解有机成份，培育发达的团聚体结构。根据中国科学院鹤山生态站的长期观测，这一地区绝大多数人工林纯林在约 25 a 林龄阶段仍保持纯林结构，没有明显的演替现象，但不同林型已形成非常特化的土壤碳积累特征。在中国科学院小良生态

站约 38 a 林龄的人工林，则有了显著的演替现象，结构上接近当地的顶级植被类型——热带季雨林，但种类组成上与开始时人工种植种类有关^[53]，研究显示，这种处于较高级演替阶段的森林，其碳积累也与植被种类组成密切相关，以豺皮樟为优势种的类型可以使深层碳积累水平达到当地自然林的水平^[24]。这表明，无论建造较短期的人工林，还是构建更长期的处于较高级演替阶段的森林植被，都可以通过人为措施实现具有较强固碳能力的森林类型，从而提高人工森林生态系统的固碳能力，这需要对中国人工林碳汇机理的进行深入的研究，形成有效的强化碳汇策略，它将对我国减排增汇战略具有重要意义。

4 展望

由于中国人多地少的特殊国情，在中国主要人工林中，短轮伐期的速生人工林占有很大的比重，在南方地区尤为突出，例如，至2010年底，中国南方桉树速生林面积超过 $368 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，并以每年 $20 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的速度增长，而相思类速生林的面积已达 $30 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。这些人工林通常在4~5 a或最多在8 a内砍伐1次，林地被砍伐、火烧、翻耕、施肥，林下植被控制，即林地受到强烈的干扰，它导致林地土壤碳固持量显著下降。由于这些人工林地面积巨大，如何在林地受到不断扰动条件下维持其尽可能大的固碳能力是中国面临的重大课题。在中国南方地区，特别是南亚热带地区，高温多雨气候使林地表层土壤固碳水平一般在2%~3%，通常最高不超过5%。人工林被砍伐，地表受翻动后，土壤含碳量一般下降到2%以下，但由于林型不同和实际经营措施的差异，不同人工林土壤维持的碳水平也不同，而巨大的土体质量使固碳总量上也差别巨大，可达数倍，因而，加强研究和筛选相对高碳维持水平的人工林在增汇减排上将具有重要意义。

参考文献：

- [1] DUMANSKI J. Carbon sequestration, soil conservation, and the Kyoto protocol: summary of implications. *Climatic Change*[J]. 2004, 65: 255-261.
- [2] LAL R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, 123: 1-22.
- [3] DIXON R K, BROWN S, HOUGHTON R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263: 185-190.
- [4] SCHIMMEL D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995, 1: 77-91.
- [5] HAGEDORN F, MAURER S, EGLI P, et al. Carbon sequestration in forest soils: effects of soil type, atmospheric CO₂ enrichment, and N deposition[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 619-628.
- [6] JANZEN H H. Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104: 399-417.

- [7] FONTAINE S, BARDOUX G, ABBADIE L, et al. Carbon input to soil may decrease soil carbon content[J]. *Ecology Letters*, 2004, 7: 314-320.
- [8] LAL R, KIMBLE J M. Conservation tillage for carbon sequestration[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 243-253.
- [9] Lal R, REICOSKY D C, HANSON J D. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93: 1-12.
- [10] SIX J, CALLEWAERT P, LENDERS S, et al. Measuring and Understanding Carbon Storage in Afforested Soils by Physical Fractionation[J]. *Soil Science Society American Journal*, 2002, 66: 1981-1987.
- [11] WATTEL-KOEKOEK EJW, BUURMAN P, VANDER JP, et al. Mean residence time of soil organic matter associated with Kaolinite and smectite[J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54: 269-278.
- [12] WATTEL-KOEKOEK EJW, VAN GENUCHTEN PPL, BUURMAN P, et al. Amount and composition of clay-associated soil organic matter in a range of kaolinitic and smectitic soils[J]. *Geoderma*, 2001, 99, 27-49.
- [13] KENNEDY M J, PEVEAR D R, HILL R J. Mineral surface control of organic carbon in black shale[J]. *Science*, 2002, 295: 657-660.
- [14] WISEMAN CLS, PUTTMANN W. Soil organic carbon and its sorptive preservation in central Germany[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56:65-76.
- [15] JONES D L, EDWARDS A C. Influence of sorption on the biological utilization of two simple carbon substrates[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30: 1895-1902.
- [16] KAISER K, EUSTERHUES K, RUMPEL C, et al. Stabilization of organic matter by soil minerals-investigations of density and particle-size fractions from two acid forest soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, 165: 451-459.
- [17] JARDINE P M, WEBER N C, MCCARTHY J F. Mechanisms of dissolved organic carbon adsorption on soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53: 1378-1385.
- [18] BATJES N H, SOMBROEK W G. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils[J]. *Global Change Biology*, 1997, 3: 161-173.
- [19] WADA K, AOMINE S. Soil development during the quaternary[J]. *Soil Science*, 1975, 116: 170-177.
- [20] HARRISON A F, HARKNESS D D, BACON P J. The use of bomb-14C for studying organic matter and N and P dynamics in a woodland soil[C]// HARRISON A F, INESON P, HEAL O W. *Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystem: Field methods, application and interpretation*. Barking: Elsevier Applied Science, 1990: 125-138.
- [21] FONTAINE S, BAROT B, BARRE P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, 450(8): 277-280.
- [22] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2):151-163.
- [23] MICHALZIK B, KALBITZ K, PARK J H, et al. Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen-a synthesis for temperate forests[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 52: 173-205.
- [24] SOLINGER S, KALBITZ K, MATZNER E. Controls on the dynamics of dissolved organic carbon and nitrogen in a Central European deciduous forest[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 55: 327-349.
- [25] GUGGENBERGER G, ZECH W. Dissolved organic carbon control in acid forest soils of the Fichtelgebirge (FRG) as revealed by distribution patterns and structural composition analysis[J]. *Geoderma*, 1993, 59: 109-129.
- [26] HAGEDORN F, MAURER S, EGLI P, et al. Carbon sequestration in forest soils: effects of soil type, atmospheric CO₂ enrichment, and N deposition[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 619-628.
- [27] 顾伟, 李志安, 邹碧, 等. 华南热带人工林土壤有机碳含量及其稳定性特征[J]. *热带亚热带植物学报*, 2007, 15(5): 369-376.
- [28] SCHMIDT MWI, KNICKER H, KOGEL-KNABNER I. Organic matter accumulating in Aeh and Bh horizons of a Podzol D chemical characterization in primary organo-mineral associations[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31: 727-734.
- [29] BALDOCK J A, OADES J M, NELSON P N, et al. Assessing the extent of decomposition of natural organic materials using solid-state ¹³C NMR spectroscopy[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1997, 35: 1061-1083.
- [30] RUMPEL C, EUSTERHUES K, KÖGEL-KNABNER I. Location and chemical composition of stabilized organic carbon in topsoil and subsoil horizons of two acid forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(1): 177-190.
- [31] LORENZ K, LAL R, SHIPITALO M J. Stabilization of organic carbon in chemically separated pools in no-till and meadow soils in Northern Appalachia[J]. *Geoderma*, 2006, 137: 205-211.
- [32] STEVENSON F J, ELLIOT E T. Methodologies for assessing the quantity and quality of soil organic matter[C]//COLEMAN D C, OADES J M, UEHARA G. *Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems*. Hawaii: University of Hawaii, 1989: 175-199.
- [33] POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential[J]. *Global Change Biology*, 2006, 6: 317-327.
- [34] LI Y Q, XU M, ZOU X M, et al. Comparing soil organic carbon dynamics in plantation and secondary forest in wet tropics in Puerto Rico[J]. *Global Change Biology*, 2005,11: 239-248.
- [35] LEMMA B, KLEJA D B, NILSSON I, et al. Soil carbon sequestration under different exotic tree species in the southwestern highlands of Ethiopia[J]. *Geoderma*, 2006, 136(3/4): 886-898.
- [36] CAMBARDELLA C A, ELLIOT E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 1071-1076.
- [37] ELLIOT E T, COLEMAN D C. Let the soil work for us[J]. *Ecological Bulletins*, 1988, 39: 23-32.
- [38] GARTZIA-BENGOETXEA N, GONZALEZ-ARIAS A, MERINO A, et al. Soil organic matter in soil physical fractions in adjacent semi-natural and cultivated stands in temperate Atlantic forests[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41: 1674-1683.
- [39] DENEK K, SIX J, MERCKX R, et al. Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 1935-1944.
- [40] GUO J F, YANG Y S, CHEN G S. Soil C and N pools in Chinese fir and evergreen broadleaf forests and their changes with slash burning in mid-subtropical China[J]. *Pedosphere*, 2006, 16: 56-63.
- [41] LIAO C, LUO Y, FANG C, et al. Ecosystem carbon stock influenced by plantation practice: implications for planting forests as a measure of climate change mitigation[J]. *PLoS ONE*, 2010, 5: e10867.
- [42] YANG Y S, GUO J, CHEN G, et al. Carbon and nitrogen pools in Chinese fir and evergreen broadleaved forests and changes associated with felling and burning in mid-subtropical China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 216:216-226.
- [43] CERTINI G. Effects of fire on properties of forest soils: a review[J]. *Oecologia*, 2005, 143: 1-10.
- [44] KRAEMER J F, HERMANN 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.
- [45] 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.
- [46] 陈进宁, 汪思龙. 杉木人工林土壤碳库动态研究现状及展望[J]. 广西林业科学, 2007, 36: 147-151.
- [47] 陈爱玲, 林德喜. 杉木施肥 17 年后土壤养分的变化[J]. 福建林学院学报, 2000, 20: 265-268.
- [48] GIJSMAN A J. Soil organic matter pools in a volcanic-ash soil under fallow or cultivation with applied chicken manure[J]. Eur Soil Sci, 1998, 49: 427-436.
- [49] JOHNSON D W. Effects of forest management on soil carbon storage [J]. Water Air Soil Pollut, 1992, 64: 83-120.
- [50] JOHNSON E, Johnson 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.
- [51] 骆士寿, 陈步峰, 陈永富, 等. 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]. 林业科学研究, 2000, 13(2): 123-128.
- [52] HUANG Z, XU Z, CHEN C, et al. Changes in soil carbon during the establishment of a hardwood plantation in subtropical Australia[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 254: 46-55.
- [53] 彭少麟, 余作岳. 热带亚热带退化生态系统植被恢复生态学研究[M]. 广东: 广东科技出版社, 1996: 36-66.

Research progresses in mechanisms of soil carbon sequestration in plantations in China

XU Liangfeng¹, XU Anwei², LI Zhian^{3*}

1. South China Institute of Environmental Sciences, MEP, Guangzhou 510655, China

2. College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3. South China Botanical Gardens, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

Abstract: In the global carbon balance, soil has a carbon stock of 2 000 Pg, with 500 Pg in vegetation and 785 Pg in the atmosphere. Soil plays a key role in regulating allocation of global carbon. China has largest area of plantation in the world. Proper selection of tree species could enhance ability of carbon sink in plantation soil, which is realized by 4 mechanisms: formation of organic-mineral complexation, long-standing sequestration in deep soil, recalcitrant organic component in litter and physical protection in soil aggregates. In recent years, China has great demand for timber, leading to expansion of short-rotation plantation. Logging, burning, fertilization land preparation could exert influence on carbon sink of soil. In this context, we could establish plantations of high carbon sequestration by comparing properties of soil organic carbon. Enhanced carbon sink in plantations will help in reducing potential of greenhouse effect. In this field, impact of plantation management strategies on soil carbon sink is urgently needed to be investigated.

Key words: plantations; forest managements; soil; carbon sequestration