

森林土壤碳汇功能研究进展¹

李强^{1,2}, 马明东²

1. 四川农业大学林学院园艺学院, 四川雅安(625014);

2. 四川农业大学都江堰分校, 四川都江堰(611830)

E-mail: liqiang0092005@163.com

摘要: 该文结合碳汇/源的概念和国内外对土壤碳汇功能的定义与评价, 对森林土壤碳库、碳密度及碳循环规律作了综述, 并就报道较多的森林类型土壤碳汇/源功能作了概述。

关键词: 森林生态系统, 土壤有机碳, 碳库, 碳循环, 碳源/汇

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

全球气候变暖及其影响是当前人类所面临的最为严重的环境问题之一。准确确定陆地生态系统碳汇/源机制是其中一个关键^[1]。在陆地生态系统中, 碳汇功能体现在碳库的贮量和积累速率, 碳源体现在碳的排放强度; 基本碳库包括植被活体、残体和土壤部分, 基本积累过程包括光合作用和土壤碳的吸收, 基本排放过程包括植被和土壤的呼吸作用^[2]。其中, 土壤的碳汇效应举足轻重, 研究陆地土壤碳循环机制及对全球变化的响应, 是预测大气CO₂含量及全球变化的重要基础。据估计, 全球土壤按1 m 土层计, 有机碳的贮量约1550×10⁹ t, 占陆地生态系统碳贮量(2100×10⁹ t 碳) 的3/ 4^[3]; 土壤有机碳库由不同周转率的组分组成, 其周转期从几周到近万年^[4]; 相对于贮存在植被中的碳来说, 贮存在土壤深层中的碳较为稳定, 如果没有受到大的地质变迁, 它们将长久地保存在土壤剖面中而形成稳定的有机碳库。土壤平均每年排放到大气中的CO₂以碳计为(68~100) ×10⁹ t^[5], 约为化石燃料碳排放量的11 倍^[6], 大气CO₂ 贮量的10%^[7]。在陆地生态系统中, 森林作为最大的有机碳库, 在陆地生态系统碳循环中起着重要的作用^[8], 土壤是贮量最大的碳库部分, 森林土壤碳库(占全球土壤碳贮量73%) 又是全球土壤碳库中最主要的部分^[9], 陆地碳库的重要组成部分, 也是森林生态系统中最大的碳库, 其碳库的变化被认为是导致大气碳库和全球气候变化的主要原因^[10], 其表现出巨大的碳汇/源效应。了解森林土壤碳循环是研究陆地生态系统碳循环的重要前提^[11], 为研究各种环境变量因子和植物区系下土壤碳库释放与吸存提供了基础数据^[12-15]。

1 森林土壤碳汇/源功能的含义及表现

1.1 土壤碳汇与碳源

源(source) 指来源, 即事物间传递或接受物质或信息的属性及具有这种属性的事物或过程。汇(sink) 与源是相对的概念, 它指接受物质或信息流动的系统或接受流动的过程^[16]。在土壤系统和大气系统之间, 如果土壤中碳流入到大气中, 则把土壤称为碳源, 反之, 则把土壤称为碳汇。

土壤作为陆地生态系统的核心, 是链接大气圈、水圈、生物圈及岩石圈的纽带^[17, 18]。土壤碳库是陆地碳库的主要组成部分, 土壤碳库量约是大气碳库的2倍, 是地球表面最大且周转最慢的碳库, 主要以有机碳形式存在^[19]。由于土壤有机碳储量的巨大库容, 其较小幅度的变化就可能影响到碳向大气的排放, 以温室效应影响全球气候变化。因此, 对土壤碳库及其动态变化准确、详实的研究无疑对研究陆地生态系统碳循环及全球变化问题意义重大。

1.2 土壤碳汇功能的表现

¹本课题得到四川省先导计划重点科研项目“云杉天然林分可持续经营技术研究”(编号 03-06) 的资助。

土壤碳汇功能主要通过土壤碳储量、碳密度和碳循环三方面综合反映，三方面密切相关^[16]，其表现为一个碳平衡动态过程，由吸收、排放、固定、转移四个子系统共同决定。

土壤有机碳库积累量由残体分解量决定,减少过程由土壤呼吸量决定,净变化由残体输入和呼吸排放量决定^[19、20]。而土壤有机碳贮量的年际变化决定于土壤侵蚀及淋溶导致的土壤有机碳的迁移。国内外关于土壤有机碳储量及其影响因素等方面的研究已积累了较多成果^[3、20、21、22]。

土壤碳密度是估算碳储量的基础数据^[23]，它本身也是评价土壤碳汇功能的重要指标。土壤碳循环关系到整个地球三相系统碳循环^[18]，其循环状态直接关系到土壤是碳源还是碳汇。当前土壤碳循环的研究仍是陆地碳循环研究中最不充分的部分，由于土壤在时间和空间上的复杂性，使得土壤碳循环的研究仍面临着大量需要解决的问题^[24]，对土壤碳库的估计误差也很大。

1.3 森林土壤碳汇效应表现

森林土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库，全球森林土壤有机碳贮量约为402~787 Gt C(1Gt =10⁹t)，约占全球陆地土壤中碳储量的25~50%^[16]。全球森林土壤碳库的地理分布格局与森林植被碳库有显著的不同，按纬度带划分，以高纬度地区森林土壤碳贮量最大，约占全球森林土壤碳贮量的60%，低纬度地区森林土壤碳贮量占27%，中纬度地区森林土壤碳贮量占13%。森林土壤的碳贮量在森林总碳贮量中所占的比重，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%，即森林土壤碳贮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，森林土壤碳库及碳密度的这种纬向分布规律是气候、植被、土壤相互作用平衡后的一种结果。森林枯落物是森林土壤有机质的主要来源，森林土壤碳密度与森林地表枯落物的积累量成正比，而地表枯落物的积累量主要决定于枯落物生成量与分解速度，二者又同时受温度与水分两个气候因子的控制。当气温较高、降雨量较大时，森林的生产力高、枯落物的生成量大，同时枯落物及土壤中的有机质分解作用强烈，地面枯落物的净积累量较少;当气温较低、降雨量较小时，森林生产力相对较低，枯落物生成量也较少，但由于枯落物的分解作用较低，地面枯落物的积累量反而较大。

要精确估算森林生态系统的碳汇能力必须采用由下而上的方法，即通过了解每个不同的生态系统单元再到区域尺度，然后到国家或全球尺度，生态系统尺度的研究是全部工作的重要基础，而区域尺度起着桥梁和纽带作用^[16]。森林土壤碳周转是森林生态系统碳循环的基础，各种森林植被类型（特别是典型生态地理区域植被带谱）土壤碳研究可为各级尺度碳汇功能评价提供依据。

2 森林土壤碳汇功能评价因子

2.1 土壤有机碳储量和碳密度

土壤有机碳储量是生态系统碳汇效应的重要组成部分，也是评价土壤碳汇功能的主要指标。土壤碳密度是衡量土壤是碳源或汇的重要标准，也为估算碳储量提供了基础数据。

2.1.1 有机碳库和碳密度

森林土壤是陆地生态系统中的主要碳库,其碳储量的变化必然引起整个陆地生态系统或

区域生态系统碳的转移。土壤碳库大小决定于生物物质输入量、分解释放量和进入水系统的损失碳量间的关系^[25],与气候、干扰因子特征(时间、强度、方式等)及地上部分生物量变化密切相关。目前土壤研究资料较少,主要通过模拟分解速率、干扰特征和生物量动态变化的影响,来估测平均土壤碳库大小。土壤有机碳库是表现活跃的那部分碳库,通常用其大小来衡量总碳库大小。同样,通过测定有机碳密度来估量土壤总碳密度。对土壤有机碳储量的估计方法主要有4种类型^[26]:根据植被类型推算;根据土壤类型推算;根据生命气候带推算;模型计算。在众多估算方法中以Batjes所用的按土壤类型的研究方法和Post的按生命带方法的研究最有代表性。

2.1.2 有机碳库稳定性及碳库组分

土壤有机碳库稳定性也是土壤碳贮量源/汇功能的重要体现。土壤有机碳稳定性增强是土壤碳贮量汇功能增加的过程,反之则是减弱的过程^[27]。土壤有机碳库组分也与土壤碳贮量汇功能密切相关,其保护性组分是土壤碳贮量汇功能增加的体现,非保护性组分是汇减弱的体现。

2.1.3 活性有机碳库贮量

土壤活性有机碳受植物和微生物影响强烈,具有一定溶解性,在土壤中移动比较快,不稳定,易氧化,易分解,易矿化,其形态和空间位置对植物和微生物来说活性比较高^[26],对土壤质量变异具有强烈指示作用,可以敏感地反映森林土壤的碳汇功能。它们是土壤有机物和其他养分循环转化的驱动力,与土壤实际起作用的有机碳密切相关^[28]。国外描述这一部分碳素的术语为微生物量碳和一部分微生物产物的碳,包括溶性有机碳(DOC)和水溶性有机碳(WSOC)和土壤微生物量碳。

2.2 土壤碳循环

土壤碳循环由土壤碳输入、碳输出与碳库稳定性三部分共同决定^[29]。土壤碳输入主要是植被枯死物、凋落物和动物、微生物的残体等组成,而碳输出主要是植物的带出与转移、土壤呼吸释放和凋落物+粗死木呼吸等组成^[30]。土壤中碳素的稳定性直接关系到碳的循环与周转。目前,土壤碳循环的研究是陆地碳循环研究中最不充分的部分,土壤碳库与其它碳库间的碳通量、碳平衡情况还不十分清楚^[31],但国内外对森林土壤碳释放量已经做了大量的研究^[26]。

3 主要森林类型土壤碳汇研究概况

森林土壤碳汇效应在陆地生态系统碳排放与吸存中占有重要地位。Woodwell^[32]估算全球森林土壤碳储量为 $0.925 \times 10^{12} \sim 2.775 \times 10^{12}$ t。Ajtay^[33]等研究认为,全球森林土壤碳储量中,热带雨林为82 Gt,热带季雨林41 Gt,温带林72 Gt,北方林135 Gt,林地及灌木林72 Gt。Houghton^[34]估算出热带森林土壤有机碳储量为187Gt,温带森林117 Gt,极地森林241 Gt,热带疏林及稀树草原88 Gt,温带疏林草原251 Gt。Humington^[35]研究认为,美国东南部森林生态系统土壤固碳速率可达 $1.8 \sim 2.3 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。周玉荣^[36]等估算中国主要森林生态系统土壤碳储量为 2.10×10^{10} t,占中国森林生态系统碳总储量的74.6%,约占全球森林土壤碳储量的2.7%。李克让等^[37]按面积加权估算中国森林土壤平均碳密度为 $81.39 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,土壤碳储量为 1.05×10^{10} t,约占中国森林生态系统碳库的66%。

在森林土壤碳研究方面,国内外研究报道集中在:灌木林、竹林、针叶林、阔叶林和针阔混交林等五种森林类型土壤。其中人工林及次生演替林土壤有机碳循环动态研究和退化过程碳流失机制研究尤多^[38-42]。

3.1 灌木林

灌木林是自然界中广泛存在的一种重要陆地生态系统类型,具有重要的地位和作用^[43]。其种类丰富、结构多样,是区域生物多样性的重要组成部分;并且其萌芽力强、生产力高,也是一种重要的替代能源和优良的治沙治荒树种。灌木林分一般是密生植被,林下土壤有较多碳积累,其分布区域不同土壤稳定性碳库与非稳定性碳库比例表现不一。在干旱半干旱地区其非稳定性碳库更多,在湿润地区稳定性碳库更大。我国有广大的灌木林面积分布,占国土面积的3%左右,在我国各种土地覆被类型中面积最大,但土壤碳密度最低^[44],土壤碳贮量为11.77Gt,仅占全国土壤总碳贮量的14.2%。不过灌木林表土层(0~20cm)土壤总有机碳含量高于相同生境的阔叶林土壤^[45],但差异未达显著水平。随着天然林保护工程的实施和治沙工程的开展,灌木林的地位和作用日益突出,其土壤碳汇/源效应将日益显现。

3.2 竹林

竹林是森林生态系统中重要组成部分,巨大的现存生物量水平决定了其在大气CO₂减量中的重要作用^[46],其下土壤参与着巨大的碳周转。黄承才^[47]研究中亚热带东部毛竹(*Phyllostachys pubescens*)林土壤有机碳储量为224.0 t·hm⁻²。中国是世界上竹种资源最丰富的国家,种类约占世界1/3,面积484.26万公顷,占全国森林面积的2.5%,为世界竹林总面积的39%。天然竹林广泛分布于27个省、市、自治区^[48],集中分布在南方亚热带山区,气候比较温暖、湿润,生长速度明显超过一般森林,其固碳速率高于一般森林,林下土壤碳蓄积量大。据推算中国竹林土壤固定的碳储量为1.066×10¹⁵g。其中毛竹林^[49]土壤层碳贮量(0~60cm)总计为71.475t/hm²,占竹林生态系统67.20%,其土壤有机碳含量达到2.0%左右(0~40cm,下同)^[50],慈竹林更高,超过了3%。

3.3 针叶林

针叶林几乎全部分布于北半球的高纬度地区,占据着北纬45~70°的宽广陆地面积,中纬度和低纬度亚高山地带也有针叶林的片段分布。针叶林多形成大面积纯林或混交林,群落结构简单,死地物层厚,分解缓慢,以暗针叶林为主的天然林分下土壤碳蓄积大,以明亮针叶林为主的人工林分下土壤碳蓄积较次。Zhao^[51]对中国热带、亚热带地区森林土壤有机碳储量作了初步研究:针叶林在100 cm土层内东部储量为1.393 Gt,西部为4.18 Gt,在20 cm土层内东部储量为0.72 Gt,西部为1.72 Gt。我国森林植被中,云冷杉林下土壤碳密度最大^[36],其土壤呼吸较弱,形成巨大碳贮库。云杉天然林土壤碳密度平均值为1.41%。马尾松林土壤有机C贮量为1.67×10⁵kg/hm²。^[52]杉木林土壤平均有机碳质量分数随着土壤深度增加而逐渐下降^[53],土壤表层(0~15cm)的有机碳质量分数最高,为20.6g·Kg⁻¹,而60~75cm土层的有机碳质量分数最低,为8.2 g·Kg⁻¹。其活性有机碳含量低于地带性阔叶林,第二代杉木纯林土壤活性有机碳含量比第一代杉木纯林低26.4%^[54]。

3.4 阔叶林

阔叶林分落叶阔叶林和常绿阔叶林。落叶阔叶林是温带地区湿润海洋性气候条件下典型

的木本群落,多以混交林形式存在。常绿阔叶林主要生长在温暖湿润的亚热带(或称暖温带)气候条件下、常绿阔叶树为优势种的森林植被类型^[55],是亚热带气候下的顶级植被类型,对其土壤碳汇效应研究具有重要意义。我国热带、亚热带地区阔叶林100cm土层^[51],东部为1.06 Gt,西部为3.58 Gt,20cm土层内东部为0.44 Gt,西部为1.46 Gt。由于常绿阔叶林地区独特的气候、植被特征,土壤一般具有较高的碳储量和碳密度。季风常绿阔叶林土壤有机质含碳密度占总碳密度的70.8%,月动态表现为每年的4~6月份是较强碳源,7~9月份是较弱碳源,10~11月份是较强碳汇,12~3月份是较弱碳汇^[56]。而在千烟洲7种典型森林类型土壤碳储量对比研究中^[57]:常绿阔叶林土壤的有机碳储量最低,SOC储量为 $4.01 \text{ kg} \pm 3.56 \text{ kg/m}^3$,部分地区SOC储量仍有增加的潜力,可能是特殊区域时段土壤淋溶侵蚀严重或人为破坏所制。我国常绿阔叶林分布最广、面积最大,类型最为复杂多样,是全球常绿阔叶林的主体。但基本分布于人口密集、经济发达的区域,由于长期、高强度的人为活动干扰,原生的常绿阔叶林所剩无几,大部分为人工林和次生灌丛或其它演替类型所替代,土壤碳素积累与周转受到很大影响。

3.5 针阔混交林

针阔混交林由针叶树和阔叶树混合组成,是中温带湿润地区的地带性植被。在欧亚大陆的中高纬度形成一条不连续的混交林带,在我国主要是红松阔叶林,分布在东北山地,西南亚高山地区也有山地过渡带分布。此外,各地还有大量人工或次生针阔混交林存在。我国针阔混交林土壤碳密度平均值为 $335.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。^[36]鼎湖山自然保护区次生针阔混交林土壤,特别是表层土壤,碳贮量贡献较大,高于针叶林,主要受土层厚度、水热条件和人为干扰等影响^[58、59]。贡嘎山东坡几种植被类型中针阔混交林下土壤有机碳含量最高^[60]。

4 结语与展望

研究不同地理气候带和不同森林类型土壤有机碳储量及动态变化特征,并对其碳汇功能作出汇总统计,可为预测未来农、林生态系统变化及全球环境变异和评价区域尺度生态系统碳汇/源效应提供理论依据。

到目前为止,陆地生态系统碳汇方面还存在许多不确定性,尤其对陆地生态系统碳汇时空分布和源汇存储率变化机制还很不清楚^[61]。森林土壤碳汇是否精准估算是全球 CO_2 “失汇”问题关键所在,其碳源/汇的潜力及其持久性的认识仍不十分清楚,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,以对森林土壤碳释放和吸存能力作出准确评价。

近年来,国内外在土壤碳研究中提出了很多新的测试方法,如 ^{14}C 测试、 $\delta^{13}\text{C}/\delta^{14}\text{C}$ 值测试、碳通量法和放射性碳同位素标记法^[62],它们在研究土壤有机碳组成及驻留时间、探讨土壤有机碳随深度的垂直变化和跟踪新老碳在不同环境因子影响下的动态过程和命运等方面起到重要作用,这对进一步研究大气-植被-土壤碳循环过程土壤碳蓄积估算、碳汇/源的数量和范围等意义重大。

参考文献

- [1] Watson R T, Noble I R, Bolin B. IPCC1 Land Use, Land Use Change, and Forestry: a special report of the IPCC [R] . *Cambridge : Cambridge University Press , 2000. 189~217.*
- [2]吴建国等.土地利用变化对生态系统碳汇功能影响的综合评价[J].中国工程科学,2003,5(9):65~71.
- [3] Lal R. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effects [J] . *Progress in Environmental Science , 1999 ,1 (4) : 307~326*
- [4] Perruchoud D , Joos F , Fischlin A , et al. Evaluating timescales of carbon turnover in temperate forest soils with radiocarbon data [J] . *Global Biogeochemical Cycles , 1999 , 13 (2) : 555~573.*
- [5] Raich J W , Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J] . *Global Biogeochemical Cycle , 1995 , 9 : 23~36.*
- [6] Marland G, Boden T A ,Andres R J , et al. Global ,regional and national CO2 emissions [A] . Carbon Dioxide Information Analysis Center , Oak Ridge National Labortary , US Department of Energy.Trends : a Compendium of Date on Global Change[C] .*Oak Ridge , Tennessee , 2000.*
- [7] Raich J W , Potter C S , Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration [J] . *Global Change Biology , 2002 , 8 : 800~812.*
- [8] Christopher S.Terrestrial biomass and effects of deforestation on the globe carbon cycle[J].*Bioscience ,1999 ,49 :769 - 778.*
- [9] Sedjo RA. 1993. The carbon cycle and global forest ecosystem. *Water Air Soil Pollut.70: 295~307*
- [10] Watson R T , et al. Landuse ,landuse change ,and forestry :aspecial report of the IPCC[M]. *Cambridge ,United Kingdom: Cam2 bridge university press , 2000. 189 - 217.*
- [11]YadvinderM,GraceJ. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide[J].*Tree ,2000 ,15 :332 - 337.*
- [12]解宪丽等.不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J].土壤学报, 2004, 41 (5): 687~699.
- [13]曹建华等.不同植被下土壤碳转移对岩溶动力系统中碳循环的影响[J].地球与环境, 2004, 32 (1): 90~96.
- [14]吴建国.土地利用变化对土壤有机碳的影响.中国林业科学院博士论文, 2002.
- [15]李克让等.中国植被和土壤碳贮量[J].中国科学(D辑),2003,33(1):72~80.
- [16]陈遐林. 华北主要森林类型的碳汇功能研究. 北京林业大学博士论文,2003.
- [17]汪业勋等. 陆地土壤碳循环的研究动态[J]. 生态学杂志,1999,18(5): 29~35.
- [18]耿元波等. 陆地碳循环研究进展[J].地球科学进展,2000,19(4):297~306.
- [19]贾宇平.土壤碳库分布与储量研究进展[J].太原师范学院学报(自然科学版),2004,3(4):62~64.
- [20]王绍强,刘纪远.土壤碳蓄积量变化的影响因素研究现状[J].地球科学进展,2002,17(4):528~534.
- [21]张雷等.土壤有机碳储量及影响其分解因素[J].东北农业大学学报,2004,35(6):744~748.
- [22]金峰等. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J].土壤,2000.1:11~17.
- [23]金峰等.土壤有机碳密度及储量的统计研究[J]. 土壤学报,2001,38(4):522~528.
- [24]邵月红.我国亚热带和温带土壤有机碳动态变化及InTEC模型的验证.南京农业大学硕士论文, 2005.
- [25]王义祥.福建省主要森林类型碳库与杉木林碳吸存.福建农林大学2004级硕士学位论文.
- [26]周国模等. 森林土壤碳库研究方法进展[J]. 浙江林学院学报2006, 23(2): 207~21.
- [27]吴庆标等.土壤有机碳稳定性及其影响因素[J].土壤通报,2005,36(5):743~747.
- [28]姜培坤.不同林分下土壤活性有机碳库研究[J].林业科学,2005,41(1):10~14.
- [29] 陈庆强等.土壤碳循环研究进展[J].地球科学进展,1998,13(6):555~563.
- [30]王凤文等. 土壤呼吸研究进展[J].安徽农业,2004,12:50.
- [31]张佳华等. 碳循环及对气候变化和人类生存环境的影响[J]. 气象科 学,2006,26(3):350~354.
- [32]WOODWELL G M. The biota and world carbon budget[J]. *Science , 1978 , 199: 141~146 .*
- [33]AJTAY G L, KETNER P, DUVIGNEAUD P. Terrestrial primary production and phytomass[M]//BOLIN B. *The Vlnhal Rarhnn Cycle. New Vnrk-lnhn: Wileys & Sons. 1979: 129~181.*
- [34]HOUGHTON R A. Land-use change and carbon cycle[J]. *Global Change Bio , 1995 , 1: 275~287.*
- [35]HUMINGTON T. Carbon sequestration in an aggrading forest ecosystem in the southeastern USA[J]. *Sio Sci Soc Am J , 1995 , 59: 1459~1467.*
- [36]周玉荣等.我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J].植物生态学报,2000,24(5):518~522.
- [37]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[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 1—3.
- [38]李跃林等.几种人工林土壤碳储量研究[J].福建林业科技,2004,31 (4) : 4~7.
- [39]于占源等. 紫色土人工林生态系统碳库与碳吸存变化[J]. 应用生态学报,2004,15(10):1837~1841.
- [40]田大伦等. 湖南会同杉木人工林生态系统碳素密度[J]. 生态学报,2004,24(11):2382~2386.
- [41]雷丕锋等.樟树人工林生态系统碳素贮量与分布研究[J]. 生态学杂志, 2004 ,23 (4) :25~30.
- [42]王清奎.杉木人工林土壤有机质研究[J].应用生态学报,2004,15(10):1947~1952.
- [43]俞海生等.灌木林主要生态作用的探讨[J]. 内蒙古林业科技.2003,4:15~18.
- [44]胡会峰等.中国主要灌丛植被碳储量[J].植物生态学报,2006,30(4):539~544.
- [45]徐秋芳等.灌木林与阔叶林土壤有机碳库的比较研究[J].北京林业大学学报,2005,27(2):18~22.
- [46]李智勇等.竹林生态环境效益评价探讨[J]. 世界竹藤通讯,2005,3(4):15~18.

- [47]黄承才. 浙江省毛竹 *Phyllostachys pubescens*林和茶 *Camellia siner*园土壤碳库的研究[J]. 绍兴文理学院学报, 2001, 21(1): 55~57.
- [48]郭起荣等.中国竹林的碳素特征[J].世界竹藤通讯,2005,3(3):25~28.
- [49]周国模,姜培坤.毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布[J].林业科学,2004,40(6):20~24.
- [50]李正才等.竹林生态系统与大气二氧化碳减量[J].竹子研究汇刊,2003,22(4):1~6.
- [51]ZHAO Q G, LI Z. Nutrient Cycling in Agroecosystems[M]. *Nethedand: Kluwer Academic Publishers, 1997: 1~6.*
- [52]黄承才等.浙江省马尾松(*Pinus massoniana*)林凋落物及土壤碳库的初步研究[J].绍兴文理学院学报,2000,20(6):60~64.
- [53]方晰等.杉木人工林土壤有机碳的垂直分布特征[J].浙江林学院学报,2004,21(4):418~423.
- [54]王清奎等.杉木人工林土壤活性有机质变化特征[J].应用生态学报,2005,16(7):1270~1274.
- [55]宋永昌,陈小勇,王希华.中国常绿阔叶林研究的回顾与展望[J].华东师范大学学报(自然科学版),2005,1: 1~8.
- [56]周国逸等.季风常绿阔叶林恢复演替系列地下部分碳平衡及累积速率[J].中国科学D辑 地球科学,2005,35(6): 502~510.
- [57]张城等.中国东部地区典型森林类型土壤有机碳储量分析[J].资源科 学,2006,(28)2:97~103.
- [58]方运霆等.鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征[J].生态学报, 2004, (24) 1: 135~142.
- [59]方运霆等.鼎湖山马尾松、荷木混交林生态系统碳素积累和分配特征[J].热带亚热带植物学报, 2003, 11 (1) : 47~52.
- [60]王琳等.贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征[J].地理学报, 2004, 59 (6): 1012~1019.
- [61]李玉强等. 陆地生态系统碳源与碳汇及其影响机制研究进展[J]. 生态学杂志,2005, 24(1): 37~42.
- [62]于贵瑞等.碳同位素技术在土壤碳循环研究中的应用[J].地球科学进展,2005,20(5):568~577.

The Carbon-pooling Ability of Forest Soil

Li Qiang^{1,2}, Ma Mingdong²

1. Sichuan Agriculture University, Yaan, China (625014)

2. Sichuan Agriculture University, Dujiangyan, China (611830)

Abstract

This text combining with the concept of carbon sink/source and the definition and the appraisal to soil carbon function in domestic and foreign, has made the summary to the carbon pool, carbon density and carbon cycle in forest soil, and has made the outline of carbon sink/ source function of several forest soil types.

Keywords: Forest ecosystem, Soil organic carbon, Carbon pool, Carbon cycling, Carbon source/sink

作者简介: 李强 (1983~) 男, 四川达县人, 硕士研究生, 主要研究方向是森林生态、森林土壤碳汇功能。