

主要管理措施对人工林土壤碳的影响*

闫美芳^{1,2**} 张新时^{1,2} 江源¹ 周广胜²

(¹北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; ²中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

摘要 人工林碳汇在全球碳循环及温室气体减排中发挥着重要作用。人工林是处于人为调控下的生态系统类型, 经营管理措施是影响人工林土壤碳平衡的重要因素。通过科学合理的生态系统管理, 增强人工林的土壤碳汇, 对减缓气候变化具有十分重要的意义。本文综述了主要经营措施(造林树种、轮伐期、采伐、灌溉和施肥)对人工林土壤碳储量与碳通量影响的研究进展, 结果表明: 人工林经营管理措施可通过改变林地的温度、水分、养分和土壤结构, 来影响土壤有机碳储量和土壤呼吸等碳循环过程。但目前人工林管理对土壤碳影响的研究还很不足, 一些营林措施还未展开相关研究。未来应针对人工林管理措施对土壤碳的影响做更全面的定量研究。

关键词 人工林; 营林措施; 土壤碳储量; 土壤呼吸; 减缓气候变化

中图分类号 Q948.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)11-2265-07

Effects of management practices on forest plantation soil carbon: A review. YAN Meifang^{1,2}, ZHANG Xin-shi^{1,2}, JIANG Yuan¹, ZHOU Guang-sheng² (¹State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ²State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2265-2271.

Abstract: Forest plantation carbon sink plays an important role in the global carbon cycle and the reduction of greenhouse gases emission, while management practice is an important factor affecting the soil carbon balance of forest plantations. Appropriate ecosystem management can improve the soil carbon sequestration of forest plantations, being of great significance in mitigating the impact of climate change. In this paper, the research advances on the effects of main management practices, *e. g.*, species selection, rotation period, cutting, irrigation, and fertilization, on the soil carbon stock and soil CO₂ efflux of forest plantations were reviewed. These practices could impose great effects on the soil carbon stock and soil respiration via regulating soil temperature, soil water content, soil nutrient contents, and soil structure. However, up to now, the researches on the effects of management practices on forest plantation soil carbon have not been adequate, and some of the management practices have not been examined yet. Therefore, more comprehensive and quantitative researches on the effects of management practices on forest plantation soil carbon should be further made.

Key words: forest plantation; management practice; soil carbon stock; soil respiration; climate change mitigation.

20世纪以来,在大气CO₂浓度升高、全球增暖和其它因素的共同作用下,地球环境以前所未有的速度发生变化,对人类的生存和发展构成严重威胁

(IPCC, 2001)。2007年12月,在《联合国气候变化框架公约》缔约方大会上,森林减排被列为“巴厘岛路线图”的重要内容,通过植树造林来承担部分温室气体减排指标已成为全球共识(张小全, 2005; 冯瑞芳等, 2006; Lindner *et al.*, 2008)。在2009年的哥本哈根联合国气候变化大会上,碳减排被视为应对

* 国家自然科学基金项目(40625015, 30770413)和北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室资助项目(2009-TD-03)。

** 通讯作者 E-mail: b09100@bnu.edu.cn

收稿日期: 2010-05-14 接受日期: 2010-08-18

全球气候变暖的重要手段。此后,包括中国在内的一些国家提出了具体的碳减排目标。

随着人工林面积和蓄积量的持续增加,人工林在全球碳循环中占据了越来越重要的位置。研究表明,我国的森林碳汇主要来自人工林的贡献(方精云等,2001)。《中国应对气候变化国家方案》指出,1980—2005年中国造林活动累计净吸收约 3.1×10^9 t CO₂。人工林在减缓全球气候变化中的地位举足轻重,而人工林的经营与管理是实现和促进其碳汇功能的重要手段(Leighty *et al.*, 2006; Jandl *et al.*, 2007; Waterworth & Richards, 2008)。为此,国际上提出了碳人工林(carbon plantation)的概念。与天然林相比,人工林是受人为控制的生态系统类型,主要经营措施是调控人工林生态系统碳收支的更重要因素(Jandl *et al.*, 2007)。中国作为世界上人工林种植面积最大的国家,无论是碳库储量,还是碳密度都远低于世界平均水平(刘国华等,2000)。因此,迫切需要采取科学合理的管理手段来提高人工林的固碳潜力(张小全等,2005;胡会峰和刘国华,2006)。

地下生态系统中的根系和矿物土壤形成了一个巨大的碳汇。人工林土壤碳库是其整个生态系统碳库的重要组成部分,造林后的经营管理对土壤碳库的微小改变都可能在很大程度上影响陆地碳收支(Johnson, 1992; Sartori *et al.*, 2007; Berthrong *et al.*, 2009)。所以人工林经营不仅要有利于地上生物量的增加,还应考虑土壤碳的动态变化。但与生物碳库相比,土壤碳库在人工林管理过程中受到的关注比较少(Turner & Lambert, 2000; Nilsen *et al.*, 2008)。

所以,在国际社会关于温室气体减排的巨大压力下,如何加强以CO₂减排与增汇为目的的人工林生态系统管理,是我国当前面临的主要环境问题之一,而土壤碳汇是人工林生态系统碳循环研究中的薄弱环节。因此,本文试图围绕人工林土壤固碳这一主题,针对主要经营措施对人工林土壤碳储量与碳通量的影响进行全面深入的总结分析,为增强人工林的土壤固碳潜力,充分发挥人工林在减缓气候变化方面的作用提供参考。

1 影响人工林土壤碳汇(源)的主要因子

人工林的碳汇作用包括森林土壤和林木,森林

土壤的碳汇功能更加重要(Johnson, 1992)。森林土壤在长久固碳方面潜力巨大。通过造林,提高大气CO₂在土壤中的驻留,最后转化为稳定的腐殖质,是一种比采用植物生物量临时吸收CO₂更持久的解决方案(史军等,2005)。不论是重新造林还是恢复成林,其在生长过程中的碳动态研究都表明,森林重建一般都会提高土壤的固碳能力。土壤的碳库储量不仅取决于土壤的碳输入,同时也取决于土壤的碳排放。土壤呼吸作用是除光合作用外,陆地碳收支中最大的通量,约占生态系统呼吸的60%~90%(Raich & Schlesinger, 1992)。

森林的土壤固碳速率因气候、森林类型、树龄、立地条件和人为干扰等因子而异(张小全,2005)。其中水热条件是影响森林生产力的主要因素,同时也是土壤有机碳的输入与分解过程中的主要影响因素。但人工林是处于人为调控下的生态系统类型,与水热条件相比,主要经营措施是影响人工林土壤碳平衡的更重要因素。因为这些人为活动可以直接改变土壤的温度、水分、土壤结构和微生物种群等影响土壤碳循环的因子。合理的人工林经营方式可以通过对林木生产力和林地小气候等的影响,增加生态系统的土壤碳固定和碳储存(Lal, 2004; 胡会峰和刘国华,2006)。

目前国内外科学家已就土壤碳储量和碳通量的影响因子、影响机理及定量评估等方面开展了大量研究,取得了较大进展。但关于人工林土壤碳的研究较少且较分散。目前文献中关于影响人工林土壤碳储量和碳通量的经营措施主要有:造林树种选择、轮伐期、采伐、施肥和灌溉等。

1.1 造林树种

不同的造林树种,由于光合固碳能力和环境适应性方面的不同,导致它们在生产力、碳分配和凋落物数量质量等方面的差异,从而对人工林生态系统土壤的碳汇(源)功能产生不同影响(Raich & Tufekcioglu, 2000; Oostra *et al.*, 2006)。不同树种的根冠比以及光合产物的分配模式相差较大,会导致根系呼吸强度的不同。即使是同类树种,由于其生物量及其同化产物分配的差异,也会造成根系生物量及根系呼吸强度的差异。根系的垂直分布特征(如深根系或浅根系)直接影响输入到土壤剖面各层次的有机碳数量,决定着土壤有机碳的垂直分布

(周莉等,2005;常宗强等,2008)。

土壤有机碳主要来源于地上部分的枯枝落叶及根系周转产生的碎屑。凋落物的质和量与外界环境因子共同决定了土壤中有有机碳的含量(Raich & Tufekcioglu,2000)。凋落物多且根系生长快的树种,其林地土壤有机碳的增加相对较快。李跃林等(2004)对鹤山桉树(*Eucalyptus*)等5种人工林的土壤有机碳进行了研究。结果表明,不同人工林下的土壤碳储量存在显著差异。同一深度土层中,木荷林(*Schima superba*)的土壤有机碳含量最高。Schulp等(2008)的研究表明,不同森林类型的土壤有机碳与枯落物碳储量差异显著,如山毛榉(*Fagus sylvatica*)和落叶松(*Larix kaempferi*)的土壤有机碳储量分别为53.3和97.1 Mg C · hm⁻²。森林凋落物产量受到森林类型、物种组成等多种因素的影响。张新平等(2008)对我国东北地区森林凋落物产量的研究结果表明,不同森林类型凋落物年产量存在显著差异,针阔叶混交林显著高于针叶林。其中,杨桦林(*Betula platyphylla*+*P. davidiana*)的年凋落物量为3.7 t · hm⁻²;长白落叶松(*L. olgensis*)为1.9 t · hm⁻²;而阔叶红松林(*Pinus koraiensis*)为4.5 t · hm⁻²。且不同树种凋落物具有各自不同的化学特性,从而导致其在土壤中的分解速率各不相同。当凋落物的C/N较高时,其分解速率下降,释放到大气中的CO₂减少,有利于土壤有机碳的累积。

研究表明,不同树种森林类型的土壤呼吸速率差异明显(Raich & Schlesinger,1992)。生长在相同土壤上的针叶林的土壤呼吸速率可比邻近的阔叶林低10%左右(Raich & Tufekcioglu,2000)。Weber(1990)观测到白杨林(*Populus tremuloides*)的土壤呼吸速率明显比附近松树林的高。Hudgens等(1997)也观测到阔叶林的土壤呼吸速率比附近松树(*Pinus sylvestris*)人工林的高。骆土寿等(2001)观测到海南岛尖峰岭热带山地雨林的土壤呼吸速率为4.7 g C · m⁻² · d⁻¹,而秦岭及北京地区油松(*P. tabulaeformis*)林地的土壤呼吸速率仅为1.0 g C · m⁻² · d⁻¹左右(刘绍辉等,1998),二者相差近5倍。

可见,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的较大差异。

1.2 林龄或轮伐期

人工林在生长过程中碳贮量不断增长,所以人工林在固碳方面的贡献取决于轮伐期的长短(Liski *et al.*,2001)。关于造林后土壤碳的变化情况有许多深入研究。在温带地区,有研究认为,造林能够在短期内增加土壤碳储量(Garten,2002),也有研究表明,造林后土壤碳储量通常是最初下降,然后才开始积累(Turner & Lambert,2000;Peltoniemi *et al.*,2004)。Paul等(2002)对全球204个造林样地的土壤碳数据分析发现,在造林后最初5年,土壤碳下降约3.64%,之后逐渐增加。约30年后,土壤表面0~30 cm的碳储量通常高于最初的农田土壤。Vesterdal等(2002)的研究也发现,5 cm表土层的土壤碳密度和碳储量随林分年龄增长而增加,而在5~25 cm深度则随年龄增加而下降。研究表明,从农田到人工林的土地利用转变,使得土壤碳储量增加了18%(Guo *et al.*,2002)。李跃林等(2002)对广东鹤山马占相思林(*Acacia mangium*)造林前后0~100 cm土层碳储量的对比研究发现,造林后14年,人工林土壤下层有机碳含量大大提高。白雪爽等(2008)对不同树龄杨树人工林的土壤碳储量研究表明,与对照农田相比,5年生杨树人工林0~60 cm土壤有机碳储量下降了31%,而10和15年生杨树人工林土壤有机碳储量分别增加了47%和41%。所以,造林后土壤碳的变化情况及变化速率存在较大差异,这种差异与造林前土地利用方式、气候条件和土壤质地等因素有关。一般认为,延长轮伐期有利于人工林土壤的碳积累(Liski *et al.*,2001)。

林龄与土壤呼吸的关系存在较大不确定性。有研究发现,随林龄增加,火炬松人工林(*P. taeda*)的土壤呼吸作用会加强(Wiseman & Seiler,2004)。但也有研究认为,土壤呼吸随林龄增加而减弱。如Joshi等(1997)发现,杨树(*P. deltoides*)人工幼林的土壤呼吸速率为239 mg CO₂ · m⁻² · h⁻¹,而近熟林的土壤呼吸速率下降到169 mg CO₂ · m⁻² · h⁻¹。Tedeschi等(2006)的研究也表明,橡树(*Quercus ceris*)林的土壤呼吸速率随林龄增加而下降。

土壤的碳积累取决于碳输入与碳释放之间的平衡,林龄对这2个过程的影响机制不同,使得最终对土壤碳库储量的估算存在很大不确定性。到目前为止,树龄对土壤碳库的影响机理还没有一个统一的

认识,尤其是针对人工林的研究还非常薄弱。

1.3 灌溉

人工林的快速生长与源源不断的水分供应密切相关,尤其在干旱地区,水资源是人工林培育的主要影响因素。土壤水分也是影响土壤碳排放的主要因子之一。灌溉可以显著改变土壤水分和温度条件。在一定范围内,土壤水分的增加将促进土壤呼吸作用的增加(Keith *et al.*, 1997; Conant *et al.*, 2004)。Davidson 等(2000)的研究表明,土壤水分是影响土壤呼吸的重要因素,在亚马逊河东部地区,草地和森林的土壤呼吸速率均随土壤水分增加而增加。Jabro 等(2008)发现,适度灌溉增加了土壤呼吸作用,不利于土壤碳固存。而当土壤水分大于一定的生理阈限时,土壤水分的增加将导致土壤通透性变差,土壤缺氧将导致根系死亡,引起根系呼吸作用减小,并使 CO₂ 在土壤中的扩散阻力增大(Cavelier *et al.*, 1990)。Gaumont-Guay 等(2006)发现,杨树人工林在降雨后,土壤呼吸速率由 3.6 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹ 快速增加到 9.0 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹。但当土壤水分高于 25% ~ 30% 时,土壤呼吸速率则受到明显抑制。一般来说,当土壤含水量低于萎焉系数或高于最大田间持水量时,土壤碳排放量都会明显减少。灌溉对人工林土壤碳储量的影响还未见有相关报道。

总之,目前的研究结果存在较大差异。土壤水分对土壤碳释放的影响机理比较复杂,除物种对土壤含水量的适应性不同外,还可能与不同土壤类型的田间持水力范围密切相关。

1.4 采伐

森林采伐可以直接造成人工林生物碳库的急剧下降,同时可以改变林下土壤结构和水热条件,引起有机质分解速率和根呼吸速率的变化,而且土壤裸露会加剧土壤侵蚀和淋溶作用,进而影响到林地土壤的碳汇功能。一般认为,森林采伐会导致土壤碳的损失,尤其在采伐后的几年里,有机物分解引起的碳排放超过碳输入,使得林地土壤为一个净碳源。研究表明,在森林收获后的 20 年内土壤有机碳储量将会急剧下降近 50% (Covington, 1981),且需经 20 ~ 50 年才可使土壤碳含量增加(Black & Harden, 1995)。这是因为采伐不仅降低了土壤有机物的输入量,同时促进了它的矿化(Yanai *et al.*, 2003)。但

采伐后,将采伐剩余物,包括枯枝落叶和倒木留在林内,经分解和淋溶作用而自然腐烂,有可能弥补有机物输入量的减少,增加土壤有机碳含量(Nilsen *et al.*, 2008)。Johnson 等(1992)在总结采伐对土壤碳影响的基础上发现,采伐后腐殖质层土壤碳平均增加了 5%。且采伐方式对土壤碳变化影响显著,锯材方式可使土壤碳增加 18%,而全木采伐使土壤碳减少 6%。

关于采伐对土壤呼吸的影响尚未形成共识,研究结果差异较大。有研究表明,采伐后土壤呼吸速率有增加现象。Gordon 等(1987)观测到云杉林(*Picea glauca*)皆伐后土壤呼吸明显增加,且夏季增加更为显著。Lytle 等(1998)也发现,针叶林皆伐地比对照土壤呼吸高 16%,与皆伐后细根分解产生大量的 CO₂ 有关。Ewel 等(1987)认为,湿地松(*P. elliotii*)人工林皆伐地土壤 CO₂ 释放量增高,与较高的地温和采伐剩余物分解有关。另有研究表明,杉木林(*Cunninghamia lanceolata*)皆伐后前 4 个月土壤呼吸显著高于对照,伐后 1 年内的平均土壤呼吸则与对照无显著差异(杨玉盛, 2005)。Striegl 和 Wickland(1998)观察到皆伐使北美短叶松(*P. banksiana*)土壤呼吸在第一个生长季下降了 50%,数年后,地面植物的重新定居以及采伐剩余物的分解使土壤呼吸增加了 40%。Weber(1990)报道安大略省东部的白杨林,在皆伐后前 2 个生长季节土壤呼吸呈下降趋势,第 3 个生长季恢复到原来水平。王旭等(2007)研究了长白山阔叶红松林伐后 13 年的土壤呼吸作用。结果表明,整个生长季节皆伐迹地土壤呼吸速率约为林地的 75%。

森林采伐后生物量减少和微环境改变是造成土壤呼吸作用发生变化的主要原因。林分的郁闭度不同,造成林内光照、热量条件的改变,从而改变林下的土壤温度和水分,影响土壤呼吸速率。可见,采伐前后土壤碳储量及排放量会发生明显改变,采取合理的采伐技术是减少碳排放,增强土壤碳汇的重要手段。

1.5 施肥

施肥是人工林经营中普遍应用的一项管理措施。许多森林生态系统受氮素限制,增加氮输入能够大大提高植被生产力,同时增加凋落物量。许多研究表明,施肥增加了地上与地下的凋落物量,有利

于土壤碳储量的增加 (Johnson, 1992)。施肥也可能通过对凋落物和土壤 C/N 的改变影响土壤呼吸作用。土壤 C/N 下降,使土壤微生物的活性提高,加速了土壤碳和枯枝落叶层有机碳的分解矿化,会增加土壤 CO₂ 的排放,最终影响土壤有机碳储量。

土壤养分如氮有效性会影响光合产物在地上和地下的分配格局。有研究发现,土壤养分增加导致光合产物在根系中的分配比例减少,从而使根系呼吸作用减弱。Lee 等(2003)在佛罗里达州的研究表明,施氮肥使三叶杨(*P. deltoides*)的土壤呼吸有明显下降。Keith 等(1997)观察到桉树(*E. pauciflora*)林在增加磷肥后,地上干物质增加的同时,土壤呼吸降低 8%。Maier 等(2000)研究了施肥对火炬松(*P. taeda*)人工林土壤呼吸的影响,发现未施肥林分的土壤呼吸($3.22 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)比施肥林分的($2.80 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)高 13%。而在德国挪威云杉(*P. abies*)林中,施肥后第 2 年土壤呼吸速率明显增加,第 3 年有所降低 (Borken *et al.*, 2002)。Gallardo 等(1994)观察到暖温带森林施氮肥后,土壤的呼吸作用有所提高。Oren 等(2001)观测到施肥对火炬松(*P. taeda*)人工林土壤呼吸的影响并不明显。可见,施肥对土壤碳释放的影响目前还没有形成共识。

总之,管理措施对人工林土壤碳汇功能影响巨大。人工林经营措施可直接改变林地的水热因子、养分因子和土壤结构,从而影响土壤有机碳和土壤呼吸等碳循环过程,是调控生态系统土壤碳收支的更重要因素。合理的经营方式是增强土壤碳汇、减缓温室效应的重要途径 (Jandl *et al.*, 2007; Waterworth & Richards., 2008)。

2 研究展望

综上所述,虽然目前已经开展了一些人工林经营措施对土壤碳影响的研究,但是,这些研究还很不全面,且关于经营措施是如何协同影响土壤碳储量与碳排放过程,并没有一个系统完整的认识;且研究结果存在较大差异。概括起来,未来关于人工林土壤固碳应加强以下方面研究。

总体上,国内外人工林固碳研究仍主要集中在如何通过管理手段来提高人工林生产力,特别是长期以来,较多研究集中在营林措施对人工林地上蓄

积量和生物量碳的影响,没有或很少考虑这些措施对土壤碳库及其动态的影响。因此,未来应加强这方面的研究,并在估算造林对陆地碳汇的贡献时,应将土壤碳库储量及其动态包括在内。

人工林生态系统是一个动态碳库。在自然状态下,随着森林的生长和成熟,森林吸收 CO₂ 的能力降低,直到趋于碳平衡状态。在林业实践中,通常只根据树木的生长速率和蓄积量确定轮伐期,而很少考虑人工林的碳累积,尤其是土壤的碳累积,即采伐时人工林固碳效益不一定达到最大。在一个轮伐期内,随树木的生长节律,土壤固碳效率会发生改变。所以,未来应加强轮伐期对土壤碳的影响研究,如人工林究竟在什么生长阶段土壤固碳效率最高,或从碳源转换为碳汇的时间等。

目前,关于土壤碳平衡的研究相对薄弱,且大多集中于天然林。对人工林土壤碳循环的研究依赖于对土壤呼吸作用的准确估算。目前很少开展经营措施对土壤呼吸作用影响的综合观测。而且到目前为止,关于人工林土壤呼吸各组分的定量研究非常少,未来有待于进一步加强。

综上所述,研究经营措施对人工林土壤碳库的影响,必须同时考虑经营措施对土壤碳储量和土壤碳排放量的共同影响,通过合理的经营模式增强人工林的土壤碳汇功能,这对减缓全球气候变化具有十分重要的意义。

参考文献

- 白雪爽, 胡亚林, 曾德慧, 等. 2008. 半干旱沙区退耕还林对碳储量和分配格局的影响. 生态学杂志, **27**(10): 1647-1652.
- 常宗强, 冯 起, 司建华, 等. 2008. 祁连山不同植被类型土壤碳贮量和碳通量. 生态学杂志, **27**(5): 681-688.
- 方精云, 陈安平. 2001. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, **43**(9): 967-973.
- 冯瑞芳, 杨万勤, 张 健. 2006. 人工林经营与全球变化减缓. 生态学报, **26**(11): 3870-3876.
- 胡会峰, 刘国华. 2006. 森林管理在全球 CO₂ 减排中的作用. 应用生态学报, **17**(4): 709-714.
- 李跃林, 胡成志, 张 云, 等. 2004. 几种人工林土壤碳储量研究. 福建林业科技, **31**(4): 4-7.
- 李跃林, 彭少麟, 赵 平, 等. 2002. 鹤山几种不同土地利用方式的土壤碳储量研究. 山地学报, **20**(5): 548-552.
- 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 2000. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. 生态学报, **20**(5): 733-740.
- 刘绍辉, 方精云, 清田信. 1998. 北京山地温带森林的土壤

- 呼吸. 植物生态学报, **22**(2): 119–126.
- 骆土寿, 陈步峰, 李意德, 等. 2001. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究. 生态学报, **21**(12): 2013–2017.
- 史军, 刘纪远, 高志强, 等. 2005. 造林对土壤碳储量影响的研究. 生态学杂志, **24**(4): 410–416.
- 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 2007. 长白山阔叶红松林皆伐迹地土壤呼吸作用. 植物生态学报, **31**(3): 355–362.
- 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 2005. 皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响. 土壤学报, **42**(4): 584–590.
- 张小全, 武曙红, 何英, 等. 2005. 森林、林业活动与温室气体减排增汇. 林业科学, **41**(6): 150–156.
- 张新平, 王襄平, 朱彪, 等. 2008. 我国东北主要森林类型的凋落物产量及其影响因素. 植物生态学报, **32**(5): 1031–1040.
- 周莉, 李保国, 周广胜. 2005. 土壤有机碳的主导影响因素及其研究进展. 地球科学进展, **20**(1): 99–105.
- Berthrong ST, Jobbagy EG, Jackson RB. 2009. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation. *Ecological Applications*, **19**: 2228–2241.
- Black TA, Harden JW. 1995. Effect of timber harvest on soil carbon storage at Blodgett experimental forest, California. *Canadian Journal of Forest Research*, **25**: 1385–1396.
- Borken W, Muhs A, Beese F. 2002. Application of compost in spruce forests: Effects on soil respiration, basal respiration and microbial biomass. *Forest Ecology and Management*, **159**: 49–58.
- Cavelier J, Penuela MC. 1990. Soil respiration in the cloud forest and dry deciduous forest of Serrania of Macuira, Colombia. *Biotropica*, **22**: 346–352.
- Conant RT, Dalla-Betta P, Klopatek CC, et al. 2004. Controls on soil respiration in semiarid soils. *Soil Biology & Biochemistry*, **36**: 945–951.
- Covington WW. 1981. Changes in forest floor organic matter and nutrient content following clear cutting in northern hardwoods. *Ecology*, **62**: 41–48.
- Davidson EA, Verchot LV, Cattanio JH, et al. 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pasture of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, **48**: 53–69.
- Ewel KC, Cropper WP Jr. 1987. Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantation. 1. Changes through time. *Canadian Journal of Forest Research*, **17**: 325–329.
- Gallardo A, Schlesinger WH. 1994. Factors limiting microbial biomass in the mineral soil and forest floor of a warm-temperate forest. *Soil Biology & Biochemistry*, **26**: 1409–1415.
- Garten CT Jr. 2002. Soil carbon storage beneath recently established tree plantations in Tennessee and South Carolina, USA. *Biomass and Bioenergy*, **23**: 93–102.
- Gaumont-Guay D, Black TA, Griffis TJ, et al. 2006. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, **140**: 220–235.
- Gordon AM, Schlenter RE, van CK. 1987. Seasonal patterns of soil respiration and CO₂ evolution following harvesting in the white spruce forests of interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, **17**: 304–310.
- Guo LB, Gifford RM. 2002. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, **8**: 345–360.
- Hudgens E, Yavitt JB. 1997. Land-use effects on soil methane and carbon dioxide fluxes in forests near Ithaca, New York. *Ecoscience*, **4**: 214–222.
- IPCC. 2001. Climate change 2001: The scientific basis// Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Jabro JD, Sainju U, Stevens WB, et al. 2008. Carbon dioxide flux as affected by tillage and irrigation in soil converted from perennial forages to annual crops. *Journal of Environmental Management*, **88**: 1478–1484.
- Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, et al. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, **137**: 253–268.
- Johnson DW. 1992. Effects of forest management on soil carbon storage. *Water, Air, and Soil Pollution*, **64**: 83–120.
- Joshi M, Bargali K, Bargali SS. 1997. Changes in physico-chemical properties and metabolic activity of soil in poplar plantations replacing natural broad-leaved forests in Kumaun Himalaya. *Journal of Arid Environments*, **35**: 161–169.
- Keith H, Jacobsen KL, Raison RJ. 1997. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest. *Plant and Soil*, **190**: 127–141.
- Lal R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, **220**: 242–258.
- Lee KH, Jose S. 2003. Soil respiration, fine root production, and microbial biomass in cottonwood and loblolly pine plantations along a nitrogen fertilization gradient. *Forest Ecology and Management*, **185**: 263–273.
- Leighty WW, Hamburg SP, Caouette J. 2006. Effects of management on carbon sequestration in forest biomass in Southeast Alaska. *Ecosystems*, **9**: 1051–1065.
- Lindner M, Green T, Woodall CW, et al. 2008. Impacts of forest ecosystem management on greenhouse gas budgets. *Forest Ecology and Management*, **256**: 191–193.
- Liski J, Pussinen A, Pingoud K, et al. 2001. Which rotation length is favourable to carbon sequestration? *Canadian Journal of Forest Research*, **31**: 2004–2013.
- Lytle DE, Cronan CS. 1998. Comparative soil CO₂ evolution, litter decay, and root dynamics in clearcut and uncut spruce-fir forest. *Forest Ecology and Management*, **103**: 121–128.
- Maier CA, Kress LW. 2000. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability.

- Canadian Journal of Forest Research*, **30**: 347–359.
- Nilsen P, Strand LT. 2008. Thinning intensity effects on carbon and nitrogen stores and fluxes in a Norway spruce (*Picea abies* L.) stand after 33 years. *Forest Ecology and Management*, **256**: 201–208.
- Oostra S, Majdi H, Olsson M. 2006. Impact of tree species on soil carbon stocks and soil acidity in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **21**: 364–371.
- Oren R, Ellsworth DS, Johnsen KH, et al. 2001. Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO₂ enriched atmosphere. *Nature*, **411**: 469–472.
- Paul KI, Polglase PJ, Nyakuengama JG, et al. 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, **168**: 241–257.
- Peltoniemi M, Mäkipää R, Liski J, et al. 2004. Changes in soil carbon with stand age – An evaluation of a modeling method with empirical data. *Global Change Biology*, **10**: 2078–2091.
- Raich JW, Schlesinger WH. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, **44B**: 81–99.
- Raich JW, Tufekcioglu A. 2000. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, **48**: 71–90.
- Sartori F, Lal R, Ebinger MH, et al. 2007. Changes in soil carbon and nutrient pools along a chronosequence of poplar plantations in the Columbia Plateau, Oregon. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, **122**: 325–339.
- Schulp CJE, Nabuurs GJ, Verburg PH. 2008. Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories. *Forest Ecology and Management*, **256**: 482–490.
- Striegl RG, Wickland KP. 1998. Effects of a clear-cut harvest on soil respiration in a jack pine-lichen woodland. *Canadian Journal of Forest Research*, **28**: 534–539.
- Tedeschi V, Reyw A, Manca G. 2006. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after coppicing. *Global Change Biology*, **12**: 110–121.
- Turner J, Lambert M. 2000. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, **133**: 231–247.
- Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. 2002. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management*, **169**: 137–147.
- Waterworth RM, Richards GP. 2008. Implementing Australian forest management practices into a full carbon accounting model. *Forest Ecology and Management*, **255**: 2434–2443.
- Weber MG. 1990. Forest soil respiration after cutting and burning in immature aspen ecosystems. *Forest Ecology and Management*, **31**: 1–14.
- Wiseman PE, Seiler JR. 2004. Soil CO₂ efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont. *Forest Ecology and Management*, **192**: 297–311.
- Yanai RD, Currie WS, Goodale CL. 2003. Soil carbon dynamics after forest harvest: An ecosystem paradigm reconsidered. *Ecosystems*, **56**: 197–212.

作者简介 闫美芳,女,1969年出生,博士后。主要从事森林生态系统碳循环研究。E-mail: b09100@bnu.edu.cn

责任编辑 王伟
