

# 农林复合系统固碳潜力研究进展

平晓燕\* 王铁梅 卢欣石

北京林业大学林学院, 北京 100083

**摘要** 农林复合系统是解决当前资源枯竭、农林用地紧张和实现环境保护的一种可持续土壤管理模式。自《京都议定书》签订以来, 农林复合系统因其较高的固碳潜力引起了科学家的广泛关注。深入理解农林复合系统的固碳过程及其对气候变化、环境条件的改变和管理措施的影响, 是准确地预测农林复合系统在全球变化情景下固碳潜力的关键。该文综述了农林复合系统的概念和分类, 探讨了农林复合系统相比单一系统的固碳潜力及固碳机理, 分析了农林复合系统固碳潜力的测定方法和当前面临的挑战, 综述了气候因子、环境条件和人为管理措施对农林复合系统固碳潜力的影响。我国农林复合系统的固碳潜力相比全球其他区域还处于较低水平, 为提高我国农林复合系统的固碳潜力, 未来需要加强以下四个方面的工作: 扩大农林复合系统的分布面积、加强农林复合系统的合理配置和管理、选择适宜的物种组合和优化系统的群体结构。

**关键词** 农林复合系统, 固碳潜力, 碳储量, 全球变化, 管理措施

## Review of advances in carbon sequestration potential of agroforestry

PING Xiao-Yan\*, WANG Tie-Mei, and LU Xin-Shi

College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

### Abstract

Agroforestry is regarded as a sustainable land-use management due to its potential for solving the problem of resource deficiency, improving the livelihood of rural areas and reducing environmental degradation. Agroforestry has attracted considerable scientific attention since the Kyoto Protocol because it has relatively high potential for carbon sequestration. Comprehensively understanding the process of carbon sequestration in agroforestry and its response to climate change, environmental variation and management practices is essential for predicting the carbon sequestration potential of agroforestry under varying climate and land-use patterns. This paper first reviews the concept and classification of agroforestry and then proposes the mechanism of higher carbon sequestration in agroforestry systems compared with monocropping or monoculture pasture systems. Furthermore, the methods used for quantifying the carbon sequestration potential of agroforestry and the present challenges are discussed. Based on the systematic review of previous studies, the effects of climatic factors, environmental conditions and management practices on carbon sequestration potential of agroforestry are illustrated. The carbon sequestration potential of agroforestry is relatively low in China compared with other regions around the world. In order to improve the carbon sequestration potential of agroforestry, future studies should focus on enlarging the area of agroforestry, developing appropriate designs and management of agroforestry, selecting appropriate species composition and optimizing the multi-layer structure of agroforestry.

**Key words** agroforestry, carbon sequestration potential, carbon stock, global change, management practices

农林复合系统(agroforestry)能够实现粮食生产、缓解贫困和环境保护三者的平衡发展, 是解决当前资源枯竭、农林用地矛盾等问题的可持续土地管理模式(Izac & Sanchez, 2001; Pandey, 2002)。全球发展中国家约有12亿人口依赖于农林复合系统, 随着人口数量的增长, 为满足资源的供应, 农林复合系统的比例将会持续增加(Oelbermann *et al.*, 2004)。

人类活动导致温室气体排放的增加, 引起全球温度和降水格局的改变。如何减缓温室气体特别是CO<sub>2</sub>的排放和降低大气中温室气体含量, 是当前世界各国政府和研究者致力解决的问题(Parry, 2007; Srivastava *et al.*, 2012)。碳固存是指吸收大气中的CO<sub>2</sub>并将其存储在长期碳库中的过程(Nair *et al.*, 2010; Udawatta & Jose, 2012)。对农林复合系统而言,

碳固存主要是植物光合作用固定大气中的CO<sub>2</sub>, 然后将其固定在植物、腐殖质及土壤碳库中长期储存的过程(Nair, 2011a)。自《京都议定书》签订以来, 其提出的土地利用、土地利用变化和林业活动(LULUCF)对固碳潜力的影响在全球范围内掀起了碳固存的研究热潮(Takimoto, 2007)。其中, 农林复合系统的固碳潜力近年来引起了科学家的广泛关注。有研究认为农林复合系统是固存大气中CO<sub>2</sub>的最适宜的一种土地管理模式(Dagang & Nair, 2003; Saha, 2008; Jose, 2009; Dube *et al.*, 2012)。Albrecht和Kandji (2003)的预测结果表明: 农林复合系统如果布局合理, 在未来50年内, 可以从大气中吸收1.1–2.2 Pg C。因此, 研究农林复合系统的固碳潜力及其影响因素对深入理解陆地生态系统的碳循环过程和缓解气候变化具有重要的意义(Thangata & Hild-ebrand, 2012; Udawatta & Jose, 2012)。

对花粉的研究结果表明, 农林复合系统已有至少1 300年的历史, 但是直到近30年, 科学家对农林复合系统的认识才从一种传统的农作方式转变为对自然资源的合理利用和减轻贫困的可持续土地管理措施(Sanchez, 1995)。许多学者从农林复合系统的类别(Nair, 1985, 1993; 李文华和赖世登, 1994; 孟平等, 2003)、生态服务功能如增加生物多样性(Jose, 2009; Nair, 2011b)、增加土壤肥力和改善养分循环(Sharrow & Ismail, 2004; 李贤伟等, 2009; Nair, 2011c)、保持水土(孟平等, 2003; 曾艳琼和卢欣石, 2008)、改善林内小气候(Menezes *et al.*, 2002; 樊巍和高喜荣, 2004)等多个方面进行了研究, 但对农林复合系统固碳增汇这一重要的生态服务功能的报道不多(Takimoto, 2007), 国内的研究则更少。因此, 本文从农林复合系统的概念和分类入手, 综述了农林复合系统的固碳潜力及其研究进展, 分析了农林复合系统相比单一系统的固碳机理及其影响因素, 阐述了固碳潜力的估算方法, 提出了提高农林复合系统固碳潜力的管理措施, 以期农林复合系统的可持续发展和固碳功能的充分发挥提供理论依据。

## 1 农林复合系统的概念、分类及其固碳潜力

### 1.1 农林复合系统的概念和分类

农林复合系统是指将土地利用和工程应用技术相结合, 有目的地将多年生木本植物(乔木、灌

木、棕榈、竹类等)与农业(农作物、药用植物、经济作物或真菌)或牧业用于同一土地经营单位, 并采取时空排列法或短期相间的经营方式, 使农业、林业和牧业在不同的组合之间存在生态学与经济学相互作用的一种土地管理模式(ICRAF, 1982; Nair, 1993)。由于不同区域的气候条件、自然环境、经济和社会状况的差异, 不同学者对农林复合系统的表述具有明显的地域性特征, 但其本质都可以概括为农林复合系统是以生态学、经济学和系统工程学为基本理论, 依据生物学特性进行物种的时空配置, 形成多物种、多层次、多时序和多产业的人工复合经营系统(孟平等, 2003)。

农林复合系统在全球广泛分布, 以10%的农田森林覆盖率为计算依据, 全球农林复合系统的总面积超过1 000 Mhm<sup>2</sup>, 占全球耕地面积的46%, 主要集中在南美洲、非洲撒哈拉和东南亚的热带地区(Watson *et al.*, 2000; Zomer *et al.*, 2009)。我国农林复合系统的总面积为45–76 Mhm<sup>2</sup> (Zou & Sanford, 1990; Sathaye & Ravindranath, 1998)。农林复合系统的类型取决于当地的气候条件和经济管理水平, 不同区域或气候带所决定的农林复合系统类型之间相差较大, 因此, 截至目前, 全球农林复合系统还没有统一的分类标准。亚洲农林复合系统集中在东南亚, 以缅甸的Taungya系统和家庭果园为代表类型, 主要为柚木与农作物间作(Zomer *et al.*, 2009); 非洲是全球农林复合系统研究和推广的重点区域, 主要类型为农林间作和林草复合系统(Luedeling *et al.*, 2011); 欧洲农林复合系统的规模小于亚洲和非洲, 主要类型包括林草复合系统和林农间作(Mosquera-Losada *et al.*, 2011); 北美洲的农林复合系统主要集中在美国, 包括河岸缓冲带、防风带、农林间作、林草复合系统、森林农业和特殊用途农林业等6大类, 其中林草复合系统的面积最大(Schoeneberger, 2009; Udawatta & Jose, 2012); 中、南美洲的农林复合系统以果树-农作物和果树-牧草间作为主; 大洋洲的农林复合系统以林草复合系统为主(Gordon & Newman, 1997)。Nair (1985)总结了全球的农林复合系统类型, 按照系统内各组分的产业组合特征将其划分为农林复合系统(agrisilviculture)、林牧复合系统(silvopastoral)、农林牧复合系统(agrosilvopastoral)和其他复合系统(others)等四大类。我国农林复合系统的分类研究始于20世纪90年

代, Zou和Sanford (1990)最早将我国的农林复合系统分为7个类型和26个单元。李文华和赖世登(1994)依据农林复合系统的地理空间格局将其划分为庭院经营系统、田间生态系统和区域景观系统等三大类,其中,田间生态系统又依据系统内组分的种类和比例划分为农林复合、林果复合、林药复合和林畜渔复合等16个类型组和215个类型。孟平等(2003)结合国内外研究结果和我国的生产实践特点,将我国农林复合系统分为林(果)农复合型、林牧(渔)复合型、林(果)农牧(渔)复合型和特种农林复合型等四大类。我国农林复合系统的典型代表包括热带地区的胶茶系统、基塘系统、洼地农林复合系统、华北平原的农桐间作及北方地区广泛分布的农田防护林体系等(孟平等, 2003)。

### 1.2 农林复合系统的固碳潜力

不同研究者对固碳潜力的表述随研究目的的不同而有所差异,有学者将固碳潜力定义为特定目标年和环境背景下,生态系统可能达到的最大固碳能力(于贵瑞等, 2011);有学者将其表述为碳储量相对于对照的长期平均增长量(Sampson *et al.*, 2000),其中对照或基准值可以为无林的农田或草地、退化农林复合系统或现有农林复合系统(Montagnini & Nair, 2004; Mosquera-Losada *et al.*, 2011; Luedeling & Neufeldt, 2012)。也有研究者提出固碳潜力包括理论固碳潜力和实际固碳潜力,理论固碳潜力是由植物自身生长特性、气候和环境条件共同决定的;实际固碳潜力是在社会、经济因素和管理条件限制下所能达到的固碳潜力(Cannell, 2003)。Luedeling等(2011)对以上概念进行了整合和修改,提出适宜于农林复合系统的固碳潜力,共包括以下4个层次: 1)生物固碳潜力(biophysical potential),是指在特定的光照、温度、降水和土壤等气候和环境条件下,不受管理、社会和经济因素限制的某一区域农林复合系统所能达到的最大固碳能力,也称理论固碳潜力。生物固碳潜力有利于不同区域或不同类型农林复合系统固碳潜力间的比较,因此当前对农林复合系统固碳潜力的研究主要集中在生物固碳潜力。2)技术固碳潜力(technical potential),是指在生物固碳潜力的基础上,在满足农田管理措施、技术措施和生态系统输入(化肥和灌溉)等条件下所能达到的固碳潜力。3)经济固碳潜力(economic potential),是指在考虑农田管理措施的经济成本和效益的基础上

所能达到的固碳潜力。4)实际固碳潜力(practical potential),是指在考虑农林复合系统的社会认可度、劳动力有效性、土地使用周期、政策支持和市场导向等因素下所能达到的实际固碳潜力。实际固碳潜力有助于评价农户的经济收益和制定相关政策。有研究表明,实际固碳潜力仅为生物固碳潜力的10%–20% (Smith *et al.*, 2007)。研究农林复合系统的固碳潜力需要同时关注这4个组分,但当前的研究大多只关注生物固碳潜力和(或)实际固碳潜力(Luedeling *et al.*, 2011)。国际上通用的固碳潜力的表述为某一区域或某一生态系统每年所固存的碳( $\text{Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$ ),可用固碳速率与分布面积的乘积计算得到(Udawatta & Jose, 2012)。

农林复合系统固碳潜力的高低取决于其分布面积和固碳速率,当前对不同类型农林复合系统的分布面积还没有准确的估算,这是由于农林复合系统中木本植物的分布很不规则,因此很难准确地描述木本植物的影响边界。不同区域、不同类型农林复合系统的固碳速率相差很大( $0.22\text{--}16.1 \text{ Mg C}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ),全球农林复合系统未来50年的固碳潜力为 $1.2\text{--}2.2 \text{ Pg C}\cdot\text{a}^{-1}$ (表1),我国农林复合系统未来30年的固碳潜力为 $37.95 \text{ Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$ ,平均固碳速率为 $0.5 \text{ Mg C}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,相比全球平均值( $0.72 \text{ Mg C}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )或其他国家和地区还处于较低的水平。相对而言,热带湿润地区的固碳速率要高于温带干旱和半干旱地区(表1),南亚和东南亚热带地区的庭院复合系统、非洲热带湿润地区和南美洲热带地区都具有较高的固碳潜力。温带农林复合系统中林草复合型的固碳潜力较高,Udawatta和Jose (2011)的研究表明,美国林草复合系统的固碳速率为 $6.1 \text{ Mg C}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,固碳潜力为 $474 \text{ Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$ ,占农林复合系统总固碳潜力的86%。印度建植9年林草复合系统的固碳速率为 $1.96 \text{ Mg C}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,相比其他类型也具有较高的固碳优势(Yadava, 2010)。

### 1.3 农林复合系统与单一系统固碳潜力的比较

与单纯的农业或林业系统不同,农林复合系统通过在空间和时间上的精心配置,能够分层多级地利用环境资源,使系统的光能利用率和生产力都有了较大程度的改善,进而提高了生态系统的固碳潜力(Oelbermann *et al.*, 2004),具体表现在:具有更高的植被生产力、凋落物输入量和土壤有机碳含量,特别是在深层土壤内(Albrecht & Kandji, 2003;

表1 全球不同区域农林复合系统的固碳潜力

Table 1 Carbon sequestration potential of agroforestry in different regions around the world

区域 Region	农林复合系统类型 Agroforestry type	固碳速率 Carbon sequestration rate (Mg C·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	估算时间 Calculation time (a)	分布面积 Distribution area (Mhm <sup>2</sup> )	固碳潜力 Carbon sequestration potential	参考文献 Reference	
全球 World	农林复合型 Agroforestry	0.72	50	585-1 215	1.2-2.2 Pg C·a <sup>-1</sup>	Watson <i>et al.</i> , 2000 Dixon, 1995	
非洲 Africa	加纳 Ghana	农林复合型 Agroforestry	0.34-2.32	38	2.5	0.85-5.8 Tg C·a <sup>-1</sup>	Sathaye & Ravin- dranath, 1998
	喀麦隆 Cameroon	农林复合型 Agroforestry	0.53-1.93	30	1.6	0.85-3.09 Tg C·a <sup>-1</sup>	Sathaye & Ravin- dranath, 1998
	东非 East Africa	农林复合型 Agroforestry	0.4-0.8	20-25			Luedeling <i>et al.</i> , 2011
	南非 South Africa	农林复合型 Agroforestry	0.5-1.2	6-25			Luedeling <i>et al.</i> , 2011
	西非撒哈拉 West Africa Sahel	农林牧复合型 Agroforestry	0.4	50	27.87	11.15 Tg C·a <sup>-1</sup>	Luedeling <i>et al.</i> , 2011
		农林复合型 Agroforestry	4.17	10			Thangata & Hildebrand, 2012
		林牧复合型 Silvopastoral	0.22-0.4	50			Luedeling <i>et al.</i> , 2011
南美洲 South America	墨西哥 Mexico	农林复合型 Agroforestry	0.55	38	1.9	1.04 Tg C·a <sup>-1</sup>	Sathaye & Ravin- dranath, 1998
	湿润热带低地 Humid tropical lowland	农林复合型 Agroforestry	0.78-2.04	50			Albrecht & Kandji, 2003
	干旱低地 Dry lowland	农林复合型 Agroforestry	0.78-3.9	50			Albrecht & Kandji, 2003
澳大利亚 Australia	湿润热带低地 Humid tropical lowland	林牧复合型 Silvopastoral	0.56-1.02	50			Albrecht & Kandji, 2003
北美洲 North America	湿润热带高地 Humid tropical highland	林牧复合型 Silvopastoral	2.68-3.08	50			Albrecht & Kandji, 2003
	干旱低地 Dry lowland	林牧复合型 Silvopastoral	1.8-3.5	50			Albrecht & Kandji, 2003
	美国 USA	植物篱 Alley cropping	3.4	10	80	272 Tg C·a <sup>-1</sup>	Montagnini & Nair, 2004
		林牧复合型 Silvopastoral	6.1		77.7	474 Tg C·a <sup>-1</sup>	Udawatta & Jose, 2011
		防风带型 Windbreaks	0.97	20	8.95	8.6 Tg C·a <sup>-1</sup>	Montagnini & Nair, 2004
		河岸缓冲区 Riparian buffer	2.6	50	1.69	4.7 Tg C·a <sup>-1</sup>	Montagnini & Nair, 2004
	加拿大 Canada	农林复合型 Agroforestry	16.10	13			Peichl <i>et al.</i> , 2006
		农林复合型 Agroforestry	4.00	13			Peichl <i>et al.</i> , 2006
亚洲 Asia	蒙古 Mongolia	农林复合型 Agroforestry	0.33	30			Sathaye & Ravin- dranath, 1998
	南亚和东南亚 South and southeast Asian	庭院复合型 Homegarden	8.0		8.0	64 Tg C·a <sup>-1</sup>	Zomer <i>et al.</i> , 2009
	中国 China	农林复合型 Agroforestry	0.5	30	75.9	37.95 Tg C·a <sup>-1</sup>	Sathaye & Ravin- dranath, 1998
	巴基斯坦 Pakistan	农林复合型 Agroforestry	0.99	30	1.2	1.19 Tg C·a <sup>-1</sup>	Sathaye & Ravin- dranath, 1998
	印度 India	农林复合型 Agroforestry	0.85	30	96.0	81.3 Tg C·a <sup>-1</sup>	Sathaye & Ravin- dranath, 1998
	印度 India	农林复合型 Agroforestry	0.52-2.06	9			Yadava, 2010
	印度 India	林牧复合型 Silvopastoral	1.96	9			Yadava, 2010

1 Mg = 10<sup>6</sup> g, 1 Tg = 10<sup>12</sup> g, 1 Pg = 10<sup>15</sup> g.

Gama-Rodrigues *et al.*, 2010; Luedeling & Neufeldt, 2012; Udawatta & Jose, 2012)。Ibrahim等(2005)研究表明林草复合系统相比草地生态系统, 植被生产力提高了40%。Udawatta和Jose (2012)研究表明花旗松

(*Pseudotsuga menziesii*)-黑麦草(*Lolium perenne*)/地三叶(*Trifolium subterraneum*)复合系统相比开阔草地和花旗松种植园, 其固碳量分别增加了5.8和8.2 Mg C·hm<sup>-2</sup>。Nair等(2009a)对比分析了5个国家的多

个农林复合系统与单一农田或草地生态系统碳储量间的差异, 结果表明农林复合系统会在深层土壤积累更多的碳, 且离木本植物距离越近土壤碳储量越高, 这在北美洲的林草复合系统中也得到了证实 (Haile *et al.*, 2010)。Haile等(2010)的研究表明, 林草复合系统能显著增加0–50 cm (517 vs 450 Mg C·hm<sup>-2</sup>)和75–125 cm (66 vs 21 Mg C·hm<sup>-2</sup>)土层的有机碳含量。热带地区林草复合系统的固碳量比巴西10年生草地增加了3倍(Sampson *et al.*, 2000)。李庆云(2008)的研究表明, 13年生毛白杨(*Populus tomentosa*)-农田复合系统相比单作农田碳储量增加了2倍(127.34 vs 49.36 Mg C·hm<sup>-2</sup>)。

## 2 农林复合系统的固碳机制

农林复合系统相比无林草地、农田或退化生态系统, 其固碳机理主要有以下两个假说。

### 2.1 生长促进假说

该假说认为农林复合系统较高的固碳潜力是由于农林复合系统对植被生长的促进作用大于抑制作用所致(Udawatta & Jose, 2011)。其中, 促进作用主要体现在农林复合系统相比农田或草地生态系统, 群落的层次复杂性加大, 能更好地吸收和利用环境资源(光照、养分和水分), 同时增加了土壤的水分和养分有效性, 进而促进了木本和草本植物的生长; 抑制作用表现在林下草本或农田生态系统获得的太阳辐射相比单一系统有所降低(Haile *et al.*, 2010)。该假说已在印度(Kaur *et al.*, 2002)、美国(Dagang & Nair, 2003)、新西兰(Power *et al.*, 2003)、智利(Dube *et al.*, 2012)、澳大利亚(Ward *et al.*, 2012)和中国西双版纳(萧自位等, 2012)等多个地区的农林复合系统中得到了验证。Dube等(2012)的研究表明, 林草复合系统为草本植物的生长提供了较好的微环境, 土壤含水量的增加和气温的升高延长了草本植物的生长期, 进而增加了其固碳潜力。农林复合系统中豆科植物的存在会增加土壤养分有效性, 促进木本植物的生长(Archer *et al.*, 2001)。农林复合系统通过增加土壤有机质输入量、减少土壤淋溶损失、促进根系周转、提高凋落物的数量和质量 and 改善土壤理化性状等措施来增加土壤碳储量(Kürsten, 2000)。同时, 农林复合系统相比单一农田或草地生态系统具有更快的生长速度、更高的生产力和更深的根系分布, 这些因素促使农林复合系统具有更高

的固碳潜力(Montagnini & Nair, 2004; Saha, 2008)。

### 2.2 光合产物分配格局假说

该假说认为农林复合系统内木本和草本植物通过调整其光合产物分配格局来减少生态位的竞争, 达到互补共存, 进而增加固碳潜力(Haile *et al.*, 2010; Udawatta & Jose, 2011)。农林复合系统内木本和草本植物之间存在对空间、光照、水分和养分等资源的相互竞争, 为最大程度地减少竞争和达到协同互补, 木本和草本植物通过采取不同的生存策略(调整光合产物分配格局)来获取地上和地下的资源和空间, 占据不同的空间生态位(Dagang, 2007)。木本植物生物量的50%–60%甚至75%集中在地上(茎、树干和叶片), 而草本植物地上生物量只占10%, 剩余的90%分配到地下根系(Sharrow & Ismail, 2004; Singh & Lodhiyal, 2009; Udawatta & Jose, 2011, 2012)。同时, 草本植物的根系绝大多数分布在0–20 cm土层, 木本植物为了减少根系空间生态位的重叠, 将光合产物向根系的分配较多地集中在深层土壤, 以此来减少竞争, 达到互补共存, 这种根系垂直分层现象已在很多农林复合系统中得到了验证(Schroth, 1998; Dagang, 2007)。Oelbermann等(2005)的研究表明: 在农林复合系统的建植初期, 4年生木本植物根系获得的光合产物有56%被用于20–40 cm土层。木本植物光合产物较多地分配到树干, 树干中的木质素含量较高, 因此相比叶片或枝条, 凋落物中的树干很难被微生物分解, 从而使光合作用固定的碳能保持相对较长的时间(Yadava, 2010)。农林复合系统中木本植物的根系空间分布格局使其相比单一草地或农田生态系统具有更高的土壤碳储量(Saha, 2008; Haile *et al.*, 2010)。热带地区的研究表明, 农林复合系统中不同植物功能群的光合产物向土壤的分配比例会影响其固碳潜力, 深层土壤中原土和黏土(直径<53 μm)的有机碳大部分来自于木本植物(C<sub>3</sub>植物), 而草本植物(C<sub>4</sub>植物)光合作用固定的碳较多地分配到砂土中, 壤土和黏土中储存的碳相比砂土更加稳定, 难以分解, 大部分深层土壤有机碳和相对稳态的碳都来自木本植物, 从而导致农林复合系统的土壤固碳潜力高于农田或草地生态系统(Takimoto *et al.*, 2009; Haile *et al.*, 2010)。

目前, 还没有哪个假说能较全面地揭示农林复合系统的固碳机制, 这主要是由于对农林复合系统的碳循环尤其是地下碳循环过程还缺乏深入的了

解, 由于土壤条件的复杂性和取样的困难性, 现有对农林复合系统碳储量的研究主要集中在地上和土壤有机碳, 对农林复合系统根系碳储量的定量研究还较少(Kaur *et al.*, 2002; Haile *et al.*, 2010; Nair, 2011c)。未来需要加强农林复合系统根系生长、细根周转和微生物分解作用的长期定量观测, 以更好地揭示农林复合系统的固碳机制。

### 3 农林复合系统固碳潜力的测定方法

准确地测定农林复合系统的碳储量是估算固碳速率和固碳潜力的基础, 农林复合系统的碳储量包括地上碳、根系碳、微生物碳、土壤碳和凋落物碳等5个组分。测定方法包括站点实测法、涡度相关法和模型模拟法等(Takimoto, 2007; Nair *et al.*, 2009b)。

#### 3.1 站点实测法

站点实测法是直接测定样地内木本和草本植物的地上生物量、根系生物量、凋落物量、微生物生物量和土壤有机碳含量, 以此来计算农林复合系统的固碳速率和固碳潜力的方法。其中地上生物量采用整株收获法测定, 细根生物量采用土钻法或土柱法测定, 粗根生物量采用部分或全部挖掘法测定。基于破坏性取样的直接测定法是获取农林复合系统碳储量的最准确的方法, 常被用于其他估算方法的验证。但该法会耗费大量的时间和劳动力, 特别是对大型树木(Peichl *et al.*, 2006)。因此, 研究者也常通过建立地上生物量与胸径、树高的回归方程来估算木本植物的地上碳储量(Smiley & Kroschel, 2008; 李海奎和雷渊才, 2010)。但这种回归方程或只适用于特定样地, 或太过普适, 往往不能得到准确的估算结果(Haile *et al.*, 2010)。李海奎和雷渊才(2010)给出了我国16个树种的生物量回归方程, 但在实际估算时需要基于最新的样地实测数据来检验和修改参数。土壤碳储量的测定在农林复合系统固碳潜力的计算中起着决定性的作用, 土壤碳储量包括根系碳、微生物碳和土壤有机碳等多种形式。但当前的取样技术对准确地测定根系生物量还存在较大的困难(Nair, 2011b)。因此, 有很多研究利用根冠比值来间接估算木本和草本植物的根系生物量(Nair *et al.*, 2009c; 李海奎和雷渊才, 2010)。对农林复合系统植被固碳潜力的估算是基于碳含量的假说, 该假说认为农林复合系统中枝条的含碳量为

45%–50%, 叶片的含碳量为30%, 整株植物的含碳量为50% (Schroth *et al.*, 2002; Udawatta & Jose, 2011)。

#### 3.2 涡度相关法

涡度相关法是基于微气象学方法和涡度相关技术对农林复合系统与大气间CO<sub>2</sub>湍流通量进行实时非破坏性取样的方法。该方法能在较大尺度上测定碳通量在大气-植被-土壤间的交换过程, 已被广泛用于森林、农田和草地生态系统碳储量的定量观测。但农林复合系统相比单一系统具有下界面复杂、冠层结构多样等特点, 可能导致湍流格局的复杂性, 进而影响观测结果的准确性, 因此目前在农林复合系统碳循环研究中还没有得到广泛的应用。Ward等(2012)的验证结果表明涡度相关法能很好地用于澳大利亚农林间作系统的固碳潜力评估。该方法也在巴拿马的热带林草复合系统和非洲稀树草原区的固碳潜力研究中得到了应用(Bombelli *et al.*, 2009; Wolf *et al.*, 2011)。涡度相关法能实时准确地测定农林复合系统的净碳交换量, 因此结合站点实测法将能很好地揭示农林复合系统固碳潜力的时空分布格局。

#### 3.3 模型模拟法

为了获得区域乃至全球尺度农林复合系统的固碳潜力, 20世纪90年代中期在农林复合系统建模项目(Agroforestry Modeling Project, AMP)的支持下开始了农林复合系统的模型研究。这些模型基于农林复合系统内的植被生长和土壤生物地球化学循环过程来估算农林复合系统的固碳潜力(Nair *et al.*, 2010)。Ellis等(2004)对当前运用较多的模型如HyPAR模型、WaNuLCAS模型、BEAM模型和HyCAS模型进行了对比分析, 认为这些模型大都因参数较多和结构复杂而没有得到较好地应用。Masera等(2003)建立了一个生态系统尺度的农林复合系统固碳潜力模型(CO<sub>2</sub>FIX V.2), 该模型能动态模拟森林生态系统的碳循环过程, 并在温带和热带农林复合系统中得到了验证。Zhai等(2006)基于GRASIM模型发展了silvopasture-GRASIM模型, 该模型能较好地模拟美国中西部林草复合系统内草本植物的生长状况, 但是, 该模型是否适用于其他区域还需要进一步的验证。当前大部分模型都只关注农林复合系统内木本或草本植物的单一碳循环过程, 还缺少将木本和草本植物的碳循环过程耦合

关联以定量地估测农林复合系统整体固碳潜力的研究。

#### 4 农林复合系统固碳潜力的影响因素

农林复合系统的碳固存包括植物的光合作用和光合固定的碳在长期碳库中的储存等两个过程。因此,任何影响植物光合作用、微生物分解作用和碳库动态的因素,如系统类型、系统内物种组成、组分的年龄结构、气候因子、环境条件和管理措施等,都会对农林复合系统的固碳潜力产生影响(Saha, 2008; Jose, 2009)。

##### 4.1 气候因子

气候因子会显著影响农林复合系统的固碳潜力。一方面,气候条件决定了农林复合系统的植被类型和生产力,影响农林复合系统的碳输入;另一方面,气候因子也通过影响呼吸作用和微生物的分解作用而对农林复合系统的碳输出过程产生影响。Montagnini和Nair (2004)研究表明,干旱、半干旱和湿润地区农林复合系统的碳储量分别为9、21和50  $\text{Mg C}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。相比湿润地区,干旱、半干旱地区及退化样地的农林复合系统具有较低的固碳速率,温带地区相比热带地区具有较低的固碳潜力(Nair *et al.*, 2009b) (表1)。气候因子如温度和降水会显著影响土壤微生物的分解作用,微生物活性随土壤温度和水分含量的增加而升高。虽然湿润气候有利于微生物的分解作用,但在极端湿润条件下会形成厌氧环境,这会有利于土壤有机碳的保存,因此在寒冷和湿润气候条件下,土壤会具有更高的固碳潜力(Nair *et al.*, 2010)。

##### 4.2 样地年龄

样地年龄是影响农林复合系统固碳潜力的重要因素,木本植物在幼年时的固碳速率较高,之后固碳速率随样地年龄的升高逐渐降低,但植被碳储量会在达到成熟林前随样地年龄的升高而增加(Saha, 2008)。在美国东南部农林复合系统的研究表明,松树的固碳速率在林龄为20年时达到最大,之后逐渐降低,在林龄为100年时固碳速率降为0(van't Veld & Plantinga, 2005)。冠层郁闭度和系统结构的复杂性(均匀度、丰富度和生物多样性)随木本植物林龄的增加而升高,导致凋落物量的增加和分布更加均匀,这会有利于土壤有机碳的积累和提高森林病虫害的抵抗能力,但同时也会造成林下光照

的不足,导致草本植物的生长受到抑制(Oelbermann *et al.*, 2004)。万猛等(2009)和李庆云(2008)研究均发现毛白杨-农林复合系统的植被碳储量、凋落物碳储量和土壤有机碳储量均与间作年限呈显著正相关。样地年龄也通过改变植物的光合产物分配格局对农林复合系统的固碳潜力产生影响。Oelbermann等(2005)的研究表明:10年生*Erythrina poeppigiana*相比4年生*E. poeppigiana*,光合产物向根系的分配比例有所降低(16% vs 28%),但粗根的固碳速率却有所增加( $0.4 \text{ Mg C}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  vs  $0.2 \text{ Mg C}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )。同时,凋落物中叶片所占的比例逐渐降低,枝条的比例逐渐增加。表明随样地年龄的增加,农林复合系统会提高光合产物向长期碳库的分配比例,以增加其固碳潜力。

##### 4.3 物种组成

物种组成会通过影响木本和草本植物的生长速度、物候特征、凋落物产量和质量来影响农林复合系统的固碳潜力(Nair *et al.*, 2009b; Mosquera-Losada *et al.*, 2011; 萧自位等, 2012)。当前对农林复合系统的构建是采用本土物种还是外来物种还存在很大的争议。本土物种对当地的气候和环境条件具有较好的适应性,而外来物种往往具有较高的固碳速率(Nair *et al.*, 2009b)。木本植物的生长速率随物种的不同而有所差异,生长较快的树种相比其他树种在建植初期具有更高的固碳潜力,但慢速生长的物种能在长时间尺度上积累更多的碳(Peichl *et al.*, 2006; Gordon & Jose, 2008; Nair *et al.*, 2010)。Peichl等(2006)的研究表明,经过13年的建植后,欧美杂交杨(*Populus deltoids* × *Populus nigra*)-大麦(*Hordeum vulgare*)农林复合系统的固碳潜力是欧洲云杉(*Picea abies*)-大麦农林复合系统的2倍。木本植物的物候特征(常绿、落叶)会影响农林复合系统的固碳潜力,落叶林(白杨(*Populus deltoids*))在冬季对林下植被的竞争作用减弱,有利于林下作物(如冬小麦(*Triticum aestivum*))的生长(Nair *et al.*, 2010)。物种组成也会对农林复合系统的凋落物产量和质量产生影响,导致土壤有机碳含量和土壤团聚体稳定性发生改变(Haile *et al.*, 2010)。森林、灌木和草原生态系统0–20 cm土层所包含的土壤有机碳中叶片所占的比例分别为50%、33%和42% (Jobbágy & Jackson, 2000)。哥斯达黎加农林复合系统的研究表明,19年生*Erythrina poeppigiana*的凋落物碳中有

48%来自叶片,而19年生南洋樱(*Gliricidia sepium*)的凋落物碳中有72%来自于枝条(Oelbermann *et al.*, 2005)。豆科木本和草本植物的固氮作用和菌根真菌的存在会增加土壤养分的有效性,提高土壤固碳潜力(Nair *et al.*, 2010)。也有研究认为多物种混合相比单一物种能提高资源利用率、改善样地质量和降低病虫害危害,因此具有更高的固碳潜力(Nair *et al.*, 2010)。木本和草本植物的相互作用如互利共生、化感作用和对水分和养分的竞争作用也会影响农林复合系统的固碳潜力,这种相互作用随物种的不同而有所差异(Sanchez, 1995; 丁树文等, 2004; 刘兴宇和曾德慧, 2007; Mosquera-Losada *et al.*, 2011)。丁树文等(2004)的研究表明,香根草(*Vertiveria zizanioides*)不利于大豆对N和P的吸收,而紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)会促进大豆对N和P的吸收。因此,在选择系统内物种组成时所面临的挑战在于如何维持木本植物的正效应,同时最大程度地降低木本与草本植物的竞争和化感作用(刘兴宇和曾德慧, 2007; Nair *et al.*, 2010)。

#### 4.4 林木密度

农林复合系统中木本植物的种植密度会影响系统的结构组成,进而影响其固碳潜力(Nair *et al.*, 2010)。林木密度的增加会提高农林复合系统的水分和养分利用率,增加地上、地下生产力和土壤的凋落物输入,进而增加固碳潜力(Schroth, 1998)。Saha (2008)研究表明印度西南部农林复合系统的土壤有机碳含量随木本植物密度的增加而升高,这一结论在南美洲巴拿马和印度果园中也得到了证实(Dagang, 2007; Nair *et al.*, 2009b; Nair, 2011b)。在西班牙的研究表明经过11年的生长,密度为833和2 500株·hm<sup>-2</sup>的辐射松(*Pinus radiata*)的固碳潜力分别为40.8和102.4 Mg C·hm<sup>-2</sup>,虽然密度较低的辐射松具有更高的单株固碳速率(48 vs 40 kg C·tree<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>) (Mosquera-Losada *et al.*, 2011)。9年生东方白杨(*Populus deltoides*)-小麦(*Triticum aestivum*)农林复合系统在林木密度为500株·hm<sup>-2</sup>时的植被固碳潜力比低密度处理(130株·hm<sup>-2</sup>)高2倍多(Yadava, 2010)。农林复合系统的木本植物密度(10–1 250株·hm<sup>-2</sup>)远低于森林生态系统(754–12 230株·hm<sup>-2</sup>),因此随林木密度的增加很少出现生长的自疏现象,但木本植物密度的增加会对林下草本的生长产生影响(Schroth, 1998; Kaur *et al.*, 2002; Oelbermann *et al.*,

2005)。李贤伟(2009)的研究表明,巨桉(*Eucalyptus grandis*)林的树高和生物量均随造林密度的增加而升高,而林下扁穗牛鞭草(*Hemarthria compressa*)和鸭茅(*Dactylis glomerata*)的生长随巨桉林密度的增加而降低。林木密度也通过改变林下光照、温度和土壤水分含量而对植被生长和微生物分解产生间接影响,进而改变农林复合系统的固碳潜力(Nair *et al.*, 2010)。

#### 4.5 土壤特性

土壤质地、土壤结构等物理特性和土壤pH值等化学特性都会影响农林复合系统的固碳潜力(Garcia-Oliva & Masera, 2004)。土壤团聚体结构会影响农林复合系统的土壤有机碳含量,大于2 000 μm的大团聚体具有更快的固碳速率和更高的有机碳含量,对外界因素的响应也更为敏感,小于5 μm的土壤颗粒则具有更高的固碳稳定性。大团聚体(>2 000 μm)、微团聚体(53–2 000 μm)和壤土+黏土(<53 μm)的有机碳分解速率分别为<10年、10–100年和100–1 000年(Garcia-Oliva & Masera, 2004)。土壤有机碳的含量和稳定性与土壤壤土和黏土含量呈正相关,与土壤砂土含量呈负相关关系(Takimoto *et al.*, 2009; Haile *et al.*, 2010)。壤土能增加土壤团聚体的形成和稳定性,有效地保护土壤有机质,提高土壤固碳能力。有研究表明,壤土对土壤有机碳含量的影响随土壤深度的增加而升高,在深层土壤,土壤质地的影响甚至超过气候因子(Jobbágy & Jackson, 2000; Nair *et al.*, 2009b)。土壤结构通过改变植物根系分布特征、水分和养分供应能力来影响植物生长,间接影响农林复合系统的固碳潜力(Albrecht & Kandji, 2003; Nair *et al.*, 2009b)。土壤黏土、团聚体含量和土壤微生物活性均随土壤pH值的升高而增加,这会促进植被生长和提高农林复合系统的固碳潜力(Bronick & Lal, 2005)。

#### 4.6 管理措施

农林复合系统的管理包括农田和草地的管理,如作物轮作、保护性耕作、灌溉、施肥、草地封育、补播、放牧和刈割等,也包括森林的管理如种植密度、周转时间、剪枝和木材砍伐等,这些措施都会对农林复合系统的固碳潜力产生影响(Montagnini & Nair, 2004)。作物轮作特别是加入豆科作物后能提高土壤肥力,促进作物生长,进而提高农林复合系统的固碳潜力(Oelbermann *et al.*, 2004)。开垦会破



坏土壤的团聚体结构, 导致土壤碳的释放和固碳潜力的降低, 因此在农田实行保护性耕作和免耕等措施会减少土壤侵蚀和有机碳的损失, 提高土壤固碳潜力。作物残茬覆盖能增加土壤的凋落物输入, 促进土壤微生物的矿化作用, 增加土壤肥力和固碳潜力(Nair *et al.*, 2010)。施肥和灌溉处理会促进农林复合系统内木本和草本植物的生长, 提高植被的固碳潜力, 同时能增加植被向土壤的凋落物输入, 增加土壤固碳潜力(Montagnini & Nair, 2004; Saha, 2008)。研究表明: 长期施用有机肥相比无机肥能有效地增加土壤有机碳含量和改善土壤团聚体结构, 且这种效应可以持续100年甚至更久, 因此能有效地增加土壤固碳潜力。欧洲农田中施用有机肥能使其固碳潜力增加 $6.8 \text{ Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$  (Lal, 2004)。草地封育能增加土壤含水量、有机质和养分含量, 改善盐碱地的土壤pH值, 促进植被生长, 进而提高固碳潜力。补播能增加草地群落的牧草种类, 改善草场质量和提高草地生产力。适度的刈割和放牧处理会促进林草复合系统内草本植物的生长, 增加其固碳潜力(Nair, 1985)。同时, 恢复退化草地和改善草地物种组成也会增加林草复合系统的固碳潜力(Lal, 2004)。长的周转时间有助于减少森林砍伐带来的扰动, 提高系统复杂性和固碳潜力, 特别是对处于演替顶级阶段的物种(山毛榉(*Fagus longipetiolata*)和欧洲云杉(*Picea abies*)等), 但短的周转时间会使植被具有较高的生长速率和较快的产品更新率, 因此在农林复合系统的设计中要充分考虑二者的平衡, 最大程度地提高固碳潜力(Bradford & Kastendick, 2010)。剪枝会促进木本植物树干的生长, 同时, 林下获得的光照增强, 有利于林下植被的生长。剪枝后地表的凋落物输入量增加, 有利于增加土壤的固碳潜力(Nair *et al.*, 2010)。但频繁的剪枝会降低植被碳储量, 每年的持续剪枝会使印度马占相思(*Acacia mangium*)林样地的植被碳储量减少22.4%, 造成农林复合系统固碳潜力的降低(Kunhamu *et al.*, 2011)。农林复合系统内的农林间距也会影响植被生长, 间距太小会增加农作物和木本植物对光照、水分和养分等资源的竞争, 降低植被生产力和固碳潜力(Oelbermann *et al.*, 2004)。农林复合系统内木本植物、家畜、农作物和草本植物共同构成了一个结构复杂、环境异质性较高的复合系统, 因此, 如何通过合理的管理措施最大程度地减少系统内各组分

竞争, 增加互补共存, 对提高农林复合系统的固碳潜力具有重要的作用(Nair, 1993; Montagnini & Nair, 2004)。但由于对农林复合系统内各组分的相互关系及其调控机制还缺乏深入的了解, 如何合理地设计和管理农林复合系统仍是当前科学家面临的难题(Jose, 2009)。

## 5 研究展望

### 5.1 农林复合系统的固碳潜力研究

要准确地评估和模拟气候变化和环境条件对农林复合系统固碳潜力的影响, 需要对农林复合系统的碳循环过程及其控制机制有深入的了解, 但目前对农林复合系统固碳机制的验证研究还较少(Thangata & Hildebrand, 2012), 因此未来应加强农林复合系统碳储量的时空分布格局及其固碳机理的研究, 这需要开展长期定位观测试验, 定量观测植被碳储量、微生物活性和土壤有机碳的时空动态, 为揭示气候变化影响下农林复合系统的固碳潜力及其固碳机制提供数据支持, 也为遥感监测和模型模拟提供数据验证(Nair *et al.*, 2009b; Srivastava *et al.*, 2012)。

当前预测农林复合系统固碳潜力的方法有很多, 但仍缺乏统一和标准的方法, 不同研究者得到的结果之间存在很大的变异性, 这将限制全球或区域尺度上对农林复合系统固碳潜力的对比和整合(Schroeder, 1994)。为准确地测定农林复合系统的固碳潜力, 未来需要关注以下几个方面: (1)建立一套标准、完善的农林复合系统固碳潜力评价方法, 以准确地评估农林复合系统的固碳潜力, 使不同区域获得的农林复合系统固碳潜力之间具有可比性(Nair *et al.*, 2009c; Udawatta & Jose, 2012); (2)为准确地评估农林复合系统的碳储量和固碳潜力, 需要考虑深层土壤和木本植物产品中的碳储量, 这些组分在测定中常常被忽略(Schroeder, 1994; Sanchez, 1995; Sharrow & Ismail, 2004); (3)依靠遥感估测和模型模拟方法获取农林复合系统固碳潜力在区域和全球尺度的时空分布格局(Sharrow & Ismail, 2004)。

### 5.2 农林复合系统固碳潜力的提高途径

随着全球碳贸易的开展, 农林复合系统的固碳潜力已得到研究者的广泛认可, 而如何合理有效地配置和管理农林复合系统, 使其达到最大的固碳潜

力, 将对缓解气候变化和提高当地经济收入具有重要的意义(Montagnini & Nair, 2004; Nair *et al.*, 2009a)。我国农林复合系统的固碳潜力在全球还处于较低水平(表1)(Dixon, 1995)。这一方面是由于我国农林复合系统的固碳速率相比其他国家和地区还较低( $0.5 \text{ Mg C}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ), 另一方面农林复合系统在我国的分布面积还较小( $75.9 \text{ Mhm}^2$ )。因此, 如果能合理配置和加强管理, 我国的农林复合系统将具有很高的固碳潜力。

基于农林复合系统固碳潜力的影响因素, 提出增加农林复合系统固碳潜力的方法和途径:

1) 扩大农林复合系统的分布面积, 将低产田、退化农田或草地转变为农林复合系统, 特别是在我国荒漠地区 and 水土流失区建立农林复合系统会在提高固碳潜力和增加生态效应的同时提高居民的经济收入(Gordon & Newman, 1997)。

2) 因地制宜选择适宜的农林复合经营模式, 要建立高效的农林复合系统, 必须充分考虑当地的自然条件和社会经济因素, 针对当地的气候条件选择适宜的动植物种类(Nair *et al.*, 2009b)。

3) 农林复合系统在设计时要最大程度地增加物种间的互利共生和降低物种间的竞争, 充分发挥系统的整体效益。如喜光和耐阴、深根系和浅根系、固氮植物和木材林的混合等(Nair *et al.*, 2010)。同时, 要选择具有较大根系生物量分配比例、且与农作物或草本植物具有互补效应的多年生木本植物(Udawatta & Jose, 2012)。

4) 依据经营目的确定农林复合系统的经营主次和不同物种的密度和株行距, 建立合理高效的农林复合系统群体结构(水平结构、垂直结构、营养结构和时间结构), 实现资源的充分利用, 提高系统生产力和固碳潜力。其中, 将生长快速(先锋种)和生长较慢的物种(群落优势种)混合种植, 可以获得不同周转时间的木材, 也有利于提高系统的病虫害抵抗能力和固碳潜力(Nair *et al.*, 2010; Udawatta & Jose, 2012)。

5) 通过短期的培训或指导, 提高农林复合系统的管理水平。使农林复合系统的建造者掌握免耕、保护性耕作、灌溉、施肥、剪枝、轮牧和刘割等农业、林业和草业的基本管理措施, 最大程度地提高农林复合系统的固碳潜力(Pandey, 2002)。

基金项目 北京林业大学新教师科研启动基金

(BLX2011001)。

## 参考文献

- Albrecht A, Kandji ST (2003). Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99, 15–27.
- Archer S, Boutton TW, Hibbard KA (2001). Trees in grasslands: biogeochemical consequences of woody plant expansion. In: Schulze ED, Harrison SP, Heimann M, Holland EA, Lloyd J, Prentice IC, Schimel D eds. *Global Biogeochemical Cycles in the Climate System*. Academic Press, San Diego, USA. 115–138.
- Bombelli A, Henry M, Castaldi S, Adu-Bredu S, Arneith A, de Grandcourt A, Grieco E, Kutsch WL, Lehsten V, Rasile A, Reichstein M, Tansey K, Weber U, Valentini R (2009). An outlook on the Sub-Saharan Africa carbon balance. *Biogeosciences*, 6, 2193–2205.
- Bradford JBBJB, Kastendick DNKDN (2010). Age-related patterns of forest complexity and carbon storage in pine and aspen-birch ecosystems of northern Minnesota, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 401–409.
- Bronick CJ, Lal R (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3–22.
- Cannell MGR (2003). Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK. *Biomass and Bioenergy*, 24, 97–116.
- Dagang ABK (2007). *Establishment of Silvopastoral Systems in Degraded, Grazed Pastures: Tree Seedling Survival and Forage Production under Trees in Panama*. PhD dissertation, University of Florida, Florida, USA.
- Dagang ABK, Nair PKR (2003). Silvopastoral research and adoption in Central America: recent findings and recommendations for future directions. *Agroforestry Systems*, 59, 149–155.
- Ding SW, Wang F, Cai CF, Shi ZH, Peng YX, Jiang C, Zhang GY (2004). Effects of two hedgerows species on nutrients uptake for crops. *Resources Science*, 26, 156–160. (in Chinese with English abstract) [丁树文, 王峰, 蔡崇法, 史志华, 彭业轩, 姜成, 张光远 (2004). 两种绿篱植物对作物养分吸收的影响. *资源科学*, 26, 156–160.]
- Dixon RK (1995). Agroforestry systems: sources of sinks of greenhouse gases? *Agroforestry Systems*, 31, 99–116.
- Dube F, Espinosa M, Stolpe NB, Zagal E, Thevathasan NV, Gordon AM (2012). Productivity and carbon storage in silvopastoral systems with *Pinus ponderosa* and *Trifolium* spp., plantations and pasture on an Andisol in Patagonia, Chile. *Agroforestry Systems*, 86, 113–128.
- Ellis EA, Bentrup G, Schoeneberger MM (2004). Computer-based tools for decision support in agroforestry: current state and future needs. *Agroforestry Systems*, 61–62, 401–421.

- Fan W, Gao XR (2004). Research advances on the silvopastoral system. *Forest Research*, 17, 519–524. (in Chinese with English abstract) [樊巍, 高喜荣 (2004). 林草牧复合系统研究进展. 林业科学研究, 17, 519–524.]
- Gama-Rodrigues EF, Nair PKR, Nair VD, Gama-Rodrigues AC, Baligar VC, Machado RCR (2010). Carbon storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Environmental Management*, 45, 274–283.
- Garcia-Oliva F, Masera OR (2004). Assessment and measurement issues related to soil carbon sequestration in land-use, land-use change, and forestry (LULUCF) projects under the Kyoto Protocol. *Climatic Change*, 65, 347–364.
- Gordon AM, Jose S (2008). Applying ecological knowledge to agroforestry design: a synthesis. In: Jose S, Gordon AM eds. *Toward Agroforestry Design*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. 301–306.
- Gordon AM, Newman SM (1997). *Temperate Agroforestry Systems*. CAB International, New York.
- Haile SG, Nair VD, Nair PKR (2010). Contribution of trees to carbon storage in soils of silvopastoral systems in Florida, USA. *Global Change Biology*, 16, 427–438.
- Ibrahim M, Villanueva C, Mora J (2005). Traditional and improved silvopastoral systems and their importance in sustainability of livestock farms. In: Mosquera MR, Riguero A, McAdam J eds. *Silvopastoralism and Sustainable Land Management*. CAB International, Wallingford, UK. 13–18.
- ICRAF (1982). Concepts and procedures for diagnosis of existing land management systems and design of agroforestry technology: a preliminary version for comment. *Collaborative and Special Projects Programme and Agroforestry Systems Programme*. ICRAF, Nairobi.
- Izac AMN, Sanchez PA (2001). Towards a natural resource management paradigm for international agriculture: the example of agroforestry research. *Agricultural Systems*, 69, 5–25.
- Jobbágy EG, Jackson RB (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10, 423–436.
- Jose S (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76, 1–10.
- Kaur B, Gupta SR, Singh G (2002). Carbon storage and nitrogen cycling in silvopastoral systems on a sodic in northwestern India. *Agroforestry Systems*, 54, 21–29.
- Kunhamu TK, Kumar BM, Samuel S (2011). Does tree management affect biomass and soil carbon stocks of *Acacia mangium* Willd. stands in Kerala, India? In: Kumar BM, Nair PKR eds. *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. 217–228.
- Kürsten E (2000). Fuelwood production in agroforestry systems for sustainable land use and CO<sub>2</sub>-mitigation. *Ecological Engineering*, 16, 69–72.
- Lal R (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1–22.
- Li HK, Lei YC (2010). *Estimation and Evaluation of Forest Biomass Carbon Storage in China*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [李海奎, 雷渊才 (2010). 中国森林植被生物量和碳储量评估. 中国林业出版社. 北京.]
- Li QY (2008). *The Research on Carbon Storage of Populus-crop Intercropping System in the Huanghuaihai Plain*. Master degree dissertation, Henan Agricultural University, Zhengzhou, China. (in Chinese with English abstract) [李庆云 (2008). 黄淮海平原杨农间作系统碳储量研究. 硕士学位论文. 河南农业大学, 郑州.]
- Li WH, Lai SD (1994). *Agroforestry Management in China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [李文华, 赖世登 (1994). 中国农林复合经营. 科学出版社, 北京.]
- Li XW, Zhang J, Hu TX, Luo CD (2009). *Theory of the Conversion of Farmland to Forests and Application of Forest-Grass Mode*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [李贤伟, 张健, 胡庭兴, 罗承德 (2009). 退耕还林理论基础及林草模式的实践应用. 科学出版社, 北京.]
- Liu XY, Zeng DH (2007). Research advances in interspecific interactions in agroforestry system. *Chinese Journal of Ecology*, 26, 1464–1470. (in Chinese with English abstract) [刘兴宇, 曾德慧 (2007). 农林复合系统种间关系研究进展. 生态学杂志, 26, 1464–1470.]
- Luedeling E, Neufeldt H (2012). Carbon sequestration potential of parkland agroforestry in the Sahel. *Climatic Change*, 115, 443–461.
- Luedeling E, Sileshi G, Beedy T, Dietz J (2011). Carbon sequestration potential of agroforestry systems in Africa. In: Kumar BM, Nair PKR eds. *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. 61–83.
- Masera OR, Garza-Caligaris JF, Kanninen M, Karjalainen T, Liskic J, Nabuursd GJ, Pussinenc A, de Jonge BHJ, Mohrenf GMJ (2003). Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO<sub>2</sub>FIX V.2 approach. *Ecological Modelling*, 164, 177–199.
- Menezes RSC, Salcedo IH, Elliott ET (2002). Microclimate and nutrient dynamics in a silvopastoral system of semiarid northeastern Brazil. *Agroforestry Systems*, 56, 27–38.
- Meng P, Zhang JS, Fan W (2003). *Research on Agroforestry in China*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [孟平, 张劲松, 樊巍 (2003). 中国复合农林业研究. 中国林业出版社, 北京.]
- Montagnini F, Nair PKR (2004). Carbon sequestration: an

- underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61, 281–295.
- Mosquera-Losada MR, Freese D, Rigueiro-Rodríguez A (2011). Carbon sequestration in European agroforestry systems. In: Kumar BM, Nair PKR eds. *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. 43–59.
- Nair PKR (1985). Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 3, 97–128.
- Nair PKR (1993). *An Introduction to Agroforestry*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Nair PKR (2011a). Methodological challenges in estimating carbon sequestration potential of agroforestry systems. In: Kumar BM, Nair PKR eds. *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. 3–16.
- Nair PKR (2011b). Agroforestry systems and environmental quality: introduction. *Journal of Environmental Quality*, 40, 784–790.
- Nair PKR (2011c). Carbon sequestration studies in agroforestry systems: a reality-check. *Agroforestry Systems*, 86, 243–253.
- Nair PKR, Kumar BM, Nair VD (2009b). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172, 10–23.
- Nair PKR, Nair VD, Gama-Rodrigues E, Garcia R, Haile S, Howlett DS, Kumar BM, Mosquera-Losada MR, Saha S, Takimoto A, Tonucci R (2009a). Soil carbon in agroforestry systems: An unexplored treasure? <http://precedings.nature.com/documents/4061/version/1>.
- Nair PKR, Nair VD, Kumar BM, Haile SG (2009c). Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environmental Science & Policy*, 12, 1099–1111.
- Nair PKR, Nair VD, Kumar BM, Showalter JM (2010). Carbon sequestration in agroforestry systems. *Advances in Agronomy*, 108, 237–307.
- Oelbermann M, Paul Voroney R, Gordon AM (2004). Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104, 359–377.
- Oelbermann M, Voroney RP, Kass DCL, Schlönvoigt AM (2005). Above- and below-ground carbon inputs in 19-, 10- and 4-year-old Costa Rican Alley cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105, 163–172.
- Pandey DN (2002). Carbon sequestration in agroforestry systems. *Climate Policy*, 2, 367–377.
- Parry ML, Canzaiani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Peichl M, Thevathasan NV, Gordon AM, Huss J, Abohassan RA (2006). Carbon sequestration potentials in temperate tree-based intercropping systems, southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 66, 243–257.
- Power IL, Thorrold BS, Balks MR (2003). Soil properties and nitrogen availability in silvopastoral plantings of *Acacia melanoxylon* in North Island, New Zealand. *Agroforestry Systems*, 57, 225–237.
- Saha SK (2008). *Carbon Sequestration Potential of Tropical Homegardens and Related Land-Use Systems in Kerala, India*. PhD dissertation, University of Florida, Florida, USA.
- Sampson RN, Scholes RJ, Cerri C, Erda L, Hall DO, Handa M, Hill P, Howden M, Janzen H, Kimble J, Lal R, Marland G, Minami K, Paustian K, Read P, Sanchez PA, Scoppa C, Solberg B, Trossero MA, Trumbore S, van Cleemput O, Whitmore A, Xu D, Burrows B, Conant R, Liping G, Hall W, Kaegi W, Reyenga P, Roulet N, Skog KE, Smith GR, Wang Y (2000). Additional human-induced activities—Article 3. 4. In: Watson R, Noble I R, Bolin B, Ravindranath N, Verardo D, Dokken D eds. *Land Use, Land-Use Change, and Forestry*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 181–282.
- Sanchez PA (1995). Science in agroforestry. *Agroforestry Systems*, 30, 5–55.
- Sathaye JA, Ravindranath NH (1998). Climate change mitigation in the energy and forestry sectors of developing countries. *Annual Review of Energy and the Environment*, 23, 387–437.
- Schoeneberger MM (2009). Agroforestry: working trees for sequestering carbon on agricultural lands. *Agroforestry Systems*, 75, 27–37.
- Schroeder P (1994). Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 27, 89–97.
- Schroth G (1998). A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options. *Agroforestry Systems*, 43, 5–34.
- Schroth G, D'Angelo SA, Teixeira WG, Haag D, Lieberei R (2002). Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest Ecology and Management*, 163, 131–150.
- Sharrow SH, Ismail S (2004). Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA. *Agroforestry Systems*, 60, 123–130.
- Singh P, Lodhiyal LS (2009). Biomass and carbon allocation in 8-year-old poplar (*Populus deltoides* Marsh) plantation in Tarai agroforestry systems of Central Himalaya, India. *New York Science Journal*, 2, 49–53.
- Smiley G, Kroschel J (2008). Temporal change in carbon stocks of cocoa-gliricidia agroforests in Central Sulawesi, Indonesia. *Agroforestry Systems*, 73, 219–231.

- Smith P, Falloon P, Franko U, Körschens M, Lal R, Paustian K, Powlson D, Romanenkov V, Shevtsova L, Smith J (2007). Greenhouse gas mitigation potential in agricultural soils. In: Ganadel JG, Pataki DE, Pitelka LF eds. *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Springer-Verlag, Berlin. 227–235.
- Srivastava P, Kumar A, Behera SK, Sharma YK, Singh N (2012). Soil carbon sequestration: an innovative strategy for reducing atmospheric carbon dioxide concentration. *Biodiversity and Conservation*, 21, 1343–1358.
- Takimoto A (2007). *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems in the West African Sahel: An Assessment of Biological and Socioeconomic Feasibility*. PhD dissertation, University of Florida, Florida, USA.
- Takimoto A, Nair VD, Nair PKR (2009). Contribution of trees to soil carbon sequestration under agroforestry systems in the West African Sahel. *Agroforestry Systems*, 76, 11–25.
- Thangata PH, Hildebrand PE (2012). Carbon stock and sequestration potential of agroforestry systems in smallholder agroecosystems of sub-Saharan Africa: mechanisms for ‘reducing emissions from deforestation and forest degradation’ (REDD+). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 158, 172–183.
- Udawatta RP, Jose S (2011). Carbon sequestration potential of agroforestry practices in temperate North America. In: Kumar BM, Nair PKR eds. *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. 17–42.
- Udawatta RP, Jose S (2012). Agroforestry strategies to sequester carbon in temperate North America. *Agroforestry Systems*, 86, 225–242.
- van't Veld K, Plantinga A (2005). Carbon sequestration or abatement? The effect of rising carbon prices on the optimal portfolio of greenhouse-gas mitigation strategies. *Journal of Environmental Economics and Management*, 50, 59–81.
- Wan M, Tian DL, Fan W, Li QY (2009). Biomass production and carbon sequestration in poplar-crop agroforestry ecosystems in eastern Henan plain. *Scientia Silvae Sinicae*, 45, 27–33. (in Chinese with English abstract) [万猛, 田大伦, 樊巍, 李庆云 (2009). 豫东平原杨农复合系统物质生产与碳截存. *林业科学*, 45, 27–33.]
- Ward PR, Micin SF, Fillery IRP (2012). Application of eddy covariance to determine ecosystem-scale carbon balance and evapotranspiration in an agroforestry system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152, 178–188.
- Watson R, Noble R, Bolin B, Ravindranath N, Verardo D, Dokken D (2000). *Land Use, Land-Use Change, and Forestry*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Wolf S, Eugster W, Potvin C, Buchmann N (2011). Strong seasonal variations in net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a tropical pasture and afforestation in Panama. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1139–1151.
- Xiao ZW, Wang LJ, Mao JM, Zhu XZ, Wang XL, Zheng L, Tang JW (2012). Carbon storage of different tree-tea agroforestry systems in Xishuangbanna, Yunnan Province of Southwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 31, 1617–1625. (in Chinese with English abstract) [萧自位, 王丽娟, 毛加梅, 朱兴正, 王小李, 郑丽, 唐建维 (2012). 西双版纳不同林茶复合生态系统碳储量. *生态学杂志*, 31, 1617–1625.]
- Yadava AK (2010). Carbon sequestration: underexploited environmental benefits of Tarai agroforestry systems. *Indian Journal of Soil Conservation*, 38, 125–131.
- Yu GR, Wang QF, Liu YC, Liu YH (2011). Conceptual framework of carbon sequestration rate and potential increment of carbon sink of regional terrestrial ecosystem and scientific basis for quantitative carbon authentication. *Progress in Geography*, 30, 771–787. (in Chinese with English abstract) [于贵瑞, 王秋凤, 刘迎春, 刘颖慧 (2011). 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础. *地理科学进展*, 30, 771–787.]
- Zeng YQ, Lu XS (2008). Current advance and benefits of tree-grass complex system researches. *Pratacultural Science*, 25, 33–36. (in Chinese with English abstract) [曾艳琼, 卢欣石 (2008). 林草复合生态系统的研究现状及效益分析. *草业科学*, 25, 33–36.]
- Zhai T, Mohtar RH, Gillespie AR, von Kiparski GR, Johnson KD, Neary M (2006). Modeling forage growth in a Midwest USA silvopastoral system. *Agroforestry Systems*, 67, 243–257.
- Zomer RJ, Trabucco A, Coe R, Place F (2009). Trees on farm: analysis of global extent and geographical patterns of agroforestry. *ICRAF Working Paper*, World Agroforestry Centre, Nairobi, Kenya.
- Zou XM, Sanford RL (1990). Agroforestry systems in China: a survey and classification. *Agroforestry Systems*, 11, 85–94.

特邀编委: 陈世莘 责任编辑: 王 葳