

林草复合系统的生态效益

张雷^{1,2}, 张静茹^{1,2}, 刘 方¹, 姚 斌²

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要: 当今环境资源的高度开发利用, 造成了严重的生态环境问题, 而林草复合系统在改善生态环境和实现可持续发展方面具有巨大潜力, 可作为一种重要的生态修复手段来加以推广应用。本文对最近 5 年国内外有关林草复合系统的光合特性、微气候效应、生物多样性、土壤功能等方面研究进行归纳与总结。针对目前林草复合系统生态效益研究中存在的问题和不足, 提出今后的研究重点应放在林草复合系统的生态效益综合评价、生态系统固碳机理、土壤微生物遗传多样性、土壤修复机理及量化系统模型等方面。

关键词: 林草复合系统; 生态效益; 问题与方法

中图分类号: S812.29

文献标识码: A

文章编号: 1001-0629(2014)09-1789-09*

A review of ecological benefits of silvopasture systems

ZHANG Lei-yi^{1,2}, ZHANG Jing-ru^{1,2}, LIU Fang¹, YAO Bin²

(1. College of Resource and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: At present, the highly development and utilization of environmental resources has caused seriously ecological and environmental problems, however, the silvopasture systems have great potential in improving ecological environment and realizing sustainable development which can be applied as a method of importantly ecological restoration. The present paper summarizes the home and abroad research about silvopasture systems in the recent five years which including photosynthetic characteristics, microclimatic effects, biodiversity and soil function etc. Based on the problems and defects existing in the research of current silvopasture systems, we consider that the future research of silvopasture systems should be focused on comprehensive evaluation of the ecological benefits, mechanism of carbon sequestration in the ecosystem, the genetic diversity of soil microorganisms, mechanism of soil restoration and the model of quantitative systems etc.

Key words: silvopasture systems; ecological benefits; problem and method

Corresponding author: YAO Bin E-mail: acmn21@caf.ac.cn

随着工业化、城市化、农业集约化的快速发展, 人们对环境资源高度开发利用^[1], 使人口、资源、环境和经济之间产生了一系列尖锐的矛盾, 主要表现为人口剧增、资源过度消耗、生态环境污染失调和生物多样性降低等严重的社会与环境问题, 实现可持

续发展已成为当今世界各国面临的紧迫艰难而又无法回避的要务。而林草复合系统兼具提高土地生产力、改善生态环境、保护生物多样性和高效利用自然资源等多方优势^[2-3], 能够极大地促进林草业更深入的相互渗透及对生态环境的综合治理^[4], 实现牧草

* 收稿日期: 2014-01-15 接受日期: 2014-06-25

基金项目: 国家林业局“948”项目(2013-4-80); 国家自然科学基金项目(31460133); 林业公益性行业科研专项(201104077)

第一作者: 张雷一(1988-), 男, 吉林蛟河人, 在读硕士生, 主要从事林草复合生态系统研究。E-mail: zhang_leiyi@126.com

通信作者: 姚斌(1973-), 男, 贵州贵阳人, 副研究员, 博士, 主要从事生态恢复及荒漠化防治研究。E-mail: acmn21@caf.ac.cn

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、环境恶化和农林用地矛盾等问题的可持续土地管理模式^[5],其作为一种生态环境治理与经济开发的手段在国内外日益受到重视。然而,目前国内外对林草复合系统生态效益和应用机制的研究还不够深入,因此有必要进行系统深入的研究,从而为林草复合生态系统的效益评价及环境生态影响提供科学参考和依据。

1 林草复合系统的研究概况

林草复合系统,属农林复合系统(Agroforestry System)的一大类,是指由多年生木本植物(乔木、灌木、果木和竹类等)和草(牧草、药草和草本农作物等)在空间上有机结合(长期或短期)形成的复合多

物种、多层次、多时序和多产业的人工经营植被生态系统,其范畴包括林草间作,牧场防护林、饲料林、果树和经济林培育中的生草栽培等^[6-8]。林草复合系统能够充分利用自然资源,提高初级产品的转化率和利用率,发挥复合系统的生态效益,在实现可持续发展方面有巨大的潜力^[9]。

林草复合系统的思想自古有之,至今已有1 300年的历史,并且有许多国家都在使用。现今林草复合系统在全球广泛地分布与应用,主要集中在大洋洲、南美洲、非洲撒哈拉和南亚等适宜地区^[10-11],林草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林草复合系统类型之间相差较大,故而林草复合系统的形式多种多样,没有绝对统一的模式(表1)。

表 1 林草复合系统全球主要研究区域基本概况
Table 1 The basic situation of the world's major research region in the silvopasture system

区域 Region		系统类型 System type	分布面积 Distribution area/ $\times 10^6$ hm ²	参考文献 Reference
亚洲 Asia	中国 China	农林(林牧)复合型 Agroforestry(Silvopastoral)	75.90	[3-12]
	印度 India	农林(林牧)复合型 Agroforestry(Silvopastoral)	96.00	[12-14]
	蒙古 Mongolia	林牧复合型 Silvopastoral		[10-12]
	东南亚 Southeast Asian	庭院复合型 Homegarden	8.00	[10-12]
非洲 Africa	南非 South Africa	林牧复合型 Silvopastoral		[11-12]
	西非撒哈拉 West Africa Sahara	农林牧复合型 Agrisilvicultural	27.87	[12]
	乌干达 Uganda	农林牧复合型 Agrisilvicultural		[15]
北美洲 North America	美国 USA	防风带型/林牧复合型 Windbreaks/Silvopastoral	8.95/77.70	[10-12,16]
	加拿大 Canada	农林牧复合型 Agrisilvicultural		[10-12]
南美洲 South America	墨西哥 Mexico	农林牧复合型 Agrisilvicultural	1.90	[7,12]
大洋洲 Oceania	澳大利亚 Australia	林草复合型 Silvopasture		[7,10-12]
	新西兰 New Zealand	林牧复合型 Silvopastoral		[7,12]

国内李寅恭在 1919 年就提出畜场植树观点,后又提出混牧林概念^[17],促进了西北林牧业的发展。但长期以来,林草复合系统的研究理论并未得到足够的重视,直到 1977 年国际农林经营研究委员(ICRAF)在加拿大国际发展中心(IDRC)的资助下成立,农林复合系统才进入研究的热潮^[18]。而这期间,我国林草复合系统的发展过程曲折,由于历史及政治经济原因,其经历着从萌芽期到应用期的漫长过程,但近些年复合系统理论研究发展很快、成果很多,正在与世界林草复合系统研究接轨。

当前,我国农林(包括林草间作)复合系统的总面积在 $(45 \sim 76) \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[12]。根据不同地区经济社会生态可持续发展需求和自然环境要素,林草复合系统主要分布于我国的西北、华南和西南三大区域。华南地区典型代表为热带地区的桉、胶、茶草复合系统,西北及北方地区广泛分布的林(果树)与棉花、牧草复合系统和生态固沙防护林等体系,西南主要为退耕还林区果树、竹、桉木与草间作系统,而其他地区也存在林草复合系统,但规模相对较小。随着林草复合系统在我国广泛的推广应用,其有望实现经济效益、社会效益和生态效益三者有效统一。

2 林草复合系统的生态效益

林草复合系统的生态效益研究主要围绕光、热、水、土壤资源的生态学机制和互作关系来进行。

2.1 光合特性

林草复合系统可以高低搭配多层次充分利用光能,提高光合利用率^[17],促进林草生长,提高林草产品的品质,增加系统的生物量。但也有研究表明,复合系统中木本植物的遮阴,引起间作物的光合有效辐射减弱,导致间作物产量降低^[6,8]。如巨桉(*Eucalyptus grandis*)林下间种鸭茅(*Dactylis glomerata*)和多年生黑麦草(*Lolium multiflorum*)的产量偏低,而适当控制林分郁闭度,鸭茅在林分郁闭度小于 0.54,多年黑麦草在林分郁闭度小于 0.34,其生物量随郁闭度增加而增加^[19],同时 Silva-pando 等^[20]对辐射松(*Pinus radiata*)林地混播鸭茅和白三叶(*Trifolium repens*)的研究结果表明,牧草年产量在无遮阴条件下达到最高。但 Perry 等研究发现苏格兰松(*Pinus sylvestris*)下间种的须芒草(*Andropogon gerardii*)与无芒雀麦

(*Bromus inermis*)所含的粗蛋白和生物量得到增加^[21],这可能是由于遮阴能够控制高温和光照强度,形成有利于牧草生长的小环境,提高了牧草的品质和产量。

林草复合系统光合特性涉及多方面的研究,近期研究表明桑树(*Morus alba*)间作苜蓿(*Medicago sativa*)提高了系统的光合利用率,其光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)和最大净光合速率($P_{\max}$)分别比单作桑树提高了 15.00%、39.30%和 20.70%^[22]。另有学者对复合系统植物光合有效辐射(PAR)、蒸腾速率(E)日变化呈典型单峰曲线、水分利用效率(WUE)高低等光合生理特性进行了研究^[23]。而国外近年来对林草复合系统光合特性的研究主要依据树与牧草的水分、养分及光合生理特性等因素建立模型进行拟合预测^[24]来评估复合系统的光合效率。

2.2 微气候效应

林草复合系统导致的微气候效应不仅直接影响植物的光合与生长发育、土壤有机质分解、养分的迁移转化和水热交换等,还可降低风速,减少凋落物覆盖层的丢失,控制土壤的风侵蚀等^[6]。黄土高原旱地苹果(*Malus pumila*)园间种白三叶和多年生黑麦草,结果发现,间作系统能调节苹果园近地层的大气温度,提高果园相对湿度、调节土壤温度、降低风速和相对照度,但间种牧草的果园透光率降低,通风性减小,风速减弱,这可能与间作系统的种植密度和管理措施有关,而且透光率、风速的强弱程度还与牧草种类密切相关^[25]。

此外,复合系统夏季可以提高林内湿度,降低温度,减轻或阻止草本植物的日灼现象;冬季可以阻挡风寒,减少系统热量散失,并可延长青草绿期^[26],这提高了林草复合系统植物生产力,充分发挥了复合系统的生态效益。Feldhake^[27]对美国西弗吉尼亚州刺槐(*Robinia pseudoacacia*)—牧草复合系统研究表明,树冠的遮阴作用可减小表层土温在一日之中的急剧变化。Karki 和 Goodman^[28]发现纯牧草地转变到林草复合模式牧场,在初期阶段的水分蒸散量会影响牧场系统的转变进程,进而影响到系统的热量散失和牧草的长势及日灼现象。可见,林草复合系统在改善系统微气候时,其他微气候因子(如光照、水分和土壤温度等)对复合系统生态效益的发挥有局限作用。

2.3 生物多样性

关于林草复合系统生物多样性的研究,多集中于系统中节肢动物丰富度、多样性指数、均匀性指数和害虫天敌数量等方面,且各指标在大部分间作系统中普遍大于清耕地^[29-30];近期研究较多的是林草复合系统中有害昆虫天敌的种群结构和数量^[31-34]。种草枣(*Ziziphus jujuba*)林的寄生性天敌功能团对蛭虫(*Hemiptera coccoidea*)的控制能力比未种草枣林强^[31],且在枣园中保留一定的杂草可以减少天敌昆虫的迁出,增加天敌昆虫的物种数,有助于枣园实现生态效益与高效经营^[32];胜红蓟(*Ageratum conyzoides*)通过吸引大量捕食螨(*Amblyseius* spp)对柑桔(*Citrus reticulata*)的主要害虫红蜘蛛(*Panonychus citri*)进行捕杀来控制柑桔园中恶性杂草和病害的发生^[33];而 Tang 等^[34]研究梨(*Pyrus* spp.)园间作芳香植物对有害天敌驱避作用机理,结果表明,有害昆虫圣甲虫(*Copris* sp.)不偏好寄生于芳香植物上,导致系统内圣甲虫的年积累数量和丰富度明显低于清耕,对某些特定自然天敌的丰富度有影响。可见,该类研究可有效地保护和利用自然天敌去控制有害生物,协调化学防治与生物防治的矛盾,减少间作系统环境的化学污染,改善复合系统的生态环境,增加生物多样性,有利于提高生物间互惠互利作用^[34],进而增加与提高林草生物量和产出,使复合系统的生态效益得到最大化,为有害生物综合治理方案的制定和生态效益的提高提供相关依据。

2.4 土壤功能

2.4.1 林草复合系统的土壤性状变化 在林草复合系统中,合理的间作系统可以改善土壤的孔隙组成,降低土壤容重,增加土壤有机碳含量,提高土壤肥力^[35-36],较好地改变间作系统土壤的理化性质,促进植物快速生长,提升单位面积经济效益^[37]。而近期的相关研究重点是探讨复合系统土壤团聚体和团聚体有机碳对土壤理化性质及生化性质的影响。最近的研究表明,苹果园间作白三叶增加了果园土壤水稳性团聚体平均质量直径(MWD),降低了团聚体破坏率(PAD),显著提高 0—20 cm 土层 >0.25 mm 水稳性团聚体含量及其稳定性和有机碳含量^[38],这可能是由于地被输入的植物残体主要积累在土壤表层,使土壤表层土的微生物活性增加,对果园土壤水稳性团聚体的形成及其稳定性产生积极影

响。这与 Ramos 等^[39]和王义祥等^[40]分别对杏树(*Armeniaca vulgaris*)园与桃树(*Amygdalus persica*)园实施生草栽培试验结果一致。可见,林草复合系统有利于改善土壤性状和结构,对土壤有机质的保护、土壤侵蚀的减少与碳汇效应的应用等方面的土壤功能效益有重要意义。

2.4.2 林草复合系统的土壤酶活性与养分效能 土壤肥力的提高与土壤酶(脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶等)内在相关。土壤酶在一定程度上反映土壤养分转化动态,其活性也是土壤养分评价的一个重要指标。林草复合系统中土壤酶活性与土壤养分具有密切的相关性^[41],如脲酶活性可用来表征土壤中有态氮的转化状况和土壤氮肥的供应程度。间作系统内土壤酶的存在有利于有机氮转化为速效氮,能够为植物生长提供充足的氮素营养^[21]。研究表明^[22,42-43],林草复合模式土壤养分与酶活性都明显高于单作模式。如茶树(*Camellia sinensis*)园间作三叶草明显增加土壤过氧化氢酶和转化酶含量^[41];银杏树(*Ginkgo biloba*)间种大豆(*Glycine max*)有助于提高复合系统土壤酶活性^[42];美洲山胡桃(*Carya cathayensis*)与高加索三叶草(*Trifolium ambiguum*)间作系统土壤有机碳与酶活性都高于单作牧草,且对山胡桃的生长有促进作用^[43]。此外,国内外对传统间作系统内土壤养分的研究也在不断地深入。近期的研究发现,林草复合系统有利于土壤有机碳和微生物量碳含量^[44]、土壤磷存储容量(SPSC)^[45]、酸性土壤 pH 和土壤速效养分含量^[14]的提高,且都高于纯林或对照。但研究也发现,林草复合系统对土壤有机碳影响不显著,这可能是复合模式处于建立初期的原因所致^[44]。由上可见,林草复合系统土壤酶活性的提高能改善土壤养分状况,提高植物共生期间的养分转化速率,促进植物对有效养分的吸收,这对林草复合生态系统持续稳定发展有重要作用。

2.4.3 林草复合系统的土壤微生物作用 土壤微生物是土壤中生理、生化等各种反应的参与者和推动者^[46],是推动土壤物质转化、能量流动和营养元素生物地球化学循环的动力^[47],是地上与地下生态系统联系的桥梁和纽带,其种群数量与群落多样性是反映土壤生态系统变化的重要指标^[48]。作为林草复合系统的重要组成部分,土壤微生物在系统中发挥着不可替代的作用。茶园间作三叶草能够提高

微生物整体活性和丰富度,使茶园土壤保持较高的生物活性,间作有效改善了土壤养分和调控养分转化,提高了茶叶产量和品质^[49];槟榔(*Areca catechu*)间作香草兰(*Vanilla planifolia*)对土壤微生物(真菌、细菌和放线菌)数量、比例及土壤养分含量具有良好的调节作用且彼此显著相关^[50];果树—草(粮)间作模式土壤微生物数量和酶活性之间绝大部分呈显著或极显著相关^[51];但也有研究发现,不同

土层不同种微生物对土壤养分的促进作用呈负相关^[46]。林草复合系统土壤微生物量明显高于清耕对照,还可增加土地当量比^[52]。丛枝菌根真菌能够促进复合系统土壤养分的转移,改善土壤结构,提高植物的生物量,对植被修复有很重要的意义^[53]。可见,复合系统对改善和提高土壤微环境和质量有促进作用,有利于复合系统土壤生态效益提高(表 2)及经济效益增加。

表 2 各种林草复合系统土壤生态效益的提高潜力
Table 2 The improving potential of a variety of soil ecological benefits of silvopastoral system

土壤因子 Soil factors	土壤指标 Soil index	提高百分比(相比于清耕/对照) The percentage of increasing (Compared to the clean tillage/CK)	参考文献 Reference
土壤性状 Soil properties	水稳性团聚体含量 Water-stable aggregates content	2.93%~38.05%	[38,40,54]
	土壤微生物量碳含量 Soil microbial biomass carbon content	55.16%~74.68%	[44]
	土壤湿度(夏季) Soil moisture(summer)	3.00%~4.00%	[18,26]
土壤养分 Soil nutrients	有机质含量 Organic matter content	12.60%~45.10%	[3,17-18,41,50,54]
	全氮含量 Total nitrogen content	0.036%~53.70%	[18,41-42,50,54]
	速效磷含量 Available phosphorus content	21.21%~78.16%	[17-18,46]
土壤酶 Soil enzyme	磷酸酶活性 Acid phosphatase activities	7.50%~34.92%	[41,51]
	脲酶活性 Urease activities	19.10%~74.51%	[41-43,51]
	过氧化氢酶活性 Catalase activities	4.90%~13.85%	[41,51]
土壤微生物 Soil microbe	细菌数量 Bacteria quantity	50.00%~94.31%	[46,51]
	放线菌数量 Actinomyces quantity	12.06%~14.56%	[46,50-51]
	真菌数量 Fungus quantity	7.89%~146.15%	[41,46,50-51]

2.5 水分效益

2.5.1 林草复合系统的水土保持效益 林草复合系统可利用自身的多层次植被覆盖来保持水土。林木和草本植物能够逐层截留降水,使草本植物生长迅速,尽快覆盖地面,减轻雨滴直接击溅。同时,草本植物密集的根系能固结土壤,提高复合系统地表的抗冲刷能力,有效地减少土壤流失。复合系统还

能通过植株腐解提供大量有机质和氮素^[26,55],改善土壤结构,从而增强土壤的渗透性和蓄水力。例如,40%~60%的林草复合系统植被覆盖度对减轻坡面侵蚀作用明显^[56],能有效控制地表径流与保持水土流失,提高林地利用率^[57],而林草间作措施与工程措施相结合,能更加有效地防治各种形式的土壤侵蚀^[58]。Delgado 和 Canters^[55]利用土壤侵蚀模型

(WATEM/SEDEM)研究发现,土壤侵蚀风险模式中坡度大于8%的非复合系统土地,其有较高的侵蚀风险和空间差异性较大,而复合模式相对较小。总之,利用最优林草复合模式结合工程和管理措施可以有有效的控制水土流失,提高生态环境效益。

2.5.2 林草复合系统的土壤水分效应 土壤水分的分布和竞争机制一直是国内外研究的重点与热点。土壤水分具有高度的时空异质性,在不同时空尺度上,其影响因子并不相同^[59]。研究发现,林草界面的土壤水分含量和变异系数差别均不大,土壤水分含量随着土层深度的增加而减少,但土壤水分变异系数则相反,可能由于小尺度范围内降雨和雨水下渗速度差异造成的^[60]。杏树-黄芪(*Astragalus membranaceus*)复合系统的0—150 cm土壤贮水量高于清耕杏园,且在雨季中及雨季后期系统内0—150 cm土壤贮水量高于清耕杏园的效应更为显著^[61]。此外,复合系统土壤水分利用效率与系统的蒸散量密切相关,且复合系统的蒸散量通常高于牧草或林木单作^[62-63],土壤水分含量也相应地降低^[64]。最近 Pollock 等^[65]研究发现,林草复合系统的前几个季度,土壤水分能够互补性地满足林木与牧草正常生长,但是随着系统生物量的增加,土壤水分供应失去平衡;而到炎热的夏季时,系统蒸散量升高,加剧了土壤水分供应不足的情况,树木的生长受到制约。而对间作系统进行人为管理,保持系统土壤水分平衡,可使系统内植物正常生长。然而,也有研究发现林草复合系统中牧草的产量高于无林牧场,并且得出土壤有效水对牧草的生长没有生物学意义^[66]。可见,目前对林草复合系统土壤水分的作用机制尚不明确,土壤水分对复合系统的正负效应还没有统一的结论。

3 研究展望

3.1 问题与不足

1)不同林草复合系统在不同遮阴条件下,光资源的利用机理、光能的变化、林木的生长与牧草品质和产量之间的关系还不明确;微气候效应研究只是针对个别气候因子的探讨。

2)针对林草复合系统与全球气候变暖、固碳增汇机理研究、环境污染与生态破坏等热点问题的交叉研究明显不足。

3)林草复合系统生态效益定量和综合评价指标

体系、评价标准、评价方法和评价模型还不完善;林草复合系统的光合特性、微气候效应、生物多样性和土壤功能等指标的生态学关系缺乏系统研究。

4)林草复合系统的土壤微生物作用研究还多停留在宏观定量分析上,应加强应用分子生物学技术研究其系统内的深层互作机理,揭示系统内微生物与各个组分的关系。

5)林草复合系统的土壤水分状况与植物本身蒸腾耗水强度间的耦合关系、土壤水分配与供应机制及竞争作用引起的系统生产力下降的内在限制机理还需做进一步研究;林草复合系统多因子模型研究还不够充分,能够成功应用于林草间作的模型不多。

3.2 方法与途径

1)利用计算机和遥感技术准确评估和模拟分析林草复合系统的光合特性;研究林草复合系统混交实质,合理搭配混交种类、科学调控造林密度、高效人工管理和确定草本植物生长年限;不只是研究系统的微气候,还要深度分析林草复合系统的碳循环过程、碳储量的时空分布格局及其固碳增汇机制与调控机制,为揭示林草复合系统的固碳潜力与固碳机理提供数据支持。

2)利用分子生物学技术对不同地区林草复合系统的土壤微生物的分子遗传多样性进行研究,揭示不同间作地区土壤微生物种群多样性特征和变化;研究林草复合生态系统的土壤修复机理,针对不同土壤的污染特点,结合林草复合系统特定的物理、化学、生物特征及农艺措施研发有效的土壤修复间作系统。

3)利用大数据分析技术,完善林草复合系统生态效益的评价标准、方法和模型,且充分考虑当地的气候和土壤等自然条件和社会经济因素,因地制宜建立更为稳定、高效和优化的林草复合系统模式。

4)对林草复合系统土壤有机碳的时空动态变化、植被碳储量和微生物量等开展长期定位观测;设计能最大程度增加物种间互利共生和降低物种间竞争的复合系统;研究复合系统内不同物种对养分和水分吸收节律及竞争差异,土壤微生物、土壤活性酶与土壤质量三者间的相关性及互作机理;

5)开展林草复合系统土壤水分空间分布格局的定量化研究,土壤水分运移模式的构建与土壤水分利用管理措施研究;并在借鉴国外经典 APSIM^[67]和最新 FSPM^[68]模型的基础上,结合我国不同地区

不同林草间作模式的具体情况来完善和改良由土壤合地量化应用模型,将有助于林草复合系统整体水分布与光合效率、气候因子和生物成分等要素整性、系统性和定量性的研究。

参考文献

- [1] Flander P J. Identifying fly ash at a distance from fossil fuel power stations[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(4): 528-532.
- [2] 卢琦, 赵体顺, 师永全, 杨修. 农用林业系统仿真的理论与方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999: 16.
- [3] 秦树高, 吴斌, 张宇清. 林草复合系统地上部分种间互作关系研究进展[J]. *生态学报*, 2010, 30(13): 3616-3627.
- [4] 云雷, 毕华兴, 马雯静, 田晓玲, 崔哲伟, 周晖子, 朱悦. 晋西黄土区林草复合系统土壤养分分布特征及边界效应[J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(2): 37-42.
- [5] Pandey D N. Carbon sequestration in agroforestry systems[J]. *Climate Policy*, 2002, 2: 367-377.
- [6] 刘兴宇, 曾德慧. 农林复合系统种间关系研究进展[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1464-1470.
- [7] Nair P K R. Classification of agroforestry systems[J]. *Agroforestry Systems*, 1985, 3(2): 97-128.
- [8] 毛璐, 曾德慧. 农林复合系统植物竞争研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(2): 379-386.
- [9] 赵粉侠, 李根前. 林草复合系统研究现状[J]. *西北林学院学报*, 1996, 11(4): 81-86.
- [10] Cubbage F, Balmelli G, Bussoni A, Noellemeyer E, Pachas A N, Fassola H, Colcombet L, Rossner B, Frey G, Dube F, de Silva M L, Stevenson H, Hamilton J, Hubbard W. Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world[J]. *Agroforestry Systems*, 2012, 86: 303-314.
- [11] Zomer R J, Trabucco A, Coe R, Place F. Trees on farm: Analysis of global extent and geographical patterns of agroforestry[R]. Nairobi, Kenya: ICRAF Working Paper, World Agroforestry Centre, 2009.
- [12] 平晓燕, 王铁梅, 卢欣石. 农林复合系统固碳潜力研究进展[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(1): 80-92.
- [13] Yadava A K. Carbon sequestration: Under exploited environmental benefits of *Tarai agroforestry* systems[J]. *Indian Journal of Soil Conservation*, 2010, 38: 125-131.
- [14] Sujatha S, Bhat R. Response of vanilla (*Vanilla planifolia*) intercropped in arecanut to irrigation and nutrition in humid tropics of India[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(7): 988-994.
- [15] Tumwebaze S B, Bevilacqua E, Briggs R, Volk T. Soil organic carbon under a linear simultaneous agroforestry system in Uganda[J]. *Agroforestry Systems*, 2012, 84: 11-23.
- [16] Moorhead D J, Dickens E D. Agroforestry: A profitable land use. An overview of the 12th North American Agroforestry Conference[J]. *Agroforestry Systems*, 2012, 86: 299-302.
- [17] 张久海, 安树青, 李国旗, 陈兴龙, 谈建康, 张纪林. 林牧复合生态系统研究述评[J]. *中国草地*, 1999(4): 52-60.
- [18] 曾艳琼, 卢欣石. 林草复合生态系统的研究现状及效益分析[J]. *草业科学*, 2008, 25(3): 33-36.
- [19] 刘闯, 胡庭兴, 李强, 李仁洪, 谢财永, 吴小山. 巨桉林草间作模式中牧草光合生理生态适应性研究[J]. *草业学报*, 2008, 17(1): 58-65.
- [20] Silva-pando F J, Gonzalez-Hernandez M P, Pozados-Lorenzo M J. Pasture production in a silvopastoral system in relation with microclimate variables in the *Atlantic coast* of Spain[J]. *Agroforestry Systems*, 2002, 56(3): 201-211.
- [21] Perry M E L, Schacht W H, Ruark G A, Brandle J R. Tree canopy effect on grass and grass/legume mixtures in eastern Nebraska[J]. *Agroforestry Systems*, 2009, 77: 23-35.
- [22] 胡举伟, 朱文旭, 张会慧, 孙广玉. 桑树/苜蓿间作对其生长及土地和光资源利用能力的影响[J]. *草地学报*, 2013, 21(3): 494-500.
- [23] Medinilla-Salinas L, de la Cruz Vargas-Mendoza M, López-Ortiz S, Ávila-Reséndiz C, Campbell W B, del Carmen Gutiérrez-Castorena M. Growth, productivity and quality of *Megathyrsus maximus* under cover from *Gliricidia sepium*[J]. *Agroforestry Systems*, 2013, 87: 891-899.
- [24] Peri P L, Moot D J, McNeil D L. Validation of a canopy photosynthesis model for cocksfoot pasture grown under different light regimes[J]. *Agroforestry Systems*, 2006, 67(3): 259-272.
- [25] 李会科, 梅立新, 高华. 黄土高原旱地苹果园生草对果园小气候的影响[J]. *草地学报*, 2009, 17(5): 615-620.

- [26] 高路博,毕华兴,云雷,刘李霞,朱悦,黄土半干旱区林草复合优化配置与结构调控研究进展[J].水土保持研究,2011,18(3):260-266.
- [27] Feldhake C M. Microclimate of a natural pasture under planted *Robinia pseudoacacia* in central Appalachia, West Virginia [J]. Agroforestry systems, 2001, 53(3): 297-303.
- [28] Karki U, Goodman M S. Microclimatic differences between young long leaf-pine silvopasture and open-pasture [J]. Agroforestry Systems, 2013, 87: 303-310.
- [29] 胡亮辉,王美超,孔云,姚允聪,魏巍,宋备舟,李振茹.梨园芳香植物间作区节肢动物群落时序格局[J].生态学报,2012,30(17):4578-4589.
- [30] Song B Z, Wu H Y, Kong Y, Zhang J, Du Y L, Hu J H, Yao Y C. Effects of intercropping with aromatic plants on the diversity and structure of an arthropod community in a pear orchard [J]. Biology Control, 2010, 55: 741-751.
- [31] 王有年,赵莉茜,苗振旺,李登科,师光禄.间作牧草枣林蚱虫群落及其天敌功能团的组成与时空动态[J].生态学报,2009,29(1):466-474.
- [32] Shi G L, Zhao L I, Miao Z W, Liu S Q, Cao H, Li S Y, Pike B. Structure characteristics of the arthropod community in the jujube orchards with different habitats [J]. Acta Entomologica Sinica, 2005, 48(4): 561-567.
- [33] Kong C, Hu F, Xu X, Zhang M, Liang W. Volatile allelochemicals in the *Ageratum conyzoides* intercropped citrus orchard and their effects on mites *Amblyseius newsami* and *Panonychus citri* [J]. Journal of Chemical Ecology, 2005, 31(9): 2193-2203.
- [34] Tang G B, Song B Z, Zhao L L, Sang X S, Wan H H, Zhang J, Yao Y C. Repellent and attractive effects of herbs on insects in pear orchards intercropped with aromatic plants [J]. Agroforestry Systems, 2013, 87: 273-285.
- [35] Bembo S K, Nowak J, Blount A R, Long A J, Osiecka A. Soil nitrate leaching in silvopastures compared with open pasture and pine plantation [J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(5): 1870-1877.
- [36] Nyakatawa E Z, Mays D A, Naka K, Bukenya J O. Carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in a loblolly pine-goat silvopasture system in the Southeast USA [J]. Agroforestry Systems, 2012, 86: 129-140.
- [37] Pramod J, Nikita G, Bril L, Jha P, Garg N, Lakaria B L, Biswas A K, Rao A S. Soil and residue carbon mineralization as affected by soil aggregate size [J]. Soil & Tillage Research, 2012, 121(3): 57-62.
- [38] 王英俊,李同川,张道勇,贾曼莉,李会科,曹卫东.间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响[J].草地学报,2013,21(3):485-493.
- [39] Ramos M E, Benítez E, García P A, Robles A B. Cover crop under different managements vs. frequent tillage in almond orchards in semiarid conditions: Effects on soil quality [J]. Applied Soil Ecology, 2010, 44(1): 6-14.
- [40] 王义祥,翁伯琦,黄毅斌,王成己,叶菁.生草栽培对果园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].热带亚热带植物学报,2012,20(4):349-355.
- [41] 徐华勤,肖润林,向佐湘,宋同清,任全,黄瑶,秦钟.稻草覆盖、间作三叶草茶园土壤酶活性与养分的关系[J].生态学杂志,2009,28(8):1537-1547.
- [42] Wang G B, Cao F L. Integrated evaluation of soil fertility in Ginkgo (*Ginkgo biloba* L.) agroforestry systems in Jiangsu, China [J]. Agroforestry Systems, 2011, 83: 89-100.
- [43] Kremer R J, Kussman R D. Soil quality in a pecan-kura clover alley cropping system in the Midwestern USA [J]. Agroforestry systems, 2011, 83: 213-223.
- [44] 何云,周义贵,李贤伟,苗宇,范川,陈栎霖.台湾桉木林草复合模式土壤微生物量碳季节动态[J].林业科学,2013,43(7):26-33.
- [45] Michel G A, Nair V D, Nair P K R. Silvopasture for reducing phosphorus loss from subtropical sandy soils [J]. Plant and Soil, 2007, 297: 267-276.
- [46] 吴红英,孔云,姚允聪,毕宁宁,亓丽萍,付占国.间作芳香植物对沙地梨园土壤微生物数量与土壤养分的影响[J].中国农业科学,2010,43(1):140-150.
- [47] Sandra R D, Kathleen K T. The effect of fire on microbial biomass: A meta-analysis of field studies [J]. Biogeochemistry, 2012, 109(1): 49-61.
- [48] Visser S, Parkinson D. Soil biological criteria as indicators of soil quality: Soil microorganisms [J]. American Journal of

- Alternative Agriculture, 1992, 7: 33-37.
- [49] 徐华勤, 肖润林, 宋同清, 罗文, 任全, 黄瑶. 稻草覆盖与间作三叶草对丘陵茶园土壤微生物群落功能的影响[J]. 生物多样性, 2008, 16(2): 166-174.
- [50] 王华, 王辉, 赵青云, 庄辉发, 宋应辉, 朱自慧. 槟榔不同株行距间作香草兰对土壤养分和微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 988-994.
- [51] 蔡倩, 杜国栋, 吕德国, 何跃, 姜涛, 孙继军, 于涛. 科尔沁沙地南部果-草(粮)间作模式对土壤微生物和酶的影响[J]. 干旱区农业研究, 2010, 28(4): 217-222.
- [52] Rivest D, Cogliastro A, Bradley R L, Olivier A. Intercropping hybrid poplar with soybean increases soil microbial biomass, mineral N supply and tree growth[J]. Agroforestry Systems, 2010, 80: 33-40.
- [53] Williams A, Ridgway H J, Norton D A. Different arbuscular mycorrhizae and competition with an exotic grass affect the growth of *Podocarpus cunninghamii* Colenso cuttings[J]. New Forests, 2013, 44: 183-195.
- [54] 樊巍, 高喜荣. 林草牧复合系统研究进展[J]. 林业科学研究, 2004, 17(4): 519-524.
- [55] Delgado M E M, Canters F. Modeling the impacts of agroforestry systems on the spatial patterns of soil erosion risk in three catchments of Claveria, the Philippines[J]. Agroforestry System, 2012, 85: 411-423.
- [56] 刘斌, 罗全华, 常文哲, 许小梅. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 68-73.
- [57] 王会利, 蒋隼, 曹继钊, 曾辉, 梁燕芳, 吴海潮, 刘德杰. 桉树复合经营模式的水土保持效益分析[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(4): 104-107.
- [58] Zhang J H, Su Z A, Liu G C. Effects of terracing and agroforestry on soil and water loss in Hilly Areas of the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 5: 241-248.
- [59] Wang J, Fu B J, Qiu Y, Chen L, Wang Z. Geostatistical analysis of soil moisture variability on *Danangou catchment* of the Loess Plateau, China[J]. Environment Geology, 2001, 41: 113-120.
- [60] 云雷, 毕华兴, 田晓玲, 马雯静, 崔哲伟. 晋西黄土区林草复合界面雨后土壤水分空间变异规律研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 938-944.
- [61] 高峻, 张劲松, 孟平. 黄土丘陵沟壑区杏树-黄芪复合系统土壤水分效应研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 84-88.
- [62] Gyenge J E, Ferndndez M E, Dalla S G, Schlichter T M. Silvopastoral systems in Northwestern Patagonia II: Water balance and water potential in a stand of *Pinus ponderosa* and native grassland[J]. Agroforestry Systems, 2002, 55(1): 47-55.
- [63] Yunusa I A M, Mead D J, Lucas R J, Pollock K M. Process studies in a *Pinus radiata*-pasture agroforestry system in a subhumid temperature environment. I. Water use and light interception in the third year[J]. Agroforestry Systems, 1995, 32(2): 163-183.
- [64] Chang S X, Mead D J. Growth of radiate pine (*Pinus radiata* D. Don) as influenced by understory species in a silvopastoral system in New Zealand[J]. Agroforestry Systems, 2002, 59(1): 43-51.
- [65] Pollock K M, Donald J M, McKenzie B A. Soil moisture and water use by pastures and sivopa stures in a sub-humid temperate climate in New Zealand[J]. Agroforestry Systems, 2009, 75: 223-238.
- [66] DeBruyne S A, Feldhake C M, Burger J A, Fike J H. Tree effects on forage growth and soil water in an appalachian silvo-pasture[J]. Agroforestry Systems, 2011, 83: 189-200.
- [67] Kropff M J, van Laar H H. Modelling Crop-Weed Interactions[M]. Wallingford Oxon, UK: CAB International, 1993: 274.
- [68] Vos J, Evers J B, Buck-Sorlin G H, Andrieu B, Chelle M, de Visser P H B. Functional-structural plant modelling: A new versatile tool in crop science[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(8): 2101-2115.

(责任编辑 武艳培)