

林草复合系统地上部分种间互作关系研究进展

秦树高¹, 吴 斌^{1,2}, 张宇清^{1,2,*}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 国家林业局宁夏盐池荒漠生态系统定位研究站, 北京 100083)

摘要:林草复合系统因其具有产品多样性、生产高效性、环境友好性等特点,在世界范围内得到普遍应用,同时也是我国西部地区生态环境建设中的重要类型之一。在林草复合系统中,种间互作关系能够直接影响到系统经营的成功与否,因此一直以来都是本领域研究的热点内容。地上部分种间互作关系指发生或表现在地表以上的物种之间直接或间接的相互作用关系,在林草复合系统中主要表现为:系统对林地小气候的影响,林木与牧草在生长和生产过程中的相互作用,系统对生物多样性的影响以及林木的存在和生长与放牧活动之间的相互作用。在林草复合系统中,林分通过对诸多气象要素的调节,为牧草和牲畜的生长发育提供了良好的气象条件;同时牧草通过增加空气湿度、减小土壤和空气温度的变化幅度,可对林木(特别是幼树)起到一定保护作用。牧草能够发生一系列生理生态反应(增加叶面积指数和叶绿素含量、提高光利用效率等),以适应林分对小气候的改变,而其产量和质量会受到系统物种组成、配置模式和林木遮荫的共同影响。林木遮荫通常会降低牧草产量,但会使牧草品质得到一定改善。而热带稀疏草原上孤立树的遮荫和草牧场防护林的庇护,均可有效提高和改善牧草的产量和品质。将低竞争性的牧草(尤其是豆科牧草)引入森林或果园之中,林产品的产量和品质、林木生长特性能够得到相应的提高和改善;但在困难立地条件下进行这样的尝试,由于林草之间存在着激烈的竞争,往往会产生相反的结果。林草复合系统具有多样的物种组成和复杂的系统结构,可为害虫天敌提供丰富的食物和良好生境,有助于实现森林和果园的生态化经营。在有牲畜参与的林草复合系统中,尽管牲畜对林下植被的采食,可增加林木对土壤资源的占有率,而林分对小气候的改善,可有效改善牲畜生产特性和福利状况,但牲畜活动也会对林木造成一些机械伤害,因此有必要对林木进行一定的保护。通过对上述研究的分析总结,可为林草复合系统的设计、建设和经营管理提供一定的经验借鉴,以优化系统结构和资源利用格局,减小物种之间的负面影响,最终实现系统综合收益最大化。未来应加强生理学在林草复合系统种间互作研究中的应用,揭示种间互作结果的生理学原因;构建和完善林草对太阳辐射利用关系的长期动态模型;探索系统增加生物多样性的机理;研究牲畜造成的机械损伤对林木生长的影响及相应防护技术,以及开展林草复合系统地上部分种间互作关系对全球气候变化响应的研究等。

关键词:复合农林系统;林草复合系统;种间互作关系;竞争;共栖;小气候效应;生理生态反应

A review of above-ground interactions in silvopasture systems

QIN Shugao¹, WU Bin^{1,2}, ZHANG Yuqing^{1,2,*}

¹ School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² Ningxia Yanchi Desert Ecosystem Research Station of State Forestry Administration, Beijing 100083, China

Abstract: As a major category of agroforestry, silvopasture systems, because of its diversity of products, great efficiency and environmental improvement, has been one of the most important practice for ecosystem rehabilitation in northwestern China. Because the outputs of the systems are affected immensely by designed components, interspecific interactions have been the focus of research in silvopasture systems. Above-ground interactions mean direct or indirect non-underground interactions between different species in a community, including microclimatic modification and biodiversity increase, effects among plant species, relationship between woody plants and livestock, etc. This review summarises current knowledge on above-ground interactions in silvopasture systems, discussing cases from research reports and drawing on experiences from practices in the world. In silvopasture systems, by decreasing solar radiation and heat dissipation, reducing evapotranspiration and air flow, and raising air humidity and snow cover, trees provide favorable microclimatic

基金项目:国家科技支撑项目(2006BAD26B03);教育部博士点新教师基金课题(200800221003)

收稿日期:2009-12-18; **修订日期:**2010-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyq@bjfu.edu.cn

conditions for herbage and livestock; And in turn, herbage provide protection to trees, especially to seedlings, by increasing air humidity, reducing air and soil temperature variation. Herbage make some eco-physiological responses to the presence of trees, e. g. enhancing leaf area index and chlorophyll content, improving light use efficiency, reducing tillering and tillers' relative growth, and delaying maturity. The yield and quality of forage depend on many factors, such as species, space arrangement and shade. Generally, solar radiation interception of woody plants may decrease forage yield, but improve quality of forage simultaneously. Both yield and quality of grass can be enhanced under the canopies of isolated trees in tropical savanna and near windbreaks on rangelands, because of favorable microclimate, and availability of soil water and nutrient. The yield and quality of forest products, and growth performance of trees are improved, by introducing lower competition forage, especially legume, into forests and orchards; However, due to severely competition for soil resource between woody plants and grass, opposite consequence usually occur in silvopasture systems on infertile sites. Silvopasture systems, with more species and components, provide abundant food, favorable habitat for predators, improving biodiversity and stability of silvopasture systems, that may contribute to eco-environmentally-friendly management of forests and orchards. In silvopasture systems involving livestock, while grazing of livestock can reduce competition from grass, animals' gnawing and trampling also hurt the trees combined. Consequently, it is necessary that some equipments for trees defending the mechanical damage of livestock, such as tree shelters and electric fences. The performance and welfare of livestock may be enhanced because of favorable conditions provided by trees. The knowledge aforementioned can provide some suggestions for component design, system optimizing, sustainable land use, alleviation of adverse interactions and maximal outputs of silvopasture systems in China. The paper also suggests that more researches should be carried out further in physiological mechanisms of interspecific interactions, long-term and dynamic models of light utility between woody plants and herbage, biodiversity protection mechanism, some protective approaches for mechanical damage of animals, and the system responses to global climate change.

Key Words: agroforestry system; silvopasture system; interspecific interaction; competition; commensalism; microclimate effect; eco-physiological response

20 世纪 70 年代以来,伴随着科技进步和社会生产力的极大发展,人口、资源、环境 and 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、环境污染、生物多样性降低和生态失调等,于是实现可持续发展已成为世界各国面临的紧迫艰难而又无法回避的任务。在这样的历史背景之下,复合农林系统因其能够提高土地生产力、改善生态环境、保护生物多样性和高效利用自然资源,具有优越的可持续发展特征,而越来越受到人们的关注^[1]。林草复合系统,也称林草牧复合系统,属于复合农林系统的一个大类,是指将多年生木本植物(乔木、灌木、棕榈和竹类等)与牧草和(或)牲畜有机结合(长期或短期)而形成的复合型土地利用和经营方式^[2],一般多由人工配置或干预形成,也有自然形成的类型(表 1)。

林草复合系统作为一种传统的复合农林经营方式,因其具有产品多样性、生产高效性、环境友好性等特点,在世界范围内已得到普遍应用。在我国西部地区开展的退耕还林工程、草牧场防护林建设工程、防沙治沙和石漠化防治等生态环境建设工程中,林草复合系统作为一种重要生物治理措施已得到充分重视和广泛应用^[3]。尽管林草复合系统是一种古老的土地复合经营方式,但对其进行系统科学的研究却始于 20 世纪 70 年代中期,复合农林学作为一门学科之后。

种间互作关系,也称为种间关系或物种互作,指一个生态系统中不同物种种群之间直接或间接的相互作用,常表现为种群间的竞争、捕食、寄生、共生和共栖等关系^[4]。在林草复合系统中种间互作关系以林木与草本植物对土壤资源和生存空间的竞争,林木与草本植物、牲畜以及其他动物的共栖关系为主。林草复合系统种间互作关系决定着系统经营成功与否,所以对种间互作关系进行全面的认识有助于优化系统结构和资源利用格局,减少种间负面效应,确定适宜的管理措施,保证系统综合效益实现最大化,故而一直以来都是本领域

研究的热点之一^[1,5]。

表 1 林草复合系统的类型、分布区域及主要特点
Table 1 The types, distribution region and key features of silvopasture systems

类型 Types	分布区域 Distributing region	主要特点 Key features
自然形成 Natural forms	热带稀树草原 Tropical savanna	非洲、南美洲、澳大利亚等
	栎树稀树草原 Oak savanna	北美洲
	灌木草原 Steppe	南美洲、中亚、土耳其等
人工形成 Artificial forms	林草间作 Intercropping trees with herbage	全球
	有林草牧场 Rangeland with trees/shelterbelt	
	果园种草 Orchard sod	
	林地放牧 Grazing in forest	
	饲料林 Forage forest	

林草复合系统中种间互作关系依据其发生和表现的部位,可将其分为地上和地下两部分,而化感作用因其特殊性而作为独立的一部分。地上部分为生物组分之间的相互作用对彼此生命过程的影响,即林木与草本植物/牲畜在生长和生产过程中的相互作用关系。地下部分为林木与草本植物相互影响下的根系分布状况,土壤理化性质的变化以及林木的水分提升作用。化感作用为林草复合系统中林木(草本植物)通过产生和释放化感物质而对草本植物(林木)的生长发育产生有害(或有益)的影响。林草复合系统中林草地上部分种间互作关系很大程度上受到二者根系分布和水肥竞争状况的影响。由于林草对降水和太阳辐射等的重新分配,使得林地土壤水分状况和林草固定太阳能的比例发生改变,这会直接影响到二者对土壤水分和养分(养分吸收为耗能过程)的共同利用关系。而林草之间的化感作用会使对方地上部分和(或)根系生长受到抑制(或促进),进而影响到林草地上和(或)地下部分种间互作关系。因此,这 3 部分并非截然割裂的,而是紧密联系的统一体。本文仅对林草复合系统地上部分的种间互作关系研究进展进行介绍,以期深入对林草复合系统地上部分种间互作关系的认识和理解,为该类系统在今后的设计建设、经营管理提供一定的借鉴。

1 林草复合系统的小气候效应

林草复合系统中,林分通过对诸多气象要素的调节,使得林地小气候得到改善,通常表现为改变林地辐射状况,降低林地空气流动速率,增加空气湿度,减少林地蒸散量及夜间热量散失,增加冬春季积雪数量等,从而为牧草和牲畜的生长发育提供一个相对稳定和优越的气象环境。相关的成果多集中在草牧场防护林研究领域之中。

在非洲稀树草原上,旋扭相思树(*Acacia tortilis*)和猴面包树(*Adansonia digitata*)孤立木的树冠可以拦截 45%—65% 的太阳辐射^[6]。Feldhake^[7]在美国西弗吉尼亚州对刺槐(*Robinia pseudoacacia*)-牧草复合系统的研究表明,树冠的遮荫作用,可以减小草地光合有效辐射和表层土温在一日之中的急剧变化。

草牧场防护林可使其庇护范围内的草地平均风速得到有效降低,在夏季能够减小干热气流对牧草生长的不利影响,同时还能减少灌溉水的散失,提高水分利用率^[8]。向开馥等^[9]的报道指出,在牧草生长期,具有通风结构的白城杨(*Populus simonii* × *P. pyramidalis*)防护林,可显著降低林内及林带背风面 10 倍树高范围内

的风速,并可使风速在迎风面 5 倍树高范围内有一定降低。防护林能够增加林地空气湿度,减小林网内部空气湿度饱和差^[10],加之风速的降低,以及避免因牧草叶片组织受到风沙的磨损而造成水分散失^[11],使得林地蒸散量有所降低。此外,防护林还具有减小草牧场夜间热量散失^[12]和在冬春季增加草牧场积雪数量^[13]的作用,这对春季牧草返青后的生长非常有利。

在林草复合系统中,草本植物对林地小气候也具有一定的调节作用,可缓冲林地气温和土温的变化,并能够使林地空气湿度得到提高,对减少林木能量消耗和对幼龄林的保护具有重要意义。Mead 等^[14]报道,2 年生辐射松(*Pinus radiata*)幼林地种植黑麦草(*Lolium perene*)和紫花苜蓿(*Medicago sativa*)可降低风为诱因的树干倾斜现象。果园种草后,夏季地表以上 15—50cm 处气温可比清耕果园降低 1.9—2.2℃,相对湿度提高 9.7%,地表温度降低 5.6℃左右^[15],有利于减少土壤水分蒸发和高温对林木的危害。

2 林木与牧草的互作关系

2.1 牧草对林分存在的生理生态反应

由于林木组分的存在,牧草会做出一系列生理生态反应,以适应特定的林地小环境。生长在防护林庇护之下的牧草具有更高的叶面积指数,并因此会引起土壤水分的过快消耗^[11]。阿根廷的研究发现,遮荫条件下 C4 型草本植物 *Trichloris crinita* 的叶绿素含量随光照的减少而显著地增加,其生长习性也由直立状生长变为倒伏状,以捕获更多的太阳辐射^[16]。此外,在林木遮荫条件下一些牧草的光能利用率会有所提高,从而有效地补偿了林分遮荫对牧草生长的不利影响^[17]。林分的遮荫作用可以提高牧草日出前的水势,改善牧草生长的水分环境^[18],促进其生长;与此同时,还会抑制一些牧草的分蘖数量和蘖枝相对生长量^[19],可能会不利于牧草的生产。McGraw 等^[20]研究指出,在行距为 12.2 m 的美国黑核桃(*Juglans nigra*)林地上间作紫花苜蓿,牧草的成熟期与单作相比有所推迟。

2.2 林分对牧草产量的影响

林草间作复合系统中,牧草产量较多地受到林木与牧草品种、林木配置和树冠遮荫的影响。非洲稀树草原上的孤立木之下的牧草产量远高于空旷草地^[21-22]。草牧场防护林为牧草生长创造了良好的小气候,减轻灾害性天气的不利影响,有效地控制土壤风蚀,可以促进牧草的生长和发育,使其生产潜力得到充分地发挥,因此,牧草的产量高于无林草牧场^[23-24]。而在林草间作复合系统中,由于林木对土壤水分的竞争以及树冠对太阳辐射的拦截,使得单位土地面积上的牧草产量往往低于全光照条件^[25],此外牧草产量还受到林木密度、林龄、复合系统经营年限、牧草与树木的位置关系等共同影响。Perry 等^[26]指出,在苏格兰松(*Pinus sylvestris*)和 *Fraxinus pennsylvanica* 林下,大须芒草(*Andropogon gerardii*)和无芒雀麦(*Bromus inermis*)的产量随树冠透光度的增大(或随林木叶面积指数的减小)而增大。Walker 等^[27]研究了常桉(*Eucalyptus crebra*)纯林疏伐对牧草的影响,发现牧草产量与林木密度成负线性相关,伴随着疏伐过程牧草数量会得到持续补充。在卡路金合欢(*Acacia karroo*)对邻近牧草作用的研究中发现,林木对牧草产量的促进和不利影响的净效应由林木密度所决定,当林木密度较小时,牧草产量高于无林草地;当超过临界密度时,牧草产量随着密度增大而降低^[28]。在林木密度过大的林地上间作高耗水性的牧草,会引发林草之间发生激烈的水分竞争,造成牧草产量较低^[20]。林木在幼龄期对土壤资源的需求较少,较小的树冠遮荫作用很弱,宜间作牧草。Guevara-Escobar^[25]指出,新西兰山区的杨树(*Populus* spp.)-牧草复合系统,与开阔草地相比,幼林下的牧草产量与之相当;但在成熟林下牧草产量不足开阔草地的 40%,这是因为成熟林木具有较强的遮荫作用,应采用适当的措施限制其树冠规模,以降低遮荫作用对牧草生产的不利影响。另外一种情况是,林分的存在不会对牧草产量产生影响。Bartolome 等^[29]指出,将蓝栎(*Quercus douglasii*)从其生长的草场中移除,3a 后牧草的覆盖度从原来的 24.3% 提高到 32.6%,但产量无显著变化。

林草复合系统中,牧草产量会因林草品种及牧草光合作用途径不同而受到影响。Mathew 等^[30]对印度南部湿润地区木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)、岭南樗树(*Ailanthus malabarica*)、大叶相思(*Acacia auriculiformis*)和银合欢(*Leucaena leucocephala*)与 4 种牧草复合种植的生产性状进行了比较,发现树冠形成后林木对牧草生

长和产量具有负面影响,而且不同组合之间存在差异,并认为木麻黄与象草(*Pennisetum purpureum*)是最适宜的组合。暖季型牧草绿黍(*Panicum maximum* var. *trichoglume*)和*Setaria leucopila*在蜜牧豆树(*Prosopis glandulosa* var. *glandulosa*)下干物质最大累积量与其在全光照下相比分别提高 51.93% 和 98.25%,而相同情况下冷季型的加拿大披碱草(*Elymus canadensis*)和弗吉尼亚披碱草(*Elymus virginicus*)的产量则降低 24.92% 和基本保持不变^[31]。McPherson 等^[32]的研究表明,移除栎树(*Quercus* spp.)树冠后,C4 型禾本科牧草产量当年可以增加 9 倍之多,而后每年产量呈下降趋势,C3 型禾本科牧草产量无明显变化,说明牧草光合作用途径不同,对林木遮荫作用的反应也有极大差异。

松-草复合系统经营模式在北美洲、大洋洲和欧洲等地得到广泛应用和深入研究。相应的成果表明,牧草的产量与树冠大小及透光度、林木配置模式密切相关。对辐射松林草复合系统的研究显示,牧草产量分别与树冠水平投影面积、林木郁闭度和树冠透光度存在着很强的负线性相关。Silva-Pando 等^[33]指出,辐射松林地混播鸭茅(*Dactylis glomerata*)和白花三叶草(*Trifolium repens*),牧草年产量与树冠的透光度成显著线性关系,而在无遮荫条件下达到最高。松草复合系统中,林木会对一定范围内的牧草产量产生影响,采用两行一带种植模式可以实现比单行种植更大的牧草产量,林带间距的增大也可促进牧草增产。9—10 年生的花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)会影响到其树干距离 4.5 m 以内牧草的产量^[34]。在未影响木材生产的前提下,采用两行一带种植模式(1.22 m × 2.44 m × 12.20 m)的湿地松(*Pinus elliottii*)林草复合系统可以实现比林木单行种植更高的牧草产量^[35]。Burner 等^[36]在美国东南部对火炬松(*Pinus taeda*)-高羊茅(*Festuca arundinacea*)复合系统研究表明,高羊茅的产量随林带间距的增大而增加,这可能由于林带间距增大而提高了到达草地表面的太阳辐射量,促进了牧草的生长,因此当火炬松遮荫作用过强时可以通过疏伐或修枝,减少树冠对太阳辐射的拦截量^[37]。

非洲稀树草原上林木的遮盖作用可以改善小气候,多数情况下能够增加牧草产量,有时牧草在树冠下的产量甚至可以达到开阔草地的 3 倍之多^[21],而这种增产作用与林龄、树冠规模和林木密度都有着密切的关系。Belsky 等^[22]对肯尼亚干旱稀树草原的研究发现,在成熟的旋扭相思树和猴面包树孤立木下,牧草产量比开阔草地高 95%,这可能是由于树冠遮荫降低地表温度,减少土壤水分蒸发量造成的^[38],但在相对湿润的环境中下林木对牧草的增产作用会有所减弱,表明只有存在一定的水分胁迫时,树冠遮荫才更多的表现为对牧草生长的促进作用^[39-40]。Ludwig 等^[39]经过为期 2a 的研究表明,非洲稀树草原上孤立木下牧草产量增加与否,取决于遮荫作用对牧草生长的促进作用(增加水分、养分有效性)和抑制作用(拦截太阳辐射)的综合结果。林木遮荫使得在湿润季节牧草接受到的太阳辐射量相对不足,限制牧草的生长;而在干旱季节,却有效地改善牧草的水分、养分条件,对牧草生长起到促进作用。Ludwig 等^[41]还发现,如果旋扭相思树与树下牧草存在激烈的水分竞争,那么树下牧草产量与开阔草地差别不大。此外,在死亡的旋扭相思树下牧草产量比活树下高 60%,这是由于牧草一方面可以利用林木残体分解释放出的营养元素,另一方面树下土壤水分利用状况随着林木死亡得到极大地改善。

一般地,草牧场防护林可有效地提高牧草产量,提高草地载畜率。苏格兰南部的研究表明,防护林在春季对牧草干物质生产无显著影响,而在牧草收割以后的再生长阶段,干物质产量较对照可提高 28%^[42]。刘淑玲等^[23]指出,20 年生樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林带防护下的草场产量比无林草场高 62.82%,绵羊的载畜率为 1.27 只/hm²(无林草场仅为 0.60 只/hm²),绵羊采食后牧草恢复时间可提前 2—4d。也有研究表明,多雨湿润的立地上紧密结构的宽林带对牧草生长无显著影响^[43]。

2.3 林分对牧草品质的影响

林木的引入或者遮荫作用对牧草品质的影响,因牧草种类不同存在着极大的差异,可能会对牧草品质产生正面(负面)或不产生影响。

多数研究表明,牧草品质在林木引入后或遮荫条件下均能够得到一定的改善,这在松草复合系统的研究中已得到广泛地证实^[37,44]。Burner 等^[37]指出,随着火炬松林带间距的增大,高羊茅的品质如粗蛋白、Ca 和 P

含量,以及干物质消化率都呈下降的趋势,而当林带间距为 4.9 m 时,牧草的产量和品质能够实现理想的平衡。Neel 等^[44]证实,当到达草地的太阳辐射为最大辐射量的 80% 时,牧草干物质与营养物质的产量可以得到兼顾。在澳大利亚的桉树(*Eucalyptus* spp.)林草复合系统中非洲稀树草原上,生长树冠下的牧草一般具有较开阔草地更优的品质^[45-46],这是由于树冠遮荫改善了牧草生长环境,同时树冠下土壤往往具有更高的养分有效性^[38]。Wilson 等^[45]发现,在巨桉(*Eucalyptus grandis*)树冠下种植的百喜草(*Paspalum notatum*)与生长在全光照下相比,绿叶比例更高,N、P 和水分含量也较高。旋扭相思树下生长的牧草,由于具有更优的茎叶比、更高的蛋白质含量和较低的纤维含量,与生长在开阔地上的牧草相比具有更好的品质^[46]。

草牧场防护林也可以使牧草品质得到改善。周新华等^[47]指出,防护林庇护下的几种主要牧草品质得到一定改善,在营养期牧草粗蛋白和 P 的绝对含量分别提高 1.365% 和 0.012%,无氮浸出物的绝对含量降低 2.025%。一些研究表明,草牧场防护林可以增加优质牧草(以豆科和禾本科为主)的数量、种类和占有率^[23-24],这可能是草牧场防护林促进天然牧草品质提高的重要原因之一。

East 等^[31]研究表明,与开阔地相比,生长在蜜牧豆树下的绿黍平均 N 含量有显著提高,而 *Setaria leucopila* 的粗蛋白含量则有减少的趋势,但二者的干物质消化率都有较大的降低。Douglas 等^[48]发现,杨树引入草地后,牧草品质变化很小,这表明牧草品质未对立地小气候的改变产生明显响应。Guevara-Escobar^[25]却认为,除春季以外,杨树下牧草的品质要比开阔草地差。

2.4 牧草对林木叶片养分含量和生理活性的影响

林地间作豆科牧草或果园种草,可有效增加林木叶片的养分含量^[49],果园种草还能够提高果树叶片生理活性和生殖能力^[50],但草本植物的竞争可能会影响到林木对养分的吸收^[51]。

豆科牧草所固定的 N 通过向林木转移可提高树叶 N 含量,这在美国黑核桃间作紫花苜蓿与 *Onobrychis sativa* 的试验中得到了证实^[49]。果园种草,由于草本植物对土壤养分的竞争,果树叶片中 N 含量在起初几年会有所降低^[51],而 P、K 含量有一定的提高^[52],这可能是树体内 N 水平降低使其营养生长受到抑制,而减少了对 P、K 的消耗所致^[53]。兰彦平等^[50]发现,在石灰岩山地苹果园种植鸭茅和无芒雀麦能有效提高苹果叶片生理活性,并分别提高坐果率 5.45% 和 3.33%。

2.5 牧草对林木生长的影响

在资源相对不足的土地上进行林草复合系统经营,牧草往往会对林木生长产生不利影响。在美国黑核桃和美国皂荚(*Gleditsia triacanthos*)幼林地种植高羊茅,或在核桃(*Juglans regia*)幼林地种植紫花苜蓿,都会极大地抑制林木的生长,这可能是由于牧草密集且竞争力极强的根系捕获了过多的土壤水分、养分所致^[54-55]。辐射松林地种植牧草能够抑制树冠的发展^[56]和林木体积增长^[57],同时来自牧草的竞争降低了林木基径和分枝大小,使得茎干笔直而少瑕疵,木材的生产特性可以得到一定提高^[58]。Ludovici 等^[59]研究了杂草(*Digitaria* spp.)竞争对湿地松幼树生长的影响,结果显示,杂草的存在可使幼树直径、高生长以及成活率分别降低 50%、33% 和 16%。草本植物只有具备一定的竞争性才能有效地限制灌木向草地侵入(灌木入侵),避免草地发生退化^[60]。此外,非洲稀树草原上一旦发生火灾,孤立木下产量较高的牧草会使树木造成更为严重的伤害^[5]。

草本植物,特别是豆科植物引入森林生态系统,如能有效控制竞争,通常都会促进林木生长,缩短郁闭时间。Clason^[61-62]研究发现,在 20 年生火炬松和 26 年生湿地松林地种植牧草,与林木单作相比,在 5a 时间里可分别增加木材生长量 5.4 m³/hm² 和 13.0 m³/hm²。在四川中部丘陵地的试验表明,种植白花草木樨(*Melilotus albus*)可以促进林木的生长,加快桤木(*Alnus cremastogyne*)和柏木(*Cupressu funebris*)混交幼林的郁闭速度^[63]。此外,杜仲(*Eucommia ulmoides*)间作红花三叶草(*Trifolium pratense*)等试验表明,豆科牧草牧草对林木高生长和径向生长具有一定促进作用^[64]。

经济林间作或套种牧草,通常会使林产品产量和品质得到提高和改善。柑桔园和茶园间作牧草,柑桔和茶叶产量分别比对照提高 80.6% 和 59.3%^[65];苹果园种植牧草可增加单果重 1.50%—9.08%,而总产量可

提高 12.73%—58.68%,果实可溶性固形物、硬度、糖酸比分别提高 4.90%—13.29%、6.78%—14.41% 和 22.93%—38.95%^[50,66]。

还有研究表明,林草复合系统中牧草未对林木生长产生影响。Sharrow 等^[67]发现,花旗松-地果三叶草 (*Trifolium subterraneum*)-绵羊复合系统中林木树高和直径的生长状况与林木单作近似。

3 林草复合系统对生物多样性的影响

林草复合系统与单一的林业和草业生态系统相比,具有更为多样的物种组成和复杂的系统结构,可以为害虫天敌提供适宜的小气候、充足的食物以及理想的庇护所,有助于系统生物多样性和稳定性的提高,并能有效降低虫害对林木生长的不利影响。果园种植牧草或保留杂草,均可显著增加果树害虫的天敌数量,降低虫害影响。枣 (*Zizyphus jujuba*) 园中保留一定的杂草,可以减少天敌昆虫的迁出并增加天敌昆虫的物种数,有助于枣园实现生态、高效经营^[68]。孔建等^[15]研究了苹果园种草与害虫的调控关系,结果表明,种草可为天敌种群提供良好的栖息条件和充足的猎物,促进天敌种群在早期的发展,可使 4—6 月份果树上天敌个体数量增加 60%,地面捕食性天敌个体数量增加 20 倍以上。

4 林木与牲畜的互作关系

4.1 林分对牲畜的影响

林草复合系统中,林分遮荫在夏季可以缓解牲畜受到的高温胁迫,而在冬季通过降低风速和防止林地热量散失,降低牲畜的能量损耗,增强牲畜体质并使患病率和死亡率大幅的降低,一方面有效地改善了牲畜的福利状况,另一方面可以实现畜牧业的高效生产。Brownlow 等^[69]指出,在英国的林猪复合系统中,林分可有效调节气温,改善牲畜的生存状况,在冬季可减少猪奔走移动和调节体温的能量损耗,提高食物转化率,还能减少疾病的发生。林分的“绿伞”效应,可使林下放牧的牲畜免受炎热、日灼和尘暴的侵袭^[23,70]。在我国内蒙古和河北西部,“绿伞”可使其下太阳辐射减少 8.7%,气温降低 0.5—1.5℃,风速降低 20%—35%,羊的呼吸次数减少一半,体表温度降低 0.3—0.8℃,有助于羊只体重和产毛量的增加^[70]。

李会科^[24]报道,榆林风沙区牧场防护林保护下的绵羊患病率为 1%—6%,而无林草地平均高达 16.2%,羊毛产量和羊只重量分别增加 10%—11% 和 13%—15%。草牧场防护林能够增加牧草产量、优质牧草种类和比例,减少牲畜觅食过程中的奔走,并在炎热的夏季提供遮荫,使牲畜能够进行正常的新陈代谢,减少能量消耗,从而显著提高牲畜生产效率^[71]。此外,防护林还可为牲畜提供一些枝叶和果实作为补充饲料,但需要注意一些树种,如柏树 (*Cupressus* spp.) 和糖桉树 (*Eucalyptus cladocalyx*),前者的枝叶被孕畜摄取可导致其流产,而后者刚修剪下来的枝叶被取食,甚至可能会引发牲畜死亡^[72]。

4.2 牲畜对林分的影响

林草复合系统中,牲畜可直接或者间接对林分产生影响。直接性的影响即牲畜对林木幼苗的踩踏和对树干及枝叶的啃咬形成一些机械损伤,间接性影响为牲畜采食地表草本植物,减少其对土壤资源的获取,从而促进林木生长。

Mayer 等^[73]研究发现,在挪威云杉 (*Picea abies*) 林地草场采用不同载畜率放牛,一个夏季中牛只对幼树顶梢、侧枝和其他部位的平均损伤率分别为 4%、10% 和 13%,如能将载畜率控制在 1 头/hm² 以下,即可有效减少放牧对幼树造成的损伤。在种植有湿地松和火炬松幼树的地果三叶草的草地上牧牛,起初的 3a 里会有 8% 的幼树受到践踏伤害,林木的成活率和高生长均显著低于未放牧的林地^[74]。放牧草场上种植美国黑核桃和美国皂荚,2a 里动物对林木造成的机械损伤分别高达 47% 和 36%^[75],而通过使用树干保护管、金属丝网罩及带电护栏等措施均可有效地减少此类损伤^[75-77]。此外,在非洲稀树草原上,动物的采食可减小灌木的树冠体积,却有益于林木种子的传播和个体数量的增加^[78],但一些大型食草动物(如大象、长颈鹿等)的活动常会对林木造成严重伤害甚至导致其死亡^[79]。

花旗松和美国黄松 (*Pinus ponderosa*) 混交幼林地重复放牧,可有效降低林下主要竞争种鸭茅的蒸腾表面积和根系生长速率,使得牧草对土壤水分的吸收受到限制,从而增加林木对土壤水分的利用^[80],因此放牧可

降低林地下层植被的竞争,有利于提高林木定植后的成活率^[81]和生长速率^[82]。但牲畜的践踏常会增加土壤紧实度,导致土壤水分渗透性和植物对土壤 N 吸收能力的降低,从而减缓幼树生长速率^[83]。Harrington^[84]在澳大利亚的研究发现,过度放牧造成牧草竞争力下降,导致灌木(*Dodonaea attenuata*)大量侵入草地,草地发生退化和放牧功能降低。

其他研究显示,放牧未对林木成活和生长产生影响,这可能是因为放牧强度较小仍未影响到林木的生长,也可能是放牧的正、负效应相互抵消的结果。在新种植的柠檬桉(*Eucalyptus citriodora*)人工林下放牧,可有效地控制杂草竞争和降低抚育成本,但对林木的成活和生长无明显影响^[85]。Cutter 等^[86]研究了放牧对湿地松的生长和木材品质的影响,结果表明,放牧对树高、胸径、木材等级、生长率和木材比重等指标均无显著影响。

5 结语

牧草与林木间作或在林地进行套种,由于林木对太阳辐射的拦截和对土壤水肥资源的竞争,使得牧草产量往往低于其单作。而林木为牧草的生长发育创造了良好的小气候,能使牧草品质得到有效的改善,因此选择适宜的林木配置方式对实现牧草产量与品质的平衡具有重要意义。受到防护林和稀树草原上的孤立木庇护的草地,牧草的产量和品质一般都会得到较大的提高,这是由于在气候和立地条件较差的草牧场上,林分对牧草生长的促进作用远大于由林草竞争而引起的不利影响。牧草也具有一定的小气候效应,会对林木特别是幼树起到一些保护作用。林地种植豆科牧草和果园种草通常能够改善林木和果树的生长状况,提高果树的生殖能力、果品产量和质量。但在资源相对不足的林地中配置竞争力极强的牧草,可能会导致林木生长受到较大的抑制。此外,林地种草可以增加系统生物多样性和天敌数量,能有效降低虫害对林木生长的不利影响。林分能够为牲畜提供良好的生存环境,改善其福利状况,促进牲畜生长和发育。在林地进行放牧虽会对林木造成一些机械损伤,但能降低牧草对土壤资源的竞争力,一定程度上可促进林木的生长。

林木与牧草的竞争是非对称性的,林木通常具有更大的资源占有率和控制力,表现为比牧草具有更强的竞争性^[87]。因此在林草复合系统中应选择深根性的林木品种,采用合理的配置模式和管理措施^[88],以降低林木对牧草的不利影响。牧草的选择应该以耐荫性强、竞争力适中为宜,这样的牧草能够在林地遮荫条件下从土壤中获取足够的资源实现正常生长,同时不会对林木生长产生明显的抑制。林地放牧能够降低牧草竞争,促进林木生长,但应采取适当的措施对林木进行保护,避免牲畜对林木造成过多的机械损伤。

随着林草复合系统在全球范围内的广泛研究和应用,系统内种间互作关系的研究也得到了广泛而深入的开展,人们逐渐认识到系统各生物组分之间存在着极其复杂的互作关系。目前对地上部分种间互作研究多为某种林草配置模式中一个生物组分对另一个生物组分的生产力影响,而较少从生理学角度揭示其中的本质性原因,极大地阻碍了相关研究成果的应用和推广。未来应对以下几方面进行深入研究:运用生理学相关理论深入探索林分的存在对牧草和动物的生理和生产过程的影响,为人工模拟适宜牧草和牲畜生长的自然环境提供参照;构建和完善林木与牧草对太阳辐射利用关系的动态模型,以便在经营过程和一个生长季中的最佳时间对系统进行管理和调控,使系统实现经济效益和生态效益的最大化;加强系统对生物多样性保护和虫害控制机理的研究,以应对全球范围内生物多样性快速减少和农药大量使用引起日益严重污染的现状;深入研究牲畜啃食对林木生长和生产特性的影响以及相应的防护技术。

在现今全球气候变化的大背景之下,全球变暖、大气 CO₂ 浓度升高、氮沉降增加对林草复合系统地上部分种间互作关系的综合影响仍不甚明朗,但这种影响很可能会存在着明显的区域差异。对此进行开创性的研究,为当前和未来进行林草复合系统的应用和推广,以及探索复合农林系统经营在应对全球气候变化中的作用都具有重要而深远的意义。

致谢:感谢美国农业部农业科学研究院 James Neel 博士对本文写作的帮助。

References:

- [1] Lu Q, Zhao T S, Shi Y Q, Yang X. Theory and Methodology on Simulating Agroforestry System. Beijing: China Environmental Science Press, 1999:1-23.

- [2] Nair P K R. Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 1985, 3(2): 97-128.
- [3] Fan W, Gao X R. Research advances on the silvopastoral system. *Forest Research*, 2004, 17(4): 519-524.
- [4] Sun R Y, Li Q F, Niu C J, Lou A R. Basic Ecology. Beijing: Higher Education Press, 2002:117-133.
- [5] Scholes R J, Archer S R. Tree-grass interactions in savannas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28: 517-544.
- [6] Belsky A J, Amundson R G, Duxbury J M, Riha S J, Ali A R, Mwonga S M. The effects of trees on their physical, chemical and biological environments in a semi-arid savanna in Kenya. *Journal of Applied Ecology*, 1989, 26(3): 1005-1024.
- [7] Feldhake C M. Microclimate of a natural pasture under planted *Robinia pseudoacacia* in central Appalachia, West Virginia. *Agroforestry Systems*, 2001, 53(3): 297-303.
- [8] Kort J. Benefits of windbreaks to field and forage crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, 22/23: 165-190.
- [9] Xiang K F, Zhou X H. Analysis on aerodynamic effect of protection forest belts//Xiang K F ed. Study on Protection Forest in East of Inner Mongolia and West of the Northeast of China (The First Memoir). Harbin: Publishing House of Northeast Forestry University, 1989: 411-421.
- [10] Xiang K F, Zhou X H, Zhao L Q, Liu F. Analysis on hydrologic benefit of protection forest belts//Xiang K F ed. Study on Protection Forest in East of Inner Mongolia and West of the Northeast of China (The First Memoir). Harbin: Publishing House of Northeast Forestry University, 1989: 422-430.
- [11] Grace J. Plant response to wind. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, 22/23: 71-88.
- [12] Zhou X H. Analysis on thermal effect of protection forest belts//Xiang K F ed. Study on Protection Forest in East of Inner Mongolia and West of the Northeast of China (The First Memoir). Harbin: Publishing House of Northeast Forestry University, 1989: 431-448.
- [13] Wu D D, Yuan C L, Lu M H, Shi S Y. The influence of protection forest on the thickness of accumulated snow on grassland. *Forest Research*, 2000, 13 (3): 328-332.
- [14] Mead D J, Lucas R J, Mason E G. Studying interactions between pastures and *Pinus radiata* in Canterbury's subhumid temperate environment-the first two years. *New Zealand Forestry*, 1993, 38(1): 26-31.
- [15] Kong J, Wang H Y, Zhao B G, Ren Y D, Liu Y X, Chen H J, Shan L N, Wang A C. Study on ecological regulation system of the pest control in apple orchard. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(5): 790-794.
- [16] Cavagnaro J B, Trione S O. Physiological, morphological and biochemical responses to shade of *Trichloris crinita*, a forage grass from the arid zone of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(3): 337-347.
- [17] Cruz P. Effect of shade on the growth and mineral nutrition of a C4 perennial grass under field conditions. *Plant and Soil*, 1997, 188(2): 227-237.
- [18] Gyenge J E, Fernandez M E, Dalla Salda G, Schlichter T M. Silvopastoral systems in Northwestern Patagonia II: water balance and water potential in a stand of *Pinus ponderosa* and native grassland. *Agroforestry Systems*, 2002, 55(1): 47-55.
- [19] Fernandez M E, Gyenge J E, Dalla Salda G, Schlichter T M. Silvopastoral systems in northwestern Patagonia I: growth and photosynthesis of *Stipa speciosa* under different levels of *Pinus ponderosa* cover. *Agroforestry Systems*, 2002, 55(1): 27-35.
- [20] McGraw R L, Stamps W T, Houx J H, Lint M J. Yield, maturation, and forage quality of alfalfa in a black walnut alley-cropping practice. *Agroforestry Systems*, 2008, 74(2): 155-161.
- [21] Weltzin J F, Coughenour M B. Savanna tree influence on understory vegetation and soil nutrients in northwestern Kenya. *Journal of Vegetation Science*, 1990, 1(3): 325-334.
- [22] Belsky A J, Mwonga S M, Amundson R G, Duxbury J M, Ali A R. Comparative effects of isolated trees on their undercanopy environments in high- and low-rainfall savannas. *Journal of Applied Ecology*, 1993, 30(1): 143-155.
- [23] Liu S L, Wu D D, Zhou J R, Yuan C L, Tai X W, Zhu D H, Gong W G, Xiang K F, Wang Z H, Zhang J D, Ma Z X, Zhao J P, Liu B T. Grazing function of the protective forests on grassland. *Journal of Northeast Forestry University*, 1997, 25(3): 38-44.
- [24] Li H K, Wang Z L. Investigation on eco-economic benefit of protection forest in rangeland in Yulin sand zone. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2000, (2): 3-6, 45.
- [25] Guevara-Escobar A, Kemp P D, Mackay A D, Hodgson J. Pasture production and composition under poplar in a hill environment in New Zealand. *Agroforest Systems*, 2007, 69(3): 199-213.
- [26] 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. *Agroforestry Systems*, 2009, 77(1): 23-35.
- [27] Walker J, Robertson J A, Penridge L K, Shappe J H. Herbage response to tree thinning in a *Eucalyptus crebra* woodland. *Austral Ecology*, 2006, 11(2): 135-140.
- [28] Stuart-Hill G C, Tainton N N, Barnard H J, Tainton N M. The influence of an *Acacia karroo* tree on grass production in its vicinity. *African Journal of Range and Forage Science*, 1987, 4(3): 83-88.

- [29] Bartolome J M, Allen-Diaz B H, Tietje W D. The effect of *Quercus douglasii* removal on understory yield and composition. *Journal of Range Management*, 1984, 47(2): 151-154.
- [30] Mathew T, Kumar B M, Babu K V S, Umamaheswaran K. Comparative performance of four multi-purpose trees associated with four grass species in the humid regions of Southern India. *Agroforestry Systems*, 1992, 17(3): 205-218.
- [31] East R M, Felker P. Forage production and quality of 4 perennial grasses grown under and outside canopies of mature *Prosopis glandulosa* Torr. var. *glandulosa* (mesquite). *Agroforestry Systems*, 1993, 22(2): 91-110.
- [32] McPherson G R, Weltzin J F. Herbaceous response to canopy removal in southwestern oak woodlands. *Journal of Range Management*, 1998, 51(6): 674-678.
- [33] Silva-Pando F J, González-Hernández M P, Rozados-Lorenzo M J. Pasture production in a silvopastoral system in relation with microclimate variables in the Atlantic coast of Spain. *Agroforestry Systems*, 2002, 56(3): 201-211.
- [34] Sharrow S H. Tree planting pattern effects on forage production in a Douglas-fir agroforest. *Agroforestry Systems*, 1991, 16(2): 167-175.
- [35] Lewis C E, Tanner G W, Terry W S. Double vs. single-row pine plantations for wood and forage production. *Southern Journal of Applied Forestry*, 1985, 9(1): 55-61.
- [36] Burner D M, Brauer D K. Herbage response to spacing of loblolly pine trees in a minimal management silvopasture in southeastern USA. *Agroforestry Systems*, 2003, 57(1): 69-77.
- [37] Burner D M, Belesky D P. Relative effects of irrigation and intense shade on productivity of alley-cropped tall fescue herbage. *Agroforestry Systems*, 2006, 73(2): 127-139.
- [38] Belsky A J. Effects of trees on nutritional quality of understorey gramineous forage in tropical savannas. *Tropical Grasslands*, 1992, 26(1): 12-20.
- [39] Ludwig F, De Kroon H, Prins H H T, Berendse F. The effect of nutrients and shade on tree grass interactions on an East African savanna. *Journal of Vegetation Science*, 2001, 12(4): 579-588.
- [40] Callaway R M, Brooker R W, Choler P, Kikvidze Z, Lortie C J, Michalet R, Paolini L, Pugnaire F I, Newingham B, Aschehoug E T, Armas C, Kikodze D, Cook B J. Positive interactions among alpine plants increase with stress. *Nature*, 2002, 417: 844-848.
- [41] Ludwig F, De Kroon H, Berendse F, Prins H H T. The influence of savanna trees on nutrient, water and light availability and the understorey vegetation. *Plant Ecology*, 2004, 170(1): 93-105.
- [42] Russell G, Grace J. The effect of shelter on the yield of grasses in southern Scotland. *Journal of Applied Ecology*, 1979, 16(1): 319-330.
- [43] Hawke M F, Tomblinson J D. Production and interaction of pastures and shelterbelts in the central North Island. *Proceedings New Zealand Grassland Association*, 1993, 55: 193-197.
- [44] Neel J P S, Feldhake C M, Belesky D P. Influence of solar radiation on the productivity and nutritive value of herbage of cool-season species of an understorey sward in a mature conifer woodland. *Grass and Forage Science*, 2008, 63(1): 38-47.
- [45] Wilson J R, Hill K, Cameron D M, Shelton H M. The growth of *Paspalum notatum* under the shade of a *Eucalyptus grandis* plantation canopy or in full sun. *Tropical Grasslands*, 1990, 24(1): 24-28.
- [46] Ludwig F, De Kroon H, Prins H H T. Impacts of savanna trees on forage quality for a large African herbivore. *Oecologia*, 2008, 155(3): 487-496.
- [47] Zhou X H, Zhang Y L. Estimation of influence of protection forest for pasture on grass quality and grassland productivity. *Journal of Northeast Forest University*, 1990, 18(5): 28-37.
- [48] Douglas G B, Walcroft A S, Hurst S E, Potter J F. Interactions between widely spaced young poplars (*Populus* spp.) and introduced pasture mixtures. *Agroforestry Systems*, 2006, 66(2): 165-178.
- [49] Dupraz C, Simorre V, Dauzat M, Bertoni G, Bernadac A, Masson P. Growth and nitrogen status of young walnuts as affected by intercropped legumes in a Mediterranean climate. *Agroforestry Systems*, 1998, 43(1/3): 71-80.
- [50] Lan Y P, Cao H, Niu J L. Study on the effects of ground cover on the leaf physiological activity of apple tree on dry calcareous soil. *Northern Fruits*, 2000, (1): 4-6.
- [51] Stott K G. The effects of competition from ground covers on apple vigour and yield. *Annals of Applied Biology*, 1976, 83(2): 327-330.
- [52] Neilsen G H, Hogue E J. Effects of orchard soil management on the growth and leaf nutrient concentration of young dwarf 'Red delicious' apple trees. *Canadian Journal of Soil Science*, 1985, 65(2): 309-315.
- [53] Haynes R J. Some observations on the effect of grassing down, nitrogen fertilization and irrigation on the growth, leaf nutrient content and fruit quality of young golden delicious apple trees. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1981, 32(10): 1005-1013.
- [54] Paris P, Cannata F, Olimeri G. Influence of alfalfa (*Medicago sativa* L.) intercropping and polyethylene mulching on early growth of walnut (*Juglans* spp.) in central Italy. *Agroforestry Systems*, 1995, 31(2): 169-180.

- [55] Alley J L, Garrett H E, McGraw R L, Dwyer J P, Blanche C A. Forage legumes as living mulches for trees in agroforestry practices-preliminary results. *Agroforestry Systems*, 1999, 44(2/3): 281-291.
- [56] Yunusa I A M, Mead D J, Pollock K M, Lucas R J. Process studies in a *Pinus radiata*-pasture agroforestry system in a subhumid temperature environment. I. Water use and light interception in the third year. *Agroforestry Systems*, 1995, 32(2): 163-183.
- [57] Chang S X, Mead D J. Growth of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) as influenced by understory species in a silvopastoral system in New Zealand. *Agroforestry Systems*, 2002, 59(1): 43-51.
- [58] Peri P L, Mason E G, Pollock K M, Varella A C. Early growth and quality of radiata pine in a silvopastoral system in New Zealand. *Agroforestry Systems*, 2002, 55(3): 207-219.
- [59] Ludovici K H, Morris L A. Competition-induced reductions in soil water availability reduced pine root extension rates. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(4): 1196-1202.
- [60] Brown J R, Scanlan J C, McIvor J G. Competition by herbs as a limiting factor in shrub invasion in grassland; a test with different growth forms. *Journal of Vegetation Science*, 1998, 9(6): 829-836.
- [61] Clason T R. Economic implications of silvopastures on southern pine plantations. *Agroforestry Systems*, 1995, 29(3): 227-238.
- [62] Clason T R. Silvopastoral practices sustain timber and forage production in commercial loblolly pine plantations of northwest Louisiana, USA. *Agroforestry Systems*, 1999, 44(2/3): 293-303.
- [63] Mao K, Pu C L, Ren B W, Liu Y X. Analysis of ecological and economic benefit on intercropping of white sweet clover with young mixture forest. *Pratacultural Science*, 1995, 12(1): 49-50.
- [64] Li G Q, Tang D R, He J F, Wang D H. Basic characteristics of system of *Eucommia ulmoides* intercropping with clover. *Journal of Northwest Forestry University*, 1996, 11(1): 24-29.
- [65] Li S M, Chen Q, Pei D F, Yang S C, Zhang D H, Zhao Y J, Li D P. Benefit analysis of economic forest in intercropping with pasture legume. *Pratacultural Science*, 1992, 9(1): 23-25.
- [66] Liu H D, Hao S Y, Cao Q, Zhao G P. Effect of grass cover on soil nutrient and yield and quality of apple. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(3): 184-186.
- [67] Sharrow S H, Carlson D H, Emmingham W H, Lavender D. Productivity of two Douglas fir/subclover/sheep agroforests compared to pasture and forest monocultures. *Agroforestry Systems*, 1996, 34(3): 305-313.
- [68] Shi G L, Zhao L L, Miao Z W, Liu S Q, Cao H, Shi Y L, Pike B. Structure characteristics of the arthropod community in the jujube orchards with different habitats. *Acta Entomologica Sinica*, 2005, 48(4): 561-567.
- [69] Brownlow M J C, Dorward P T, Carruthers S P. Integrating natural woodland with pig production in the United Kingdom; an investigation of potential performance and interactions. *Agroforestry Systems*, 2005, 64(3): 251-263.
- [70] Song Z M, Meng P. The structure and pattern of agroforestry in China. *World Forestry Research*, 1993, (5): 77-81.
- [71] Liu S L, Wu D D, Sun X H, Li X H, Wang Y L. The influence of protection forest for grassland on young sheeps growth. *Protection Forest Science and Technology*, 1997, (2): 9-10, 58.
- [72] Bird P R, Bicknell D, Bulman P A, Burke S J A, Leys J F, Parker J N, Van Der Sommen F J, Voller P. The role of shelter in Australia for protecting soils, plants and livestock. *Agroforestry Systems*, 1992, 20(1/2): 59-86.
- [73] Mayer A C, Stokli V, Konold W, Kreuzer M. Influence of cattle stocking rate on browsing of Norway spruce in subalpine wood pastures. *Agroforestry Systems*, 2006, 66(2): 143-149.
- [74] Pearson H A, Baldwin V C, Barnett J P. Cattle grazing and pine survival and growth in subterranean clover pasture. *Agroforestry Systems*, 1990, 10(2): 161-168.
- [75] Bendfeldt E S, Feldhake C M, Burger J A. Establishing trees in an Appalachian silvopasture: response to shelters, grass control, mulch, and fertilization. *Agroforestry Systems*, 2001, 53(3): 161-168.
- [76] Sharrow S H. Effects of shelter tubes on hardwood tree establishment in western Oregon silvopastures. *Agroforestry Systems*, 2001, 53(3): 283-290.
- [77] Lehmkuhler J W, Felton E E D, Schmidt D A, Bader K J, Garrett H E, Kerley M S. Tree protection methods during the silvopastoral-system establishment in midwestern USA: Cattle performance and tree damage. *Agroforestry Systems*, 2003, 59(1): 35-42.
- [78] Mwalyosi R B B. The dynamic ecology of *Acacia tortilis* woodland in Lake Manyara National Park, Tanzania. *African Journal of Ecology*, 1990, 28(3): 189-199.
- [79] Miller M F. Large African herbivores, bruchid beetles, and their interactions with *Acacia* seeds. *Oecologia*, 1994, 97(2): 265-270.
- [80] Karl M G. Regulating competition on conifer plantations with prescribed cattle grazing. *Forest Science*, 1993, 39(3): 405-418.
- [81] Schmidt T L, Stubbendieck J. Factors influencing eastern redcedar seedling survival on rangeland. *Journal of Range Management*, 1993, 46(5):

448-451.

- [82] Sharrow S H, Leininger W C, Osman K A. Sheep grazing effects on coastal Douglas fir forest growth: a ten-year perspective. *Forest Ecology and Management*, 1992, 50(1/2): 75-84.
- [83] Bezkorowajnyj P G, Gordonand A M, McBride R A. The effect of cattle foot traffic on soil compaction in a silvo-pastoral system. *Agroforestry Systems*, 1993, 21(1): 1-10.
- [84] Harrington G H. Effects of soil moisture on shrub seedling survival in a semi-arid grassland. *Ecology*, 1991, 72(3): 1138-1149.
- [85] Couto L, Roath R L, Betters D R, Garcia R, Almeida J C C. Cattle and sheep in eucalypt plantations: a silvopastoral alternative in Minas Gerais, Brazil. *Agroforestry Systems*, 1994, 28(2): 173-185.
- [86] Cutter B E, Hunt K, Haywood J D. Tree/wood quality in slash pine following longterm cattle grazing. *Agroforestry Systems*, 1999, 44(2/3): 305-312.
- [87] Chen W, Xue L. Root interactions: competition and facilitation. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 24(6): 1243-1251.
- [88] Schroth G. A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options. *Agroforestry Systems*, 1999, 43(1/3): 5-34.

参考文献:

- [1] 卢琦, 赵体顺, 师永全, 杨修. 农用林业系统仿真的理论与方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1999: 1-23.
- [3] 樊巍, 高喜荣. 林草牧复合系统研究进展. *林业科学研究*, 2004, 17(4): 519-524.
- [4] 孙儒泳, 李庆芬, 牛翠娟, 娄安如. 基础生态学. 北京: 高等教育出版社, 2002: 117-133.
- [9] 向开馥, 周新华. 林带空气动力效应分析//向开馥. 东北西部内蒙古东部防护林研究(第一集). 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1989: 411-421.
- [10] 向开馥, 周新华, 赵凌泉, 刘锋. 林带水文效益分析//向开馥. 东北西部内蒙古东部防护林研究(第一集). 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1989: 422-430.
- [12] 周新华. 林带热力效应分析//向开馥. 东北西部内蒙古东部防护林研究(第一集). 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1989: 431-448.
- [13] 吴德东, 袁春良, 吕明海, 石素英. 草牧场防护林对积雪厚度的影响. *林业科学研究*, 2000, 13(3): 328-332.
- [15] 孔建, 王海燕, 赵白鸽, 任应党, 刘玉霞, 陈汉杰, 单林娜, 王安超. 苹果园主要害虫生态调控体系的研究. *生态学报*, 2001, 21(5): 790-794.
- [23] 刘淑玲, 吴德东, 周景荣, 袁春良, 邵宪武, 朱德华, 宫伟光, 向开馥, 王志海, 张敬党, 马占信, 赵建平, 刘宝庭. 草牧场防护林放牧功能. *东北林业大学学报*, 1997, 25(3): 38-44.
- [24] 李会科, 王忠林. 榆林风沙区牧场防护林生态经济效益调查. *陕西林业科技*, 2000, (2): 3-6, 45.
- [47] 周新华, 张艳丽. 草牧场防护林带对牧草质量和草场生产力影响的评价. *东北林业大学学报*, 1990, 18(5): 28-37.
- [50] 兰彦平, 曹慧, 牛俊玲. 石灰岩旱地果园生草对果树叶片生理活性影响的研究. *北方果树*, 2000, (1): 4-6.
- [63] 毛凯, 蒲朝龙, 任伯文, 刘玉西. 桉柏混交幼林间种草木樨生态经济效益分析. *草业科学*, 1995, 12(1): 49-50.
- [64] 李根前, 唐德瑞, 何景峰, 王迪海. 杜仲三叶草间作系统基本特征研究. *西北林学院学报*, 1996, 11(1): 24-29.
- [65] 李绍密, 陈青, 裴大风, 杨顺成, 张代恒, 赵运杰, 李德平. 经济林间作牧草的效益研究. *草业科学*, 1992, 9(1): 23-25.
- [66] 刘蝴蝶, 郝淑英, 曹琴, 赵国平. 生草覆盖对果园土壤养分、果实产量及品质的影响. *土壤通报*, 2003, 34(3): 184-186.
- [70] 宋兆民, 孟平. 中国农林业的结构与模式. *世界林业研究*, 1993, (5): 77-81.
- [71] 刘淑玲, 吴德东, 孙晓晖, 李晓慧, 王艳玲. 草牧场防护林对幼羊生长的影响. *防护林科技*, 1997, (2): 9-10, 58.
- [87] 陈伟, 薛立. 根系间的相互作用——竞争与互利. *生态学报*, 2004, 24(6): 1243-1251.