

# 黄土半干旱区林草复合优化配置与结构调控研究进展

高路博, 毕华兴, 云雷, 刘李霞, 朱悦

(北京林业大学 水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,  
山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083)

**摘要:** 林草复合系统是我国干旱与半干旱地区陡坡农林复合的主要模式之一。该文在综述黄土高原林草复合模式生态效益、社会效益、经济效益的基础上, 对黄土半干旱区林草复合优化配置与结构调控研究进展进行了研究, 提出了适宜黄土半干旱区林草复合的造林树种为刺槐和油松, 草种为以苜蓿为代表的豆科类优质牧草。并对目前晋西黄土区林分密度研究进行了分析, 根据水量平衡原则确定了适宜于在黄土高原推广应用的林分合理密度计算公式。在对黄土高原林草复合研究现状进行分析的基础上, 提出了黄土高原林草复合研究中存在的问题, 以及未来的发展方向, 旨在为黄土高原退耕还林及水土保持人工林建设提供借鉴。

**关键词:** 林草复合系统; 林分密度; 黄土高原

中图分类号: S727.25

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)03-0260-07

## Review on Structure and Optimal Allocation of Forest-grass Strip-intercropping System in Semi-arid Area of Loess Plateau

GAO Lu-bo, BI Hua-xing, YUN Lei, LIU Li-xia, ZHU Yue

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, National Field Research Station of Forest Ecosystem of Jixian, Shanxi, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Forest-grass strip-intercropping system is one of the main models of agroforestry on steep slopes in arid and semi-arid area of Loess Plateau in China. Based on assessment of ecological, social and economic benefits of forest-grass strip-intercropping system, this paper presented the review on structure and optimal allocation of forest-grass strip-intercropping system in semi-arid area of Loess Plateau. The authors put forward that, the suitable species are *Robinia pseudoacacia*, *Pinus tabulae formis*, and leguminous grass (*Medicago sativa*, *Astragalus adsurgens*, *Melilotus officinalis* etc.) in forest-grass strip-intercropping system in semi-arid area of Loess Plateau. And a formula to calculate appropriate density for forest in the Loess Area has been developed through analysis on the balance of water supply and water consumption. Based on the analysis of recent studies on forest-grass strip-intercropping system, some current problems and future suggestions have been given to the research on forest-grass strip-intercropping system in Loess area. The authors hope this review can provide some useful references to process the forest ecological project in Loess area.

**Key words:** forest-grass strip-intercropping system; forest density; the Loess Plateau

林草复合是农林复合生态系统的一部分, 泛指由森林和草地在空间上有机结合形成的复合人工植被或经营方式<sup>[1]</sup>, 林业上常称之为林草混交、林草间作等, 是一种工程应用技术和土地利用系统的复合名称, 是有目的地把多年生木本植物与农业、牧业用于

同一土地经营单位并采取时空分布或短期相间的经营方式。林草复合能够多层次上利用光能, 充分地利用自然资源, 提高初级产品的转化率和利用率, 缓解林牧矛盾, 同时可以提高土壤有机质含量, 改良土壤结构, 为林业的健康稳定发展创造条件。人工林草

收稿日期: 2010-10-20

修回日期: 2011-03-07

资助项目: 国家“十二五”科技支撑项目“高效可持续农林复合系统构建及调控技术研究”(2011BAD38B02); 国家自然科学基金项目“晋西黄土区森林植被对径流的影响及其尺度辨析”(30972419)

作者简介: 高路博(1986-), 男, 河南鲁山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 林业生态工程。E-mail: gaolubo@163.com

通信作者: 毕华兴(1969-), 男, 陕西米脂人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 林业生态工程。E-mail: bix@bjfu.edu.cn

复合种植模式是林草植被恢复不可或缺的部分,在一些地区农村经济发展以及生态环境建设中都发挥着重要的作用<sup>[2]</sup>,是我国干旱与半干旱地区陡坡农林复合的主要模式之一<sup>[3]</sup>。

近年来,随着林草业的相互渗透及对生态环境综合治理的需要,林草复合经营模式越来越受到国内外的重视<sup>[4-8]</sup>。目前,林草复合系统研究主要集中在林草植被建设的效益评价以及环境生态影响等方面<sup>[9-11]</sup>。造林种草、植被恢复是治理黄土高原水土流失、改善当地生态环境质量和经济发展的根本措施之一。但是目前在黄土半干旱区林草植被建设中还存在着成活率低,生态效益不高等问题,究其原因一方面在于该地区生态环境脆弱,植被覆盖率低,降水量少但蒸发量大,另一方面林草植被的种类选择和种植结构缺乏科学的理论指导。本文在总结前人林草植被建设经验的基础上,通过对现有林草复合系统的研究,以水量平衡原理为基础,重点考虑林草复合系统的水土保持效益并兼顾经济效益,提出较为适宜黄土半干旱区林草植被建设的造林树种和草种,确定适宜于黄土半干旱区林分的合理密度计算公式,为该地区退耕还林及水土保持工作的开展提供借鉴。

## 1 黄土高原发展林草复合模式的重要性及意义

黄土高原是我国水土流失最严重的地区,生态环境不断恶化,严重制约着该地区的社会经济发展。黄土高原东西长约1 300 km,南北宽约800 km,其中干旱、半干旱地区占该地区总面积的68.8%<sup>[12]</sup>。长期的土壤侵蚀造成了这一地区丘陵、沟壑的侵蚀地貌。其中干旱半干旱地区,植被稀疏、生态环境恶化、水土流失极其严重、农业生产能力低下而且不稳定导致人民生活异常贫困,因此进行水土保持治理,改善当地生态生活条件刻不容缓。

因地制宜,将治理与开发结合起来,在保持环境效益的同时,兼顾社会效益和经济效益是该地区水土保持工作的重中之重。降水是黄土半干旱区农林牧业发展的(天然)水分供给的唯一来源,也是土壤侵蚀发生的主要动力和影响因子。据研究<sup>[13-14]</sup>,该地区土壤坡面侵蚀,主要来源于暴雨产生的径流,即洪水。在该地区,一年的侵蚀量常由几次大暴雨洪水侵蚀所造成,一次大暴雨的侵蚀产沙量可占全年总产沙量的40%~86%。这主要是因为,该地区年均降水量少,但年际变化大,季节分配不均,雨量集中于夏季,易出现暴雨,而冬季降水少,易干旱。针对于特定的地貌特征,改善植被覆盖情况是该地区水土流失治理的主

要措施。地面植被能够对降雨进行再分配,同时植物根系能固结土壤,提高土壤的抗蚀性和抗冲性,提高土壤的入渗性能,涵养水源并有效减小表面径流的产生。因此在黄土半干旱区必须充分合理利用降水资源,发展水土保持型生态农业。

余新晓<sup>[13]</sup>等在山西吉县对不同覆盖度的油松林调查发现,林分覆盖度越高,林地土壤入渗性能越好,土壤侵蚀量越低,水土保持效益越显著。但由于林木生长耗水量大,受降水条件的影响,林分覆盖度不可能达到一个很高的水平,否则就会出现林地土壤水分短缺干化,形成低效低产林,影响防护效益的发挥,如果降低林分覆盖度又不能够充分发挥出水土保持林应有的防护作用。因此纯粹的发展乔木水土保持林是不可取的,而采取林草复合可以有效地解决这个矛盾。根据尹忠东的研究,黄土高原不同气候区均存在同样的趋势,即草地耗水量显著小于乔木林耗水量<sup>[15]</sup>。余新晓<sup>[13]</sup>等人的研究发现草地也能够明显改善土壤渗透性能,在干旱半干旱地区,大力种植草本植物,能起到增加入渗改善地表径流的作用。因此在降低林分密度的同时,增加林下草本植物的种群数量,可以达到两面兼顾。黄土半干旱区陡坡地通过林草混交经营,可提高植被覆盖度和林下地被物生物量,大大降低水土流失量。

采取林草复合技术,建立林草植被是黄土半干旱区发展生产,改善生态环境的必要措施,对防治土壤侵蚀、控制泥沙具有明显的生态效益和社会经济效益。

## 2 黄土高原林草复合效益分析

黄土高原营建林草复合系统的主要目的就在于充分发挥土地的生态效益、社会效益和经济效益。通过调整系统的组成及时空结构,改善生态环境,发展经济,进而提高人民生活水平。林草结合,林牧结合,可以有效缓解林牧矛盾,为林业的健康稳定发展创造条件。

### 2.1 林草复合系统的生态效益

2.1.1 林草复合系统在改善小气候方面的效益 林草复合,由于草本植物的遮荫及风障作用可以减少日光的直接辐射,对系统内风速及温度都有不同程度的影响,可以改善局域的小气候。小气候的改善有益于林木生长,在林间放牧,可以调节水热状况<sup>[16]</sup>,促进牲畜发育。炎热季节,林内温度比外部低,而湿度相对较高;寒冷季节,林木可以阻挡风寒,减少畜体的热量散失,进而保障畜牧业发展。林内小气候的改善还可以延长牧草青绿期,减轻或防止草本植物的日灼现象<sup>[17]</sup>,为畜牧业提供优质牧草。

姜艳等<sup>[18]</sup>在陕北安塞县对林草混交林、人工灌木林、野生灌木林及林中草地 4 种不同类型的退耕还林还草模式进行了小气候观测, 结果表明不同类型的退耕模式温度要素变化趋势基本一致。其中林草混交林在 6 月高温期对空气及地表温度的日均值的影响最为显著, 较对照裸地可以降低  $1.2^{\circ}\text{C}$ , 并有效减少了土壤水分无效蒸发, 增加了林下空气湿度。

2.1.2 林草复合系统改良土壤的效益 林草复合生态系统对土壤的质地和机械组成具有较好的改善作用。

草本植物根系密集, 能够固结土壤, 在腐解时提供大量有机质和氮素, 改善土壤结构, 从而增强土壤渗透性和蓄水能力。李会科等<sup>[19]</sup>在渭北洛川的研究发现, 苹果园中生草区相对于清耕区  $0-40\text{ cm}$  土壤容重下降  $6.5\%$ , 田间持水量增加了  $7.19\%$ , 土壤孔隙度显著增加, 土壤有机质含量也有所增加。林草复合可以提高林地土壤中的 N、P 含量而使土壤 K 含量有所降低<sup>[20]</sup>。国外的相关研究也表明, 由于林草复合系统中的土壤有机质含量和土壤生物活性较高, 林草复合系统土壤 N 的矿化率较对照提高了约  $20\%$ <sup>[21]</sup>。

林草复合在增加土壤肥力的同时, 能提高土壤中营养元素的活性, 有利于林木对营养元素的吸收, 但需要注意适时对间作牧草进行刈割, 以减轻林草对土壤肥力的竞争, 促进林木的生长<sup>[22]</sup>。

2.1.3 林草复合系统保持水土方面的效益 林草复合系统形成的空间立体结构在水土保持方面效果明显。研究表明<sup>[20]</sup>, 林草复合系统在保持水土方面, 同样有着显著的作用。林草复合能逐层截留降雨, 而且草本植物生长迅速, 可以尽快覆盖地面, 减轻雨滴直接击溅, 减少地面径流的产生。刘斌<sup>[23]</sup>等对甘肃庆阳的南小河流域研究显示, 人工草地径流场  $14\text{ a}$  的平均产流降雨量为  $174.3\text{ mm}$ , 径流模数为  $4\,499.2\text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 侵蚀模数为  $15.2\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 相对于农坡地径流场产流降雨量减少了  $13.8\%$ , 径流量减少了  $74.9\%$ , 侵蚀量减少了  $97.7\%$ , 草地对于减轻坡面土壤侵蚀的作用明显; 人工林地产生的水土流失, 与同年度坡度接近的农坡地对比观测显示, 其径流量平均减少  $95\%$  以上, 侵蚀量平均减少  $98\%$  以上, 采取林草复合经营可以使水土流失得到有效的控制。

2.1.4 林草复合系统能够提高生物多样性和稳定性

林草复合能够调整系统内部食物链结构, 有效控制病虫害的发生。林草复合不仅有效利用了空间和自然资源, 增加了生物多样性, 改善了系统内部的生态环境, 而且提高了有害昆虫天敌的种群数量, 同时增

加了捕食性天敌控制害虫的稳定性和可持续性, 提高生物之间互惠互利作用, 增加边际效益。国内大量的关于林草复合系统的研究<sup>[24-26]</sup>表明: 复合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都明显大于清耕对照。国外对生草果园的研究结果也表明生草能够增加果园的生物多样性, 增加害虫天敌数量<sup>[27]</sup>。

2.1.5 林草复合系统的经济和社会效益 林木成长周期普遍较长, 短期内很难获得较好的经济收益, 易挫伤农民积极性, 不利于黄土区退耕还林工作的开展实施。幼龄林地间作牧草能够很好地解决这个矛盾, 牧草的生长周期短, 投资回报快, 当年即可得到收益, 且可以较快覆盖地面, 减少土壤表面侵蚀。林草复合高矮搭配, 充分利用了立体空间, 增加系统内光能利用率, 减缓内部环境的剧烈变化, 可以增加经济林的产量, 促进林木生长, 提高林产品的品质, 为当地的发展创造良好的经济效益。

据研究<sup>[28-29]</sup>, 林草复合系统中夏季生草区土壤湿度比清耕区高  $3\% \sim 4\%$ , 夏季  $0-20\text{ cm}$  土层土壤温度明显低于清耕区, 冬季比清耕区温度高  $1^{\circ}\text{C}$  左右, 生草区土壤温度较清耕区变化平稳, 有效缓解了温度的剧烈变化对林草生长的影响, 为牧草的良好生长创造了条件, 为当地畜牧产业发展提供了良好动力, 具有很好的社会效益。不仅林木对其下的牧草生长有利, 而且另有部分研究表明, 在幼林地或疏林地种植牧草, 特别是豆科牧草, 能显著促进林木生长, 缩短郁闭年限, 提高林地生产力<sup>[30]</sup>。

同时林下草本植物可以增加土壤中鲜根量, 培肥地力, 增加单位面积的经济效益<sup>[31]</sup>。刘蝴蝶等<sup>[32]</sup>在山西万县的研究发现, 苹果生草栽培可使单位面积经济效益提高  $15.17\% \sim 36.22\%$ 。一般来说, 只要种类搭配科学、设计合理, 不管林分密度是否相同, 均可做到林、草双丰收。彭鸿嘉<sup>[33]</sup>在甘肃中部的研究结果也认为, 林草复合的生态效益和经济效益均高于林农复合, 在黄土丘陵沟壑区具有较高的推广价值。

### 3 黄土区林草复合系统关键技术研究

目前在黄土半干旱区林草复合系统建设中还存在着成活率低、生态效益低等问题, 究其原因, 主要在于林草植被的种类选择和种植结构缺乏科学的理论指导, 特别是适宜的造林密度。

黄土半干旱区人工林草植被多为一次建植, 不按照植被的地带性分布规律选择相应的林草品种和种植结构, 盲目造林种草, 就会导致林草生长不良, 而且会造成土壤结构的破坏, 水肥状况恶化, 不能充分发

挥林草复合系统效益,甚至于影响当地生态环境的安全。如果系统林木的密度过大,会导致林内光照严重不足,水分短缺,土壤干化,使得林下无草本及灌木出现而成为光板地,导致“小老树”的形成,影响经济效益。如果林分密度过小,则会造成土地资源浪费,同时也会使林木树干弯曲,降低林木出材率和材质,同样不利于水土保持效益的发挥<sup>[34-35]</sup>。

因此对林草复合模式进行研究,寻找出适宜于黄土半干旱区的栽植的林草种类和种植结构就显得尤为重要。

### 3.1 树草种选择

黄土高原的主要造林树种有刺槐、油松、侧柏、核桃、杨树、辽东栎、苹果、杏树、梨树等,其中刺槐和油松等乔木树种作为水土保持林主要造林树种<sup>[36]</sup>,具有很强的固沟护坡、防风固沙作用,对植被的恢复、水土流失的防治和水文状况的调节效果明显,这已经被众多研究证实<sup>[37-40]</sup>,并得到了广泛接受和普遍应用。

黄土高原草种繁多,主要草种有苜蓿(*Medicago sativa*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、黄芩(*Scutellaria baicalensis*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、紫花地丁(*Viola philippica*)、益母草(*Leonurus artemisia*)等。黄土高原草地建设的关键点在于筛选和培育耐牧、耐瘠、抗旱的适生草种<sup>[41]</sup>。李会科等<sup>[19]</sup>的研究发现,在提高土壤的有机质方面,豆科牧草优于禾本科牧草。高峻等<sup>[42]</sup>在山西中阳黄土丘陵沟壑区的研究也表明,沙打旺、草木樨及紫花苜蓿3种豆科牧草均适合于试验区幼林地种植。孙立达等<sup>[43]</sup>对黄土高原广泛栽种的人工水保牧草沙打旺、优良水土保持灌木小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam)的根茎对斜坡稳定性的影响与紫花苜蓿进行比较分析,发现3种植物中紫花苜蓿的增强作用效果最大。苜蓿还可固定大气中游离的氮素,提高土壤N含量,营养丰富,牲畜适口性好,蓄水保土能力好,抗旱耐寒能力极强,适宜栽种于水土流失严重的黄土高原区。在国内各地区多年、多点重复试验表明,苜蓿产品干物质量可达10%~15%,在所有绿色饲料作物中苜蓿营养品质处于较高水平<sup>[46]</sup>。其春夏秋冬皆可种植,并可单种、套种、复种,再生能力特别强,可以保证畜牧业的稳定,优质,高产。

综上所述表明,以苜蓿为代表的豆科类优质牧草适宜于黄土半干旱区的林草复合系统的建设,应予以推广。

### 3.2 林草复合系统林分密度调控

在黄土高原,如不考虑降水、土壤等其他因素,林草植被覆盖度越高,其防治水土流失的效果越好。余

新晓等<sup>[13]</sup>在山西吉县蔡家川流域的研究发现,随着林分覆盖度的上升,林地土壤侵蚀量急剧下降,林地水土保持效益愈加显著,当林分覆盖度由10%增加为90%时,林地土壤侵蚀模数则由507 t/km<sup>2</sup>减少为29 t/km<sup>2</sup>。但受自然条件、人类生产生活需求及其他因素的影响,林草植被的覆盖度不可能永远是越高越好。

在黄土高原半干旱区,养分和光照热量相对充足,水分是制约植物生长的最关键因素,降水是维持植物生长的唯一水分来源。土壤水分不足是林木正常生长发育及水土保持效益发挥的主要限制因子<sup>[45-46]</sup>。合理利用水分,科学调控造林密度,深入研究林木水分消耗与生产力的关系,提高经济效益和生态效益,是半干旱区人工造林和经营管理的关键。如何有效利用有限降水条件,提高造林的成活率,提高林草植被覆盖度,充分发挥其水土保持作用,并尽可能提高经济效益,满足当地居民生产生活的需要,这是黄土高原林草复合系统建设中必须解决的首要问题。要解决该问题,植被的建设就必须以水量平衡为基础,进而确定林草复合系统中合理的林分密度。合理的林分密度是指林木整个生长过程中在满足人们生产生活需要的同时,不会造成土壤水分亏缺的经营密度<sup>[47]</sup>。林分密度合理与否,直接影响着林分质量、稳定性、健康状况、生产结构和林分的生产力,同时也是影响投资和抚育管理强度的重要因素<sup>[48]</sup>。

武思宏<sup>[40]</sup>等依据水量平衡原理,综合考虑林木生长季耗水量及土壤水分动态变化对黄土丘陵沟壑区林分的合理密度进行了研究,其林分密度计算公式表述为

$$N \leq A \cdot (P - E) / T \quad (1)$$

式中:  $N$ ——单位面积林地林木株数(株/hm<sup>2</sup>);  
 $P$ ——降雨量(mm);  $E$ ——林地土壤蒸发量(mm);  
 $T$ ——单株林木蒸腾需水量(m<sup>3</sup>/株);  $A$ ——单位林地面积(m<sup>2</sup>),通常 $A$ 取1 hm<sup>2</sup>。

其连续两年对林龄为13 a的不同密度刺槐纯林和林龄为17 a的不同密度油松纯林林地进行了观测,数据与公式(1)计算数据基本一致,由此认为该公式对于计算黄土地区的刺槐及油松林的合理林分密度具有较好适用性。根据此原理推算出,2 a生刺槐林分密度应为15 569株/hm<sup>2</sup>,3 a生刺槐林分密度应为8 254株/hm<sup>2</sup>,5 a生刺槐林分密度应为4 214株/hm<sup>2</sup>,7 a生刺槐林分密度应为2 049株/hm<sup>2</sup>,13 a生刺槐林分密度应为876株/hm<sup>2</sup>;17~19 a生油松林分密度应为1 497株/hm<sup>2</sup>,19~20 a生油松林分密度应为1 284株/hm<sup>2</sup>,25~28 a生油松林分密度应为

874 株/hm<sup>2</sup>。此方法参数的获取较为方便, 计算过程简单, 但由于其假定条件为无地表径流, 无土壤的深层渗漏, 降水资源得以充分利用, 因此所得到的数据不够准确。另外只考虑了水分的利用, 没有综合考虑林木的生长情况、水土保持及经济效益, 应用条件具有局限性, 较适宜于进行粗略估算。

余新晓等<sup>[13]</sup>从水土保持林减小坡面径流及侵蚀产沙作用方面, 以林分郁闭度为主要因子, 对林分适宜密度进行了研究。收集了不同郁闭度林分 2001—2003 年 20 场侵蚀性降雨的产流产沙资料, 分别作出其产沙量、产流量的回归方程, 并另行选择了不同密度刺槐和油松林地人工降雨进行了土壤渗透测定。研究发现林分覆盖度越高, 土壤侵蚀量越小, 当超过 40% 时, 侵蚀量小于坡面允许侵蚀量(200 t/km<sup>2</sup>), 因此从水土保持而言, 林分的有效覆盖度可定为 40%。刺槐和油松林地林分密度越大, 其稳渗速率越高, 但两者并不成正比关系。当刺槐、油松林成林密度超过 3 000 株/hm<sup>2</sup> 时, 林地稳渗速率增加缓慢, 从改良土壤渗透性能和土壤防蚀的角度来说, 可将 3 000 株/hm<sup>2</sup> 作为油松林和刺槐林的成林密度上限。此研究以减流减沙为主要出发点, 主要考虑的是在强降雨期林草植被的水土保持效益的充分发挥, 没有考虑枯水期林木的生长及水分利用情况, 因此其适用条件有一定的局限。

张瑞等<sup>[39]</sup>从林分的生长状况, 生物多样性及土壤性状的改良等方面对林分合理密度进行了研究。研究地位于山西省吉县, 样地根据林木密度和栽植类型进行划分, 调查林地的林龄均为 15 a, 主要调查内容为采用样方法测定地块内乔木的树高、胸径、枝下高、冠幅、密度、郁闭度、生物量、枯落物等参数; 采用土壤剖面法测定容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度等土壤物理参数。对数据进行研究分析发现, 林龄在 15 a 左右的刺槐林、油松林的密度分别控制在 1 325 株/hm<sup>2</sup>、1 733 株/hm<sup>2</sup> 左右, 对林木生长状况, 林地草本植物多样性的增加和土壤物理性状的改良更为有利; 但是从防治土壤表层溅蚀、控制水土流失的角度考虑, 林龄在 15 a 左右的刺槐林、油松林密度应分别控制在 2 133 株/hm<sup>2</sup>、2 222 株/hm<sup>2</sup> 左右, 其中营造刺槐林更加有益于增强土壤水源涵养能力。该研究充分考虑了林草生物量、生物多样性、土壤水分利用、土壤物理性状等各个方面, 且从不同方向出发, 提出了相对应的适宜密度, 研究要素较为全面。但研究方法需要对研究流域不同林龄的林地进行大量调查, 并对数据进行统计分析, 工作量大, 投入多, 实际推广操作起来有一定的困难。

孙中锋等<sup>[49]</sup>以土壤水分机制及林水关系为研究出发点, 对晋西黄土丘陵区刺槐林土壤水分状况进行了定位观测。其研究方法为对选取样地的降雨量进行观测, 并将 1 m 深的土层平均划分为 5 个层次, 采用烘干法测定不同土层的含水量, 并选取 40—60 cm 的土壤标定土壤水分曲线进行拟合计算。研究结果表明刺槐及其混交林适宜广泛栽种于较干旱区域, 当刺槐林成林的密度为 1 200~2 000 株/hm<sup>2</sup> 时, 生长季末土壤水分可以得到有效补充, 12 a 生密度为 2 250 株/hm<sup>2</sup> 的刺槐林出现了土壤水分亏缺, 林分生长受限, 可将此密度作为 12 a 生刺槐林的临界密度。此研究方法的主要考虑因素仅为土壤的水分利用状况, 没有考虑林草植被的水土保持效益和经济社会效益。

张建军等<sup>[47]</sup>在晋西黄土丘陵区对刺槐水土保持林进行了林分密度研究, 根据水量平衡和径流林业的基本原理, 提出了利用胸径计算刺槐林合理密度的公式。他根据研究区枯枝落叶层分解快、拦蓄水量少的情况, 将林地水量平衡方程改写为:

$$\Delta W = P - I_{lg} - R - E \quad (2)$$

式中:  $P$ ——时段内的降水量(mm);  $I_{lg}$ ——林冠截留量(mm);  $R$ ——地表径流量(mm);  $E$ ——林分的蒸发散量(mm);  $\Delta W$ ——土壤含水量的变化量(为负值时的绝对值即为林地缺水量)(mm)。代入利用定位通量法计算出的各地类生长期蒸发散量  $E$ , 求出试验地生长季各地类的水分亏缺量。

$$QS = aGP \quad (3)$$

式中:  $Q$ ——林地缺水量(mm);  $S$ ——单株树木的水分营养面积(m<sup>2</sup>);  $a$ ——平均径流系数(%);  $G$ ——所需集水面积(指树木营养面积以外需要增加的集水面积)(m<sup>2</sup>);  $P$ ——符合某一频率的降水量(mm)。

根据调查, 经回归分析, 可以得到刺槐水分营养面积与胸径之间的关系式:

$$S = a_1 D + b \quad (4)$$

式中:  $D$ ——树的胸径(cm);  $a_1, b$ ——待定系数。

单株树所需总水分营养面积为:

$$S_T = S + G \quad (5)$$

综合以上研究, 我们推导出了晋西黄土区刺槐的合理密度公式:

$$N = 10000aP \left[ (a_1 D + b) (-P + I_{lg} + R + E + aP) \right] \quad (6)$$

公式中各符号意义同前。

根据式(6), 计算出以水土保持为目的的刺槐林成林的密度应该控制在 700 株/hm<sup>2</sup> 以内, 幼林的密度应该控制在 2 300 株/hm<sup>2</sup> 以内, 最大不应超过 3 000 株/hm<sup>2</sup>, 同时应当采取适宜的集水措施, 并对

林木进行适时间伐,以保证土壤不会干化和水保效益的持续发挥,张建军进行的人工模拟降水实验也支持该结论<sup>[50]</sup>。此方法从土壤的有效性出发,充分考虑了影响林木水分利用的各个要素,不仅适用于刺槐树种也适用于其他树种的计算,计算结果较为准确,适宜于有长期观测条件的地区推广应用。如果将此方法与水土保持及经济效益进行综合研究分析,得到的数据将更具有普遍性和指导意义。

综上关于合理林分密度的研究,不难发现其特点,首先是研究涉及面广,其次是目前的研究方法还不统一,研究要素不尽全面。目前的研究都是针对于某几个要素进行分析,没有系统的对水分、土壤、生物量、水土保持效益并耦合社会效益、经济效益等进行综合研究。林分密度管理是一项系统工程,涉及因素复杂多样。在对人工林的耗水特性及水土保持作用进行研究的同时,如何结合社会的发展,对社会及经济效益进行耦合分析,建立林分密度的综合调控模型,在今后还需要进行深入研究。

## 4 结论与讨论

林草复合系统作为农林复合生态系统的一种,能充分利用自然资源和能源,缓解林牧矛盾,创造良好的生态、社会、经济效益。在黄土区的退耕还林工作中,林草复合系统能发挥出积极的作用,对当地的土壤侵蚀和土壤水分的流失起到良好的改善作用,促进牧业的发展,增加农民收入水平,提高农民对退耕还林工作的支持度和积极性,因此适宜于大力推广实施。

黄土半干旱区水土保持林草复合系统的主要造林树种为刺槐和油松,造林草种应优先选取以苜蓿为代表的豆科类牧草。一方面能够和林木配合发挥优良的水土保持作用,覆盖地表,减少土壤侵蚀和水分蒸发散;另一方面可以提高土壤中各种营养元素的含量,且再生能力特别强,能保证当地畜牧业的稳定、优质、高产,促进当地经济发展。

由于黄土半干旱区气候及地形的特殊性,为使林草复合经营能达到最好的生态和社会经济效益,需要对林草复合系统种植结构进行调控。在对目前的研究成果进行了分析后,得到了较适宜于黄土半干旱区的林分密度计算公式。以山西省吉县为例,幼龄的刺槐和油松林林分密度以保持在 $2\ 300$ 株/ $\text{hm}^2$ 以下为宜,最高不能超过 $3\ 000$ 株/ $\text{hm}^2$ ;成材林的密度最好保持在 $700$ 株/ $\text{hm}^2$ 左右。此公式所计算得到的数据为正常造林条件下的指导数据,如果能够采取较好的集水措施,或肥力灌溉条件良好,则在此基础上可以适当增加密度。在具体的实施过程中,当地应该充分

考虑到水肥条件的差异性,在实践过程中进行检验调整。在以后的研究进程中,应更加注重于多要素的综合分析,以建立环境生态、经济、社会兼顾的林分密度综合调控模型,为退耕还林还草政策的顺利实施服务。

目前关于林草复合生态系统内部的物质循环和能量循环及系统的动态研究方面还存在着很多不足,林草复合生态系统的各种效益的综合评价指标体系还不够健全。在今后应加强这方面的研究,在目前的基础上,更进一步的对评价标准、评价方法和评价模型进行完善。

纵观黄土高原林草复合研究的进展情况,可看出林草复合模式优化研究可以为政府科学决策提供有力依据,对于解决我国可持续发展及建设中面临的诸多生态环境问题显得尤其重要。未来黄土高原林草复合将采取理论与实践相结合,多学科交叉、多方位、多层次的研究手段,以优化土地资源配置,为我国的人口、社会、经济和资源环境的可持续发展做出贡献。

参考文献:

- [1] 胡自治.世界人工草地及其分类现状[J].国外畜牧学:草原与牧草,1995(2):4-8.
- [2] 武卫国,胡庭兴,周朝彬,等.不同密度巨桉林草复合模式初期土壤特征研究[J].四川农业大学学报,2007,25(1):76-81.
- [3] 宋兆民,孟平.中国农林业的结构与模式[J].世界林业研究,1993(5):77-81.
- [4] 杨玉盛,俞新妥,林先富.杉木-山苍子-作物复合经营模式土壤肥力的研究[J].林业科学,1993,29(2):97-103.
- [5] 彭珂珊.中国西部退耕还林(草)面临新问题再思考[J].首都师范大学学报,2001,22(2):93-102.
- [6] 阎得仁,刘永军,冯立岭,等.农林复合经营土壤养分的变化[J].东北林业大学学报,2001,29(1):53-56.
- [7] 蔡丽平,谢锦升,陈光水,等.杉木油桐仙人草复合经营模式营养元素分配[J].东北林业大学学报,2001,29(1):24-25.
- [8] 张兴昌,邵明安,黄占斌,等.不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响[J].生态学报,2000,20(6):1038-1044.
- [9] 陈云明,梁一民,程积民.黄土高原林草植被建设的地带性特征[J].植物生态学报,2002,26(3):339-345.
- [10] 郭忠升,邵明安.生态环境治理中的林草植被建设[J].西北林学院学报,2003,18(1):25-28.
- [11] 王海明,李贤伟,李守剑,等.林草复合经营模式研究[J].四川林勘设计,2003(1):5-9.
- [12] 曹全意.黄土高原地区可持续发展的探讨[J].干旱区研究,1998,15(1):87-89.
- [13] 余新晓,张晓明,武思宏,等.黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2006,24

- (1): 19-26.
- [14] 余新晓, 毕华兴, 朱金兆, 等. 黄土地区森林植被水土保持作用研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(5): 433-440.
- [15] 尹忠东, 朱清科, 毕华兴, 等. 黄土高原植被耗水特征研究进展[J]. 人民黄河, 2005, 27(6): 35-37.
- [16] 李阜憬, 董卫民, 王增法, 等. 低山丘陵地区林草结合立体开发模式调查浅析[J]. 草业科学, 1995, 12(6): 68-70.
- [17] 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.
- [18] 姜艳, 徐丽萍, 杨改河, 等. 不同退耕模式林草初夏小气候效应[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 162-166.
- [19] 李会科, 赵政阳, 张广军. 种植不同牧草对渭北苹果园土壤肥力的影响[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(2): 31-34.
- [20] 张久海, 安树青, 李国旗, 等. 林牧复合生态系统研究评述[J]. 中国草地, 1999(4): 52-60.
- [21] Sierra J, Dulorme M, Desfontaines L. Soil nitrogen as affected by *Gliricidia sepium* in a silvopastoral system in Guadeloupe, French Antilles[J]. Agroforestry Systems, 2002, 54: 87-97.
- [22] 姚青, 朱红惠, 陈杰忠. 果园柱花草刈割处理对其与柑橘养分竞争的影响[J]. 园艺学报, 2004, 31(1): 11-15.
- [23] 刘斌, 罗全华, 常文哲, 等. 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.
- [24] 刘德广, 熊锦君, 谭炳林, 等. 荔枝-牧草复合系统节肢动物群落多样性与稳定性分析[J]. 生态学报, 2001, 21(10): 1596-1601.
- [25] 吴建军, 李全胜, 严力蛟. 幼龄桔园间作牧草的土壤生态效应及其对桔树生长的影响[J]. 生态学杂志, 1996, 15(4): 10-14.
- [26] 孔建, 王海燕, 赵白鸽, 等. 苹果园主要害虫生态调控体系的研究[J]. 生态学报, 2001, 21(5): 790-794.
- [27] Wyss E. The effects of artificial weed strips on diversity and abundance of the arthropod fauna in a Swiss experimental apple orchard[J]. Agricultural Ecosystem Environment, 1996, 60: 47-59.
- [28] 李伟才, 习金根, 雷新涛. AP 番荔枝园生草栽培效应研究[J]. 中国南方果树, 2005, 34(5): 30-32.
- [29] 李绍密, 陈青, 裴大风, 等. 经济林间作牧草的效益研究[J]. 草业科学, 1992, 9(1): 23-26.
- [30] 王斌端, 孙立达. 西吉黄土丘陵区落叶松与沙打旺间作试验研究[J]. 林业科技通讯, 1987(1): 4-8.
- [31] 尹家锋, 朱世清, 杨佐琴, 等. 林草间种对保持水土效益的研究[J]. 林业科技, 1994, 19(2): 17-18.
- [32] 刘蝴蝶, 郝淑英, 曹琴, 等. 生草覆盖对果园土壤养分、果实产量及品质的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(3): 184-186.
- [33] 彭鸿嘉, 莫保儒, 蔡国军, 等. 甘肃中部黄土丘陵沟壑区农林复合生态系统综合效益评价[J]. 干旱区地理, 2004, 27(3): 367-372.
- [34] 孙鹏森, 马李一, 马履一. 油松、刺槐林潜在耗水量的预测及其与造林密度的关系[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(2): 1-6.
- [35] 张永涛, 杨吉华. 黄土高原降水资源环境容量下侧柏合理密度的研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 156-162.
- [36] 毕华兴, 李笑吟, 李俊, 等. 黄土区基于土壤水平衡的林草覆被率研究[J]. 林业科学, 2007, 43(4): 17-23.
- [37] 郭建斌, 赵陟峰, 骆汉. 晋西黄土区刺槐林种植密度对植被生长状况的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 80-84.
- [38] 魏天兴, 余新晓, 朱金兆, 等. 黄土区防护林主要造林树种水分供需关系研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 185-189.
- [39] 张瑞, 张建军, 赖宗瑞. 晋西黄土高原水土保持林适宜密度研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 67-71.
- [40] 武思宏, 朱清科, 余新晓, 等. 晋西黄土区主要造林树种合理林分密度计算与分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 83-86.
- [41] 谭勇, 王长如, 梁宗锁, 等. 黄土高原半干旱区林草植被建设措施[J]. 草业学报, 2008, 15(4): 4-11.
- [42] 高峻, 张劲松, 孟平, 等. 中阳黄土丘陵沟壑区林草复合模式的气候生态效应[J]. 中国农业气象, 2006, 27(3): 167-170.
- [43] 孙立达, 杨维西, 黄治江. 沙打旺、紫花苜蓿和小叶锦鸡儿的根系对斜坡稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 1987, 1(2): 43-51.
- [44] 王丽英. 大凌河流域种植紫花苜蓿的水土保持及牧草双重效益[J]. 现代畜牧兽医, 2007(11): 22.
- [45] 张永涛, 杨吉华. 黄土高原降水资源环境容量下侧柏合理密度的研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 156-162.
- [46] 王力, 邵明安, 李裕元. 陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究[J]. 林业科学, 2004, 40(1): 84-91.
- [47] 张建军, 贺维, 纳磊. 黄土区刺槐和油松水土保持林合理密度的研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 55-59.
- [48] 高加民, 唐安亮. 正确认识造林密度问题[J]. 林业勘查设计, 2003, 125(1): 13.
- [49] 孙中锋, 周玉喜, 朱金兆, 等. 晋西黄土丘陵区坡面刺槐林地土壤水分研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(5): 43-49.
- [50] 张建军, 毕华兴, 魏天兴. 晋西黄土区不同密度林分的水土保持作用研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(3): 50-53.