

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2010.01355

海河低平原区杨农复合模式内作物生产力与生态因子的关系

刘月华 陈源泉 朱 敏 曲 波 隋 鹏* 高旺盛*

中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193

摘 要: 定位监测河北省衡水地区不同种植格局的杨农复合模式(杨树林龄为 6~7 年)内土壤含水量、PAR(光合有效辐射)和温度的变化, 分析该地区杨农复合模式内作物生产力与生态因子的关系。研究表明, 杨农复合模式的 PAR 较粮单作模式降低了 32.43%~76.71%, 土壤含水量降低了 18.67%~42.75%, 不同杨农复合模式的 PAR 和土壤水分间也存在显著差异($P<0.05$); 复合系统的黑麦草生物量与 PAR 的相关性最大, 饲用大豆生物量与 PAR 和 0~40 cm 土壤体积含水量间的相关性都较大, 相关系数均超过 0.7500($P<0.05$)。提高杨农复合模式的 PAR 和土壤含水量均可有效提高作物生物量。鉴于该地区水资源缺乏, 通过间伐或修枝等措施提高复合模式内的 PAR 是提高作物生物量的可行措施。

关键词: 杨农复合系统; 光合有效辐射; 土壤水分; 作物生产力

Relationship between Crop Productivity and Ecological Factors in Poplar-Crop Intercropping Systems in Haihe Lowland Area

LIU Yue-Hua, CHEN Yuan-Quan, ZHU Min, QU Bo, SUI Peng*, and GAO Wang-Sheng*

College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: Agroforestry system is an approach to improve land use efficiency, it not only allows for the production of trees and crops, but also makes highly use efficiency of natural resources. Because of advantages of Agroforestry, large scales of poplar-based Agroforestry systems have been developed in north of China since 2002. Hengshui area, in Hebei province, where lots of poplar-based Agroforestry systems exist, is a typical area lacking in water. Our previous study showed that Agroforestry systems consumed a large quantity of water storing in soil and decreased the production of both trees and underlayer crops as trees grew. To analyze the relationships of crop biomass with 0–40 cm soil moisture, and photosynthetically active radiation (PAR) and temperature, we conducted a study from Oct. 2007 to Oct. 2009 on 6–7 year-old poplar-crop intercropping systems with three different patterns of poplar plantations. Compared with sole crop system, PAR and 0–40 cm soil moisture in Agroforestry systems were reduced by 34.43%–76.71% and 18.67%–42.74% respectively. Crop biomass, PAR and soil moisture all showed significant difference among different Agroforestry systems ($P<0.05$). Ryegrass biomass was highly correlated with PAR, while soybean biomass was highly correlated with both PAR and soil moisture ($P<0.05$), with all the correlation coefficients 0.7500 ($P<0.05$) in both 2008 and 2009. The results showed that Agroforestry systems could product more crop biomass by increasing either PAR or soil moisture. And increasing PAR by removing poplar trees (removing alternate trees in rows, or even removing alternate tree rows) or tree branch pruning was an effective measure under the condition of seriously lacking in water in that area.

Keywords: Poplar-crop intercropping systems; PAR; Soil moisture; Crop productivity

农林复合模式作为一种既能获得粮食和木材, 又能改善农业生态环境并能充分合理利用土地资源的复合经营方式, 近十几年来在我国平原农区发展迅速^[1], 随之而来的农林复合模式内土壤水分消耗增加、作物生产力下降等问题也越来越引人关注。本课题组自 2002 年起在河北省景县开展的农林复合模式相关定位试验研究结果显示, 随杨树林龄增

加, 复合模式内作物产量降低幅度增大: 1~2 年林龄复合模式内冬小麦产量有所增加, 但夏玉米产量降低了 31.3%~33.7%^[2]; 2、3、4、5 林龄冬小麦-夏玉米年总减产幅度依次为 13.9%、28.2%、54.6%和 69.6%^[3]; 国内外相关研究也得出了林下作物减产的相似结论^[4-8]。虽然这些研究所选的地域、种植模式、树种和作物不同, 但都可以得出如下结论, 即在树

本研究由国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2007BAD89B01)和河北省科技攻关项目(06220115D)资助。

* 通讯作者(Corresponding authors): 隋鹏, E-mail: suipengye@cau.edu.cn; 高旺盛, E-mail: wshgao@cau.edu.cn

Received(收稿日期): 2010-02-08; Accepted(接受日期): 2010-04-20.

木株行距、林龄等选择恰当时, 不会造成 C_3 作物减产, 甚至会有小幅度增产; 但是任何农林复合系统都会导致 C_4 作物的减产。

农林复合系统内作物生产力为何发生了改变, 又该如何调节这种变化? 解决这一问题需要对复合系统内生态因子变化规律的进行分析探讨。与粮单作模式相比, 农林复合系统内作物生长的生态因子发生了比较大的变化, 而光、温、水等生态因子的变化对作物产量又有着直接影响, 因此, 研究农林复合模式内作物生产力与生态因子的关系, 有助于明确影响作物生产力的关键因子, 为提高作物产量提供理论依据。目前研究农林复合模式内作物生产力与生态因子关系的方法主要有两类。一是模拟实验, 如 Moreno 等^[9-11]通过设置根障和人工遮阴等分析光照、土壤水分等因素对作物产量的影响。二是田间试验测定结合统计分析, 如裴保华等^[12-15]通过测定光照和土壤水分来分析其与作物生产力的关系。农林复合模式内生态因子与作物生产力的关系因所研究地域、种植模式、树种和作物选择的不同而异, 其相应的管理措施也就有所不同, 这使得已有的研究方法虽具有借鉴意义, 但研究结果很难应用于环境相差较大的其他地域。本研究借鉴田间观测与统计分析相结合的方法, 选择半湿润半干旱、水资源紧缺的海河低平原黑龙港流域为研究区, 探讨农林复合模式内生态因子与作物生产力的关系。该区域杨农复合模式面积较大, 2005 年, 河北省全年完成造林面积 30.2 万公顷^[16], 在耕地面积为 58.5 万公顷的衡水地区杨农复合模式面积已达 6.7 万公顷^[17], 因此在该区域研究杨农复合模式内生态因子与作物生产力的关系具有一定的代表性和现实意义。本研究为该区域或更大范围的杨农复合模式研究提供半湿润半干旱水资源紧缺区域的基础数据, 为提高系统内作物生产力提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

河北省衡水市中国农业大学景县试验站, 位于海河低平原黑龙港流域, 北纬 $37^{\circ}36'$, 东经 $116^{\circ}1'$, 海拔 20 m, 具暖温带半湿润半干旱大陆季风性气候, 年太阳辐射总量为 $121.04 \text{ kJ cm}^{-2}$, 平均气温 12.5°C , 0°C 积温 $4\ 834.7^{\circ}\text{C}$, 10°C 积温 $4\ 435.9^{\circ}\text{C}$, 无霜期 198 d。多年平均降雨量 568.5 mm, 其中 70% 以上集中在每年的 6~8 月份。该区域蒸发量大, 降水少, 作物可利用水分少, 年水分亏缺量 400 mm。土壤类型主要是壤质褐土, 分布区的土地平坦, 土层深厚, 土质适宜耕作^[18], 传统耕作方式为冬小麦-夏玉米复种植。

1.2 田间试验设计

试验小区的杨树品种为中杨 16, 于 2002 年 11 月 20 日单行种植, 南北行向, 株行距为 $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 2006 年 10 月 5 日对其进行行间伐, 间伐时杨树的平均树高为 11.08 m, 胸径为 9.39 cm。间伐后, $4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 、 $2 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 和对照模式($2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$) 3 种杨农复合处理顺序排列, 林外大约 500 m 处设置粮单作模式。采取 $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 复合模式和粮单作双对照设计, 试验期间, 对 3 种复合模式采取完全一致的田间管理措施。试验中林下种植作物排序如表 1 所示。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量 土壤水分测定位置如图 1 所示, $4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 模式和对照均在距树行 2.5 m 和 1.0 m 处测定, 3 次重复; $2 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 模式在距树行 5.0 m、2.5 m 和 1.0 m 处测定, 由于地块面积所限只采取两次重复; 粮单作模式采取 3 次重复测定。测定深度为 0~40 cm, 其中 0~20 cm 土壤水分采用土钻法测定, 20~40 cm 土壤水分用中子仪法获得, 用土钻法进行校正。用环刀法测定 0~20 cm 土壤容重为 1.49, 把土钻法得到的 0~20 cm 土壤重量含水量与该层次土

表 1 作物种植方式
Table 1 Timetable and treatments of poplar-crop intercropping systems

时期 Period (year/month)	对照 CK	$4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$	$2 \text{ m} \times 10 \text{ m}$	粮单作 Sole cropping system
2007/10–2008/5	杨树 黑麦草 Poplar ryegrass	杨树 黑麦草 Poplar ryegrass	杨树 黑麦草 Poplar ryegrass	冬小麦 Winter wheat
2008/5–2008/10	杨树 饲用大豆 Poplar soybean	杨树 饲用大豆 Poplar soybean	杨树 饲用大豆 Poplar soybean	夏玉米 Summer maize
2008/10–2009/5	杨树 黑麦草 Poplar ryegrass	杨树 黑麦草 Poplar ryegrass	杨树 黑麦草 Poplar ryegrass	冬小麦 Winter wheat
2009/5–2009/10	杨树 饲用大豆 Poplar soybean	杨树 饲用大豆 Poplar soybean	杨树 饲用大豆 Poplar soybean	夏玉米 Summer maize

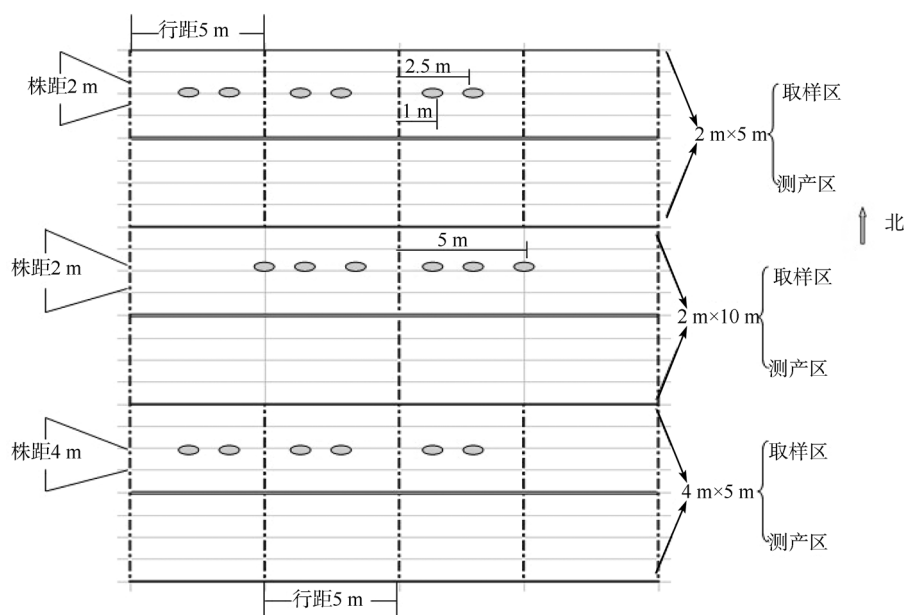


图1 田间试验设置图

Fig. 1 Experimental layout of the crop-poplar intercropping system

椭圆代表土壤水分测定位置, 竖线代表杨树行。

Ovals indicate locations of soil moisture measurements, and vertical line indicates poplar line.

壤容重相乘得到该层次的土壤体积含水量, 0~40 cm 土壤体积含水量为两个层次的平均值, 0~40 cm 模式土壤体积含水量采取该模式距树行不同距离处的加权平均值。在作物生长期进行每月一次的测定, 本文采用的是作物生长期平均值。

1.3.2 光合有效辐射(PAR) 采用SCA-09型光量子测量仪在作物生长期每月选取全晴天一天, 对复合模式内外作物冠层的 PAR 进行从 8:00 到 18:00 的整点测定。测定位置与土壤水分测定位置相平行, 复合模式内每个距离处随机测定 20 个数据, 粮单作模式随机测定 5 个数据。复合模式的 PAR 采取距树行不同距离处的加权平均值。

1.3.3 温度 温度测定位置与水分测定位置相同, 用温度计与 PAR 同步测定, 感应球距地面 1.5 m, 复合模式温度采取距树行不同距离处的加权平均值。

1.3.4 作物产量 取样位置与水分测定位置相平行, 黑麦草和饲用大豆的样段均为 1 m, 复合模式生物量采取距树行不同距离处的加权平均值。

1.4 数据分析方法

采用 Microsoft Excel 2003 和 SAS 软件进行数据处理和分析, 利用单因素方差分析(GLM)和 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验 ($P < 0.05$), 用 Pearson 相关系数评价不同生态因子对作物生产力的影响。

2 结果与分析

2.1 复合模式内 PAR、土壤含水量和温度分析

2.1.1 PAR 2008 年, 黑麦草生长季, 2 m×10 m 模式作物冠层 PAR 比对照模式高 26.08%, 4 m×5 m 模式比对照模式高 11.22%; 饲用大豆生长季, 2 m×10 m 模式作物冠层 PAR 比对照模式高 81.15%, 4 m×5 m 模式比对照模式高 28.15% (表 2)。2009 年, 黑麦草生长季, 2 m×10 m 模式作物冠层 PAR 比对照模式高 29.66%, 4 m×5 m 模式比对照模式高 10.92%; 饲用大豆生长季, 2 m×10 m 模式作物冠层 PAR 比对照模式高 85.40%, 4 m×5 m 模式比对照模式高 35.75%。2008 和 2009 年黑麦草和饲用大豆生长季, 杨农复合模式内作物冠层 PAR 较粮单作模式降低 32.43%~76.71%, 间伐措施明显提高了复合模式内作物冠层 PAR, 3 种模式的作物冠层 PAR 间均存在显著差异 ($P < 0.05$), 这主要与杨树不同种植格局导致的不同遮阴面积和遮阴强度有关。

2.1.2 0~40 cm 土壤水分 2008 年, 黑麦草生长季, 2 m×10 m 模式 0~40 cm 土壤水分比对照模式高 1.97%, 4 m×5 m 模式比对照模式低 4.31%; 饲用大豆生长季, 2 m×10 m 模式 0~40 cm 土壤水分比对照模式高 9.00%, 4 m×5 m 模式比对照模式低 5.12%。2009 年, 黑麦草生长季, 2 m×10 m 模式 0~40 cm 土

壤水分比对照模式高 5.68%, 4 m×5 m 模式比对照模式低 4.77%; 饲用大豆生长季, 2 m×10 m 模式 0~40 cm 土壤水分比对照模式高 5.36%, 4 m×5 m 模式比对照模式低 4.17%。2008 和 2009 年黑麦草和饲用大豆生长季, 杨农复合模式的 0~40 cm 土壤体积含水量较粮单作模式降低 18.67%~42.75%, 3 种复合模式的 0~40 cm 土壤水分间均无显著差异($P>0.05$), 这主要与 6~7 年

林龄杨农复合模式土壤含水量均较低有关。

2.1.3 温度 2008 和 2009 年的数据结果都表明, 4 m×5 m 模式的季节平均温度稍微高于对照模式, 对照模式又稍微高于 2 m×10 m 模式(2008 年黑麦草生长季除外)。一方面, 3 种复合模式相邻顺序排列; 另一方面, 热量随空气流动在模式间进行扩散, 导致温度在复合模式间的差异较小。

表 2 PAR、0~40 cm 土壤体积含水量和温度在模式间的比较

Table 2 Treatment differences (sole cropping system, CK, 4 m×5 m and 2 m×10 m) for PAR, 0~40 cm soil moisture and temperature

处理 Treatment		对照 CK	4 m×5 m	2 m×10 m	粮单作 Sole crop system
2008					
黑麦草季	PAR (μmol m ⁻² s ⁻¹)	403.0 D	448.3 C	508.2 B	752.0 A
Ryegrass	0~40 cm 土壤体积含水量 0~40 cm soil moisture	0.2318 B	0.2218 B	0.2364 B	0.2850 A
	温度 Temperature (°C)	18.13	18.88	18.32	18.05
饲用大豆季	PAR (μmol m ⁻² s ⁻¹)	237.8 D	304.7 C	430.7 B	835.8 A
Soybean	0~40 cm 土壤体积含水量 0~40 cm soil moisture	0.1953 B	0.1853 B	0.2128 B	0.3236 A
	温度 Temperature (°C)	29.40	29.75	29.27	31.89
2009					
黑麦草季	PAR (μmol m ⁻² s ⁻¹)	381.7 D	423.4 C	494.9 B	789.8 A
Ryegrass	0~40 cm 土壤体积含水量 0~40 cm soil moisture	0.2099 B	0.1999 B	0.2218 AB	0.2633 A
	温度 Temperature (°C)	17.60	18.36	17.24	17.99
饲用大豆季	PAR (μmol m ⁻² s ⁻¹)	227.0 D	308.2 C	420.9 B	974.7 A
Soybean	0~40 cm 土壤体积含水量 0~40 cm soil moisture	0.2398 B	0.2298 B	0.2527 B	0.3411 A
	温度 Temperature (°C)	29.60	30.14	29.47	31.62

表中数据为各作物生长期的平均值; 2008 指代 2007 年 10 月~2008 年 10 月, 2009 指代 2008 年 10 月~2009 年 10 月; 同一行标以不同字母的数据在模式间具有 0.05 水平的显著差异。

Data in Table 2 are average of seasons; 2008 indicates time range from Oct. 2007 to Oct. 2008, 2009 indicates time range from Oct. 2008 to Oct. 2009; values in each row followed by the same letter are not significantly different at 0.05 probability level.

2.2 不同复合模式的作物生产力差异分析

2008 年, 2 m×10 m 模式黑麦草生物量比对照模式高 61.52%, 4 m×5 m 模式比对照模式高 16.38%; 2 m×10 m 模式饲用大豆生物量比对照模式高 112.98%, 4 m×5 m 模式比对照模式高 37.27% (表 3)。2009 年, 2 m×10 m 模式黑麦草生物量比对照模式高 46.11%,

4 m×5 m 模式比对照模式高 41.82%; 2 m×10 m 模式饲用大豆生物量比对照模式高 84.05%, 4 m×5 m 模式比对照模式高 16.65%。2009 年, 4 m×5 m 与对照模式的饲用大豆生物量间无显著差异, 这与饲用大豆苗期 4 m×5 m 模式土壤含水量显著低于对照模式, 影响幼苗成活率有关(表 4)。2 m×10 m 模式作物生

表 3 不同模式的作物生物量差异

Table 3 Treatment differences (sole cropping system, CK, 4 m×5 m, and 2 m×10 m) for crop biomass

处理 Treatment	2008		2009	
	黑麦草生物量 Biomass of ryegrass (kg hm^{-2})	大豆生物量 Biomass of soybean (kg hm^{-2})	黑麦草生物量 Biomass of ryegrass (kg hm^{-2})	大豆生物量 Biomass of soybean (kg hm^{-2})
对照 CK	4391.6 C	1360.2 C	2065.8 B	1089.5 B
4 m×5 m	5110.9 B	1867.1 B	2929.7 A	1270.9 B
2 m×10 m	7093.3 A	2896.9 A	3018.2 A	2005.4 A

同一行标以不同字母的数据在模式间具有 0.05 水平的显著差异。

Values in each row followed by the same letter are not significantly different at 0.05 probability level.

表 4 2009 年 7 月 4 日土壤体积含水量在模式间的差异
Table 4 Treatment differences (CK, 4 m×5 m and 2 m×10 m)
for soil moisture in July 4, 2009

处理 Treatment	对照 CK	4 m×5 m	2 m×10 m
0~20 cm	0.149 A	0.129 A	0.156 A
20~40 cm	0.185 A	0.169 A	0.200 A

2009 年 6 月 18 日降水 105 mm; 同一行标以不同字母的数据在模式间具有 0.05 水平的显著差异。

The rainfall in June 18, 2009 was 105 mm; values in each row followed by the same letter are not significantly different at 0.05 probability level.

物量显著高于对照模式, 4 m×5 m 模式也显著高于对照模式(2009 年饲用大豆生物量除外), 差异均达显著水平($P<0.05$), 间伐措施明显提高了杨农复合模式的作物生物量。

2.3 复合模式内作物生产力与生态因子间的关系分析

将杨农复合模式内作物生物量与生态因子进行相关分析(表 5)表明, 黑麦草生长季, 黑麦草生物量与 PAR 相关性最好, 2008 年达极显著水平($P>0.01$),

2009 年达显著水平($P<0.05$); 2008 和 2009 年黑麦草生物量与 0~40 cm 土壤水分和温度的相关性较差, 均未达显著水平($P<0.05$)。2008 年饲用大豆生物量与 PAR 相关性最好($P<0.01$), 与 0~40 cm 土壤水分的相关性也较好($P<0.05$); 2009 年饲用大豆生物量与 0~40 cm 土壤水分的相关性最好($P<0.01$), 与 PAR 的相关性也较好($P<0.01$); 2008 和 2009 年饲用大豆生物量与温度的相关性均较差(相关系数绝对值小于 0.1)。

黑麦草生长季, 作物生物量与 PAR 间有显著的正相关关系, 而与 0~40 cm 土壤水分和温度的相关性较差, 这是因为 PAR 在复合模式间的差异梯度较大, 而 0~40 cm 土壤水分和温度在复合模式间的差异梯度较小。饲用大豆生长季, 作物生物量与 PAR 和土壤水分间均有显著的正相关关系, 而与温度的相关性较差, 这是因为 PAR 和 0~40 cm 土壤水在复合模式间的差异梯度已超出饲用大豆的反应阈值, 而温度在复合模式间的差异梯度则较小。

表 5 杨农复合模式内作物生产力与生态因子间的相关系数

Table 5 Correlation coefficient of crop productivities with ecological factors measured in poplar-crop intercropping systems

处理 Treatment	2008		2009	
	黑麦草生物量 Biomass of ryegrass	大豆生物量 Biomass of soybean	黑麦草生物量 Biomass of ryegrass	大豆生物量 Biomass of soybean
PAR	0.9309**	0.9525**	0.80683*	0.8942**
0~40 cm 水分 0~40 cm soil moisture	0.0300	0.7762*	0.68594	0.9454**
温度 Temperature (°C)	-0.0378	-0.0983	-0.47707	-0.0583

**表示 0.01 的极显著水平, *表示 0.05 的显著水平, $n=7$ 。 ** Significant at $P=0.01$; * Significant at $P=0.05$, $n=7$.

3 讨论

农林复合系统在协调人口、资源和环境的矛盾方面体现了很强的生命力, 然而不合理经营会显著降低农作物的产量, 因此有必要研究复合系统生态因子和作物生产力的变化情况, 进而寻找出生态因子与作物生产力的关系, 尽可能避免树木与农作物对资源的竞争, 最大程度地发挥复合系统的优势。农林复合系统内生态因子的改变在一定范围内时增加或不影响林下作物的生长, 如袁玉欣等^[10]对单作冬小麦进行农林复合系统遮阴模拟试验表明林木遮阴程度不超过 20%就不会影响作物的生长和产量; 戴晓琴等^[2]研究表明 1~2 年树龄杨树间作冬小麦其产量有所增加; Haque 等^[11]通过模拟试验发现 25%、50%、75%和 100%的 PAR 强度对黄瓜的生育期长短有影响, 但对其产量没有显著影响。

本研究发现杨农复合系统内 PAR 和作物(黑麦草和饲用大豆)产量均较作物单作系统明显降低, 说明遮阴降低了作物产量, 这与刘乃壮等^[19-20]对农林复合系统的研究结果相似; 而 Moreno^[9]对橡树林的研究则表明复合系统内(大约 50%遮阴)牧草产量较单作系统增加, 这主要是因为 Moreno^[9]选择的西班牙伊比利亚地区的光照条件超出了牧草的所需范围, 因此遮阴反而有利于牧草生长。本研究还发现 PAR 和土壤含水量均是影响作物产量的重要生态因子, Philip 等^[21]对杨农和槭(*Acer sacharrinum*)农复合系统与作物单作系统的研究也表明 PAR 和 0~5 cm 土壤水分与大豆产量的相关系数均大于 0.70 ($P<0.1$); 裴保华等^[12]对 10~11 年林龄, 3 m×28 m 的杨农复合系统研究结果也表明复合系统内光照和土壤水分胁迫抑制农作物(花生和小麦)的生长; 赵忠宝等^[13]对 4 m×10 m、(4 m×3 m)×20 m 和(4 m×4 m)×30 m 杨农

复合系统研究表明遮阴是导致小麦产量降低的主要原因; Moreno^[9]对橡(oak)农复合系统的研究结果与以上研究有所不同, 其结果显示复合系统内牧草产量比单作条件下提高 16.8%~33.4%, 这种增产是由于橡树林自身的遮阴和对土壤肥力的提升综合作用的结果, 但是这种增产效应随着年份降雨不同而不同, 降雨量少的年份甚至减产, 作者还指出在半干旱地区土壤水分是制约复合系统内作物产量的一个重要因素。

农林复合系统内生态因子改变对作物生产力的影响因地域(光照, 降水等情况不同)、树种和林下作物品种选择不同而异。在华北地区光照条件一般, 超过一定程度的遮阴会导致林下作物减产。在南方降水丰富的地区, 农林复合系统内的水分竞争较小, 对作物产量基本没有影响, 而在降水量低的海河低平原区, 农林复合系统内光照和水分竞争是导致作物减产的两个重要原因。

在海河低平原除了需要考虑杨农复合种植模式的经济效益情况, 对杨农复合系统内土壤含水量下降也必须关注。本文仅说明杨农复合系统内 0~40 cm 土壤水分的季节平均值明显低于粮单作系统, 而在作物的各生育时期土壤水分动态、深层次土壤含水量变化与回补等问题还有待深入研究, 对农林复合模式的配套农田水分管理技术也需进一步研究。

4 结论

光竞争是导致黑麦草生物量出现杨农复合模式间显著差异的主要原因, 光竞争和土壤水竞争是导致饲用大豆生物量出现杨农复合模式间显著差异的主要原因, 并且土壤水分竞争对饲用大豆生物量的影响随着杨树林龄增加有增强趋势。虽然提高杨农复合模式的 PAR 和土壤含水量均可以有效提高作物生物量, 但鉴于该地区水资源缺乏, 通过间伐或修枝等措施提高复合模式内的 PAR 是提高作物生物量的可行措施。

References

- [1] Jia Y-B(贾玉彬), Pei B-H(裴保华), Wang D-Y(王德艺), Yuan Y-X(袁玉欣), Wang W-Q(王文全), Zhang Z-J(张振江), Zhao H-M(赵惠民). Light effect in crop-poplar intercropping system. *Chin J Agrometeorol* (中国农业气象), 1998, 19(6): 1-7 (in Chinese)
- [2] Dai X-Q(戴晓琴), Gou X-Q(郭兴强), Li P(李鹏), Shan S-S(单双胜), Xie G-H(谢光辉). Yield performance of winter wheat and summer maize intercropped with young poplar. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 2006, 25(12): 1515-1519 (in Chinese with English abstract)
- [3] Xu C(许翠). Impact of Poplar (Wheat-Corn) Agroforestry to Soil Water Consuming and Its Sustainability in Haihe Low Plain. MS Dissertation of China Agricultural University, 2006 (in Chinese with English abstract)
- [4] Wang Y(王颖), Cui J-Z(崔建州), Yuan Y-X(袁玉欣), Shang H-H(商海华), Yang B-C(杨宝臣). The shading and its effect on crop yield under poplar-crop intercropping system. *Chin J Eco-Agric* (中国生态农业学报), 2003, 11(2): 107-110 (in Chinese with English abstract)
- [5] Li F-D(李芳东), Wang B-P(王保平), Fu D-L(傅大立). Light distribution within the inter-cropping system of paulownia-wheat and its influences on wheat yield. *J Beijing For Univ* (北京林业大学学报), 1998, 20(3): 101-107 (in Chinese with English abstract)
- [6] Lu Q(卢琦), Yang H-X(阳含熙), Ci L-J(慈龙骏), Zhu Z-H(竺肇华), Wu Y-Y(吴运英), Jing Y-S(景元书). Effect of radiation transmission on crop yield and quality. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 1997, 17(1): 36-44 (in Chinese with English abstract)
- [7] Singh G, Mutha S, Bala N. Effect of tree density on productivity of a *Prosopis cineraria* agroforestry system in North Western India. *J Arid Environ*, 2007, 70: 152-163
- [8] Wu G(吴刚), Yang X(杨修). Relation between structure of tree-belt and wheat yield in paulownia-wheat integrated system. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 1998, 18(2): 167-170 (in Chinese with English abstract)
- [9] Moreno G. Response of understorey forage to multiple tree effects in Iberian dehesas. *Agric Ecosyst Environ*, 2008, 123: 239-244
- [10] Yuan Y-X(袁玉欣), Wang Y(王颖), Pei B-H(裴保华). Impact of shadow on growth and yield of wheat under conditions of simulated shadow. *Acta Agric Boreali-Sin* (华北农学报), 1999, 14(suppl): 54-59 (in Chinese)
- [11] Haque M M, Ahmed J U, Hasan M A, Rahman M S. Effect of light intensity on growth and yield of cucumber. *J Agric & Rural Develop* (Gazipur), 2005, 12: 79-83
- [12] Pei B-H(裴保华), Jia Y-B(贾渝彬), Wang W-Q(王文全), Yuan Y-X(袁玉欣), Zhang Z-J(张振江). Analysis on status of beam intensity and soil moisture and their impact on crop. *J Agric Univ Hebei* (河北农业大学学报), 1998, 21(2): 28-33 (in Chinese)
- [13] Zhao Z-B(赵忠宝), Wan F-X(万福绪), Liu Y-L(刘弈琳). Eco-factor changes' impact wheat output in poplar-crop system. *J EMCC* (中国环境管理干部学院学报), 2007, 17(2): 61-62 (in Chinese with English abstract)
- [14] Reynolds P E, Simpson J A, Thevathasan N V, Gordon A M.

- Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada. *Eco Eng*, 2007, 29: 362–371
- [15] Rivest D, Cogliastro A, Vanasse A, Olivier A. Production of soybean associated with different hybrid poplar clones in a tree-based intercropping system in southwestern Québec, Canada. *Agric Ecosyst Environ*, 2009, 131: 51–60
- [16] Liu X-H(刘翼浩). Comment on crop-poplar intercropping system in Huanghuaihai plain. *Crops* (作物杂志), 2005, (6): 1–3 (in Chinese)
- [17] National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2007 (2007 年中国统计年鉴). Beijing: China Statistical Press, 2007 (in Chinese)
- [18] Sui P(隋鹏), Chen F(陈阜), Gao W-S(高旺盛). The technology of high-yield for wheat and corn interplanting in Haihe low plain. *Crops* (作物杂志), 2000, (2): 10–12(in Chinese)
- [19] Liu N-Z(刘乃壮), Xiong Q-X(熊勤学), Zhu Z-H(竺肇华). The feature of solar irradiation in fields with crop-paulownia intercropping and its effects on wheat production. *Acta Meteorol Sin* (气象学报), 1992, 50(2): 469–477 (in Chinese with English abstract)
- [20] Gao G-Z(高国治), Wang M-Z(王明珠), Zhang B(张斌). Competition of the light, fertilizer and water between choerospondias axillaries trees and peanut in the red soil of low hilly land: II. Analysis of using light energy of hoerospondias axillaries trees and peanut. *Chin J Eco-Agric* (中国生态农业学报), 2004, 12(2): 92–94 (in Chinese with English abstract)
- [21] Phillip E R, James A S, Naresh V T, Andrew M G. Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada. *Ecol Eng*, 2007, 29: 362–371