

修枝对复合农林系统内作物光合特性及生长的影响

孙尚伟¹, 夏新莉², 刘晓东¹, 尹伟伦^{1,2,*}, 陈森锬¹

(1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室 北京 100083; 2. 北京林业大学生物与技术学院 北京 100083)

摘要:以论证修枝作为复合农林系统优化措施的可行性为目的,对复合农林系统内的杨树进行 4 种不同强度的修枝处理,分别为 P_1 (修掉树冠高度的 1/6)、 P_2 (修掉树冠高度的 2/6)、 P_3 (修掉树冠高度的 3/6)、 P_4 (修掉树冠高度的 4/6),以 CK (不修枝) 为对照,研究了修枝对复合农林系统内冬小麦、夏玉米的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)、气孔限制值(L_s)等光合生理特性以及农艺性状、产量构成因素的影响。结果表明:(1)修枝能有效增加作物光合速率、蒸腾速率,同一时刻修枝强度越大光合速率、蒸腾速率越大,下午时这种促进作用小于上午与中午。(2)修枝能显著促进小麦、玉米增高、增粗、增重,且越到后期修枝对作物生长的促进作用越明显。另外,修枝对玉米生长的促进作用大于小麦。(3)修枝能使林下作物大幅增产;修枝后玉米主要通过增加穗数,小麦主要通过增加粒重和穗粒数增产;修枝后玉米增产幅度大于小麦,小麦产量表现优于玉米,小麦比玉米更适合复合农林系统。

关键词:复合农林;修枝;小麦;玉米;光合特性

文章编号:1000-0933(2008)07-3185-08 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Effects of different pruning intensity on photosynthetic characters, growth and yield of crops in agroforestry

SUN Shang-Wei¹, XIA Xin-Li², LIU Xiao-Dong¹, YIN Wei-Lun^{1,2,*}, CHEN Sen-Kun¹

1 Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 College of Biological Sciences and Biotechnology of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3185 ~ 3192.

Abstract: The effects of pruning on winter wheat and summer maize were investigated to demonstrate whether pruning could act as an optimization measure for agroforestry system. Contrasted to no pruning (CK), four different pruning intensity P_1 (1/6 height of crown cut down), P_2 (2/6 height of crown cut down), P_3 (3/6 height of crown cut down) and P_4 (4/6 height of crown cut down) were applied to poplar in agroforestry and the agronomic characters, yield components and photosynthetic characters, such as net photosynthetic rate (P_n), transpiration (T_r), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i) and stomatal limitation (L_s) of winter wheat and summer maize were tested. The results showed that net photosynthetic rate and transpiration rate of crops increased after pruning, which was less remarkable in the

基金项目:国家农业科技成果转化资助项目(05EFN217100430);国家“十一五”科技支撑计划课题资助项目(2006BAD03A01);国家林业公益行业科研专项资助项目(4-40)

收稿日期:2007-11-12; **修订日期:**2008-04-11

作者简介:孙尚伟(1982~),男,山西大同人,博士,主要从事栽培生理和人工林培育技术研究. E-mail: sunsh-wei@163.com

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

Foundation item: The project was financially supported by Agricultural Science and Technology Research Program of China (No. 05EFN217100430), National Key Technologies R&D Program of China (Research and Development) (No. 2006BAD03A01) and Forestry Commonweal Science & Technology Project of China (4-40)

Received date: 2007-11-12; **Accepted date:** 2008-04-11

Biography: SUN Shang-Wei, Ph. D., mainly engaged in cultivated physiology and cultivate technology research for planted forest. E-mail: sunsh-wei@163.com

afternoon than in the morning. The height, ground diameter and aboveground biomass of winter wheat and summer maize both increased remarkably, and that of summer maize was higher than that of winter wheat. The yield of crops also increased substantially after pruning, and that of wheat mainly came from thousand grain weight and the number of grain per spike, but that of maize mainly came from spike number. The increased yield of maize was higher than that of wheat, but the total yield was lower than that of wheat. So winter wheat was more suitable for agroforestry system than summer maize.

Key Words: agroforestry; pruning; wheat; maize; photosynthetic characters

我国人口众多,土地资源紧张,建立多种群、多功能、多效益、低投入、高产出的复合农林系统能更加充分利用生态空间、深度挖掘生物资源潜力,提高土地利用效率。但复合农林系统中的作物与林木之间存在光照、生存空间、土壤养分、水分等多方面的相互竞争,其中林木的竞争优势远远大于林下作物^[1~8],尤其林木遮荫会造成林下作物生长不良、产量严重下降^[9,10],需要人工从多方面进行农林系统优化。目前,我国山东、河北、河南等多省种植了大面积杨树林,涌现出许多农林间作模式,但面临着作物种植选择随意性强、3a 以上树龄林下作物严重减产、生产缺乏理论指导等诸多问题。因此,采取一定措施优化复合农林系统对生产指导具有重大意义。对林木进行修枝不仅能增加林下光照,而且有研究表明合理修枝可以提高树干圆满度,促进林木材积生长,利于培育大径级用材^[11]。本研究以论证修枝作为复合农林系统优化措施的可行性为目的,通过对林木进行不同强度的修枝,观测不同修枝强度对林木生长及林下作物产量的影响,意在确定最佳修枝强度,使得农林系统经济效益最大化。本文为阶段性成果,观测了修枝对复合农林系统内玉米、小麦光合特性及生长的影响,探讨了修枝提高林下作物产量这一措施的可行性,并比较分析了修枝对玉米和小麦产量的影响程度,为复合农林系统作物配置提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于山东省德州市齐河县表白寺镇,地处山东省西北部,属于暖温带季风气候。年平均日照时数 2724.8h,年平均日照百分率 61%,年辐射总量 528770J/cm²,年平均气温 12.9℃,7 月份平均气温 26.9℃,1 月份平均气温 -3.4℃,无霜期平均 201d,年平均降水量 522.3mm。土壤为河流冲积沙壤土。

1.2 试验材料与试验设计

试验地林木为欧美杨 107,2002 年秋定植,树行为南北走向,株行距为 2m × 6m,2006 年 4 月进行修枝。共设置 4 个修枝强度,分别为 P₁、P₂、P₃、P₄(P₁为修掉树冠高度的 1/6, P₂为修掉树冠高度的 2/6, P₃为修掉树冠高度的 3/6, P₄为修掉树冠高度的 4/6),以 CK(不修枝)为对照,共修枝 6 行,每行每种修枝强度修枝 10 棵,从南至北依次为 CK、P₁、P₂、P₃、P₄、不同修枝强度之间相隔 3 棵不作处理(图 1)。试验地四周均设保护行。林下间作物为冬小麦、夏玉米,南北种植,试验选取 6 行修枝林木的中间 4 行,每种修枝处理相邻两行林木间的作物为一个小区。试验共设 3 次重复,5 个水平处理共 15 个小区。其中小麦品种为济麦 20,2006 年 10 月 15 日播种,基本苗为 150 株 m⁻²。玉米品种为东单 60,2006 年 6 月 20 日播种,每小区内定苗 540 株。各小区之间肥水管理一致,其中小麦公顷施肥量为尿素

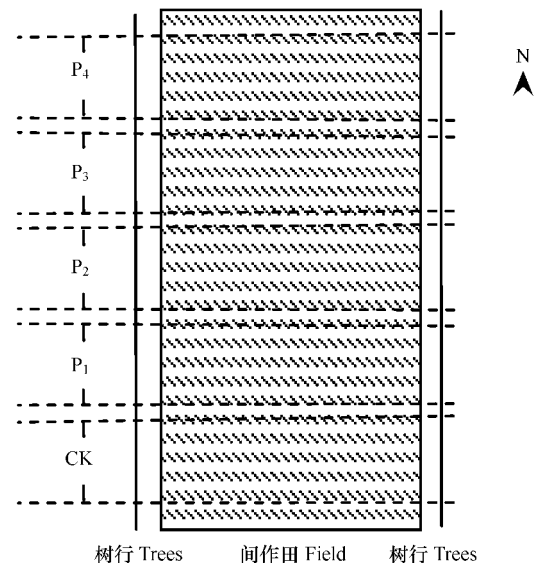


图 1 试验设计图

Fig. 1 Distribution map of experimental design

215kg、五氧化二磷 130kg、氧化钾 100kg;玉米公顷施肥量为尿素 315kg、二铵 112.5kg、硫酸钾 225kg、硫酸锌 15kg。试验地杨树胸径为 (9.87 ± 0.85) cm 树高为 (10.2 ± 0.6) m。

各小区垂直树行设置 3 个测点,分别为东林冠下测点、西林冠下测点、行中测点(东、西林冠以间作田为参照)。其中东、西林冠下测点分别设在东西行的林冠下距林木 1m 处、行中测点在树行的中线上(图 2)。所有测点均设置在小区南北向的中央附近,确保测点不受邻近不同修枝强度小区树木遮荫的影响。每个处理除玉米产量及产量构成因子外,其他指标最后结果均为 3 个测点的平均值。

1.3 测定方法

光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)、大气 CO_2 浓度(C_o)均通过便携式光合测定仪(Licor-6400)在自然状态下测定;计算气孔限制值 L_s ($L_s = 1 - C_i/C_o$)^[12]。小麦在灌浆期选择晴好天气测定 2 次,玉米在拔节期、开花期、成熟期各测定 1 次,每次在 7:00~17:00 间每 2h 对各处理的 3 个测点测定 1 次,小麦测定旗叶,玉米在抽雄前测定植株最上 1 片完全展开叶,抽雄吐丝后测定穗位叶。株高、地径、生物量的测定按照常规方法进行,其中地径指玉米主干与地面接触地方的直径。小麦每测点选取 10 棵长势平均的单茎进行测量,玉米选择 5 株。小麦在各测点选取 $1m^2$ 测定产量及构成因素,玉米则以小区为单位测定产量构成因素,考种按常规方法,各处理实行单打单收单晒测定产量。

2 结果与分析

2.1 修枝对小麦、玉米净光合速率和蒸腾速率日变化的影响

修枝能有效增加林下作物的光合速率和蒸腾速率。由图 3(a)可以看出,各处理小麦的净光合速率日变化均为单峰曲线,峰值均出现在 13:00;在同一时刻,光合速率随着林木修枝强度的增加而增加。从光合速率增加幅度来看,上午和中午修枝增加光合速率的幅度大于下午,表明修枝对小麦生长的促进作用主要集中在上午和中午。由图 3(b)可以看出,各处理玉米的净光合速率日变化规律同小麦相似。与小麦相比,修枝对玉米光合速率的提高幅度更大,这可能因为玉米是 C_4 植物,属于强喜光类型的作物,遮荫对玉米光合速率影响

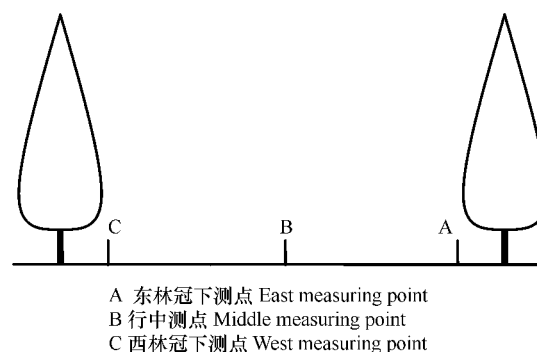


图 2 测点分布图

Fig. 2 Distribution map of measuring point

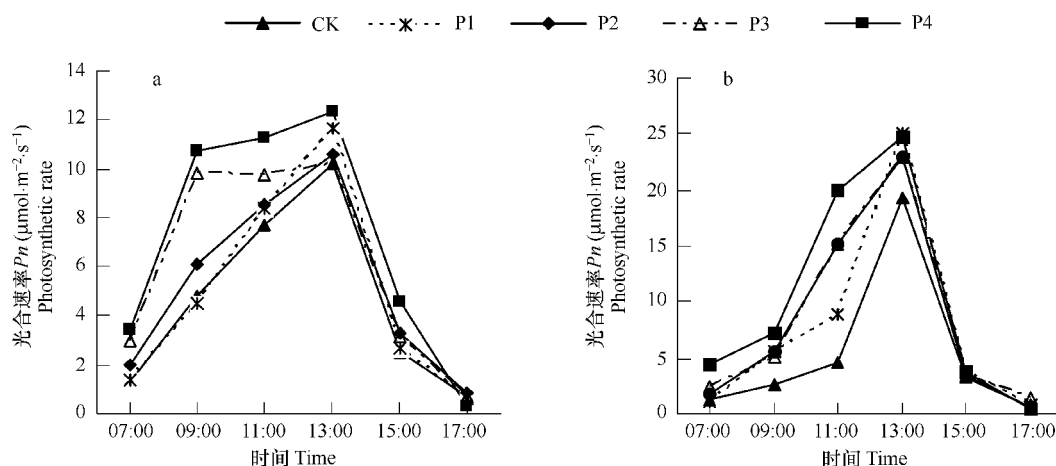


图 3 不同修枝处理冬小麦光合速率(a)及夏玉米光合速率(b)的日变化

Fig. 3 Diurnal variations of photosynthetic rate of winter wheat and summer maize under different pruning intensity

更大,所以修枝相对更容易大幅度增加玉米光合速率。

由图 4 可以看出小麦、玉米的蒸腾速率与光合速率有相似的变化趋势,均为单峰曲线,峰值出现在 13:00,在同一时刻,随着林木修枝强度的增加,林下作物的蒸腾速率显著增加。

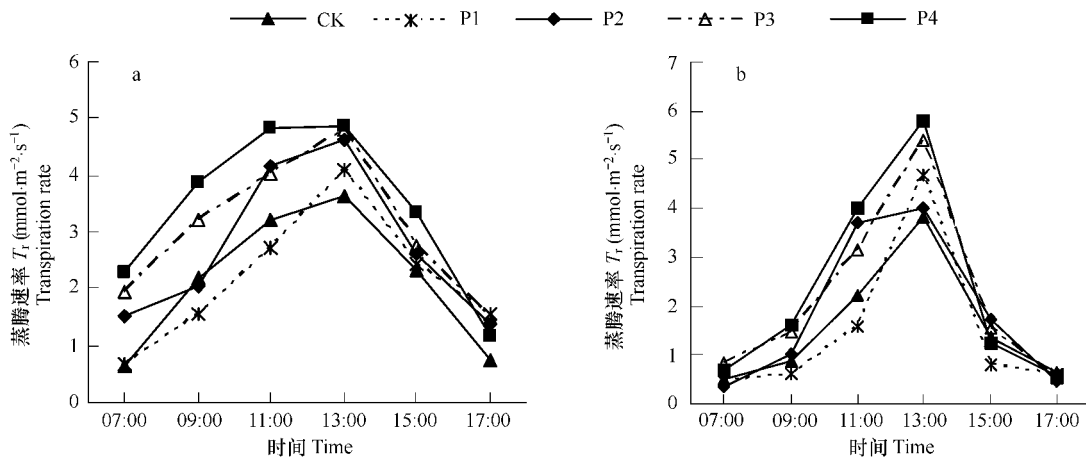


图 4 不同修枝处理冬小麦蒸腾速率(a)及夏玉米蒸腾速率(b)的日变化

Fig. 4 Diurnal variations of transpiration rate of winter wheat and summer maize under different pruning intensity

2.2 修枝对小麦、玉米气孔导度日变化的影响

由图 5(a)可以看出,各处理小麦旗叶气孔导度日变化均为单峰曲线,同一时刻,修枝强度越大,气孔导度越大,说明修枝能增加林下小麦的气孔导度,且这种差异在上午和中午表现最为明显。同一修枝水平,小麦上午的气孔导度大于下午。由图 5(b)可以看出各处理玉米气孔导度日变化也均为峰值为 13:00 时的单峰曲线,与小麦相比,修枝对玉米气孔导度影响较小,但同样表现为上午大于下午。

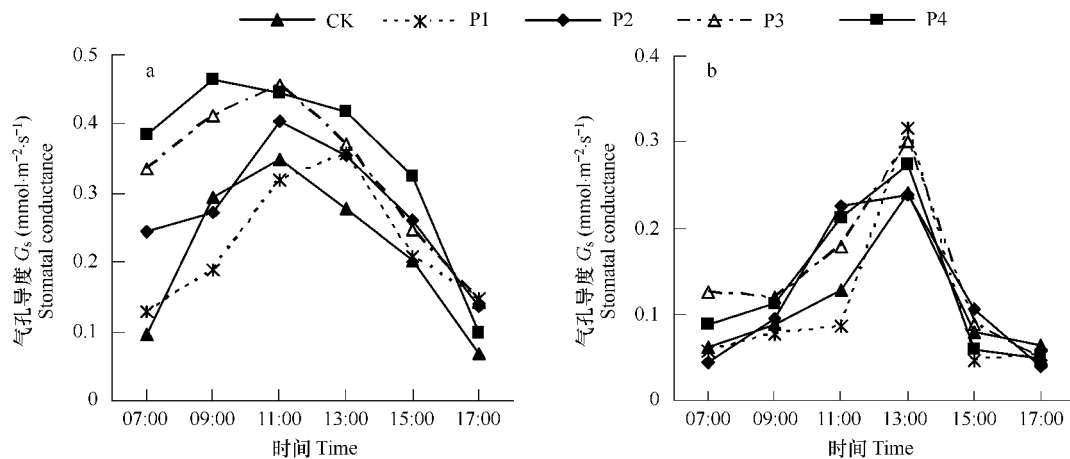


图 5 不同修枝处理冬小麦气孔导度(a)及夏玉米气孔导度(b)的日变化

Fig. 5 Diurnal variations of stomatal conductance of winter wheat and summer maize under different pruning intensity

2.3 修枝对小麦、玉米细胞间隙 CO₂ 浓度、气孔限制值日变化的影响

由图 6(a)可以看出,各处理小麦旗叶的细胞间隙 CO₂ 浓度在 13:00 以前随光合速率的升高而降低,13:00 达到最低值后开始回升,这正是中午强光下光合作用的结果。不同修枝强度下小麦的 C_i 值表现为随修枝强度增加而降低的趋势,进一步说明修枝能提高小麦对 CO₂ 的利用效率。结合图 7(a)综合分析,较高的 C_i 值与较低的 L_i 值表明非气孔因素限制了小麦光合速率的进一步提高。由图 6(b)可以看出,各处理玉米的细胞间 CO₂ 浓度与小麦有着相似的变化规律,且最低值远远低于相应小麦最低值,表明玉米对 CO₂ 的高利用效

率。与小麦相比,修枝降低玉米 C_i 值的幅度更大,说明修枝更容易增加玉米对 CO_2 的利用效率,这与修枝更容易大幅度增加玉米光合速率的规律相一致。结合图 7(b) 分析,中午修枝降低玉米 C_i 值的同时 L_s 值随之升高,表明中午接受光线直射时,限制玉米光合速率提高的因素可能由非气孔因素向气孔因素转变。

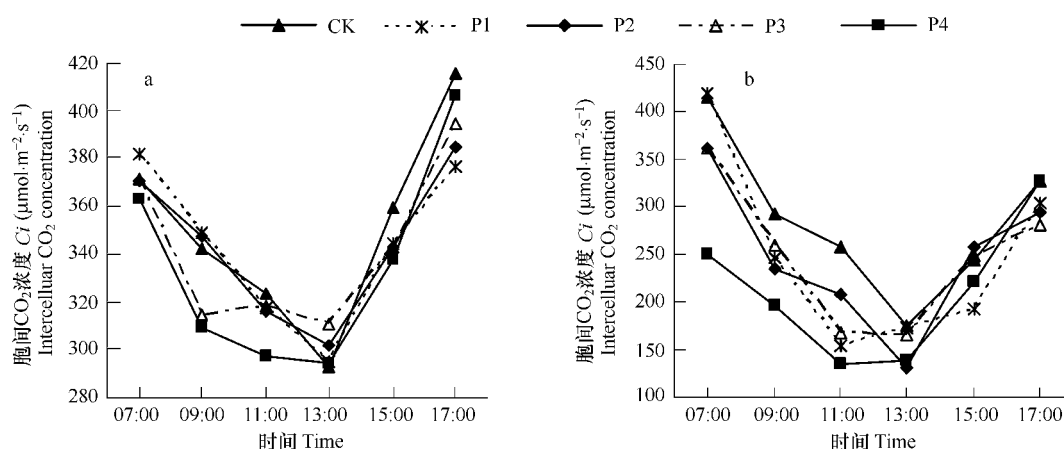


图 6 不同修枝处理冬小麦细胞间隙 CO_2 浓度(a)及夏玉米细胞间隙 CO_2 浓度(b)的日变化

Fig. 6 Diurnal variations of intercellular CO_2 concentration of winter wheat (a) and summer maize (b) under different pruning intensity

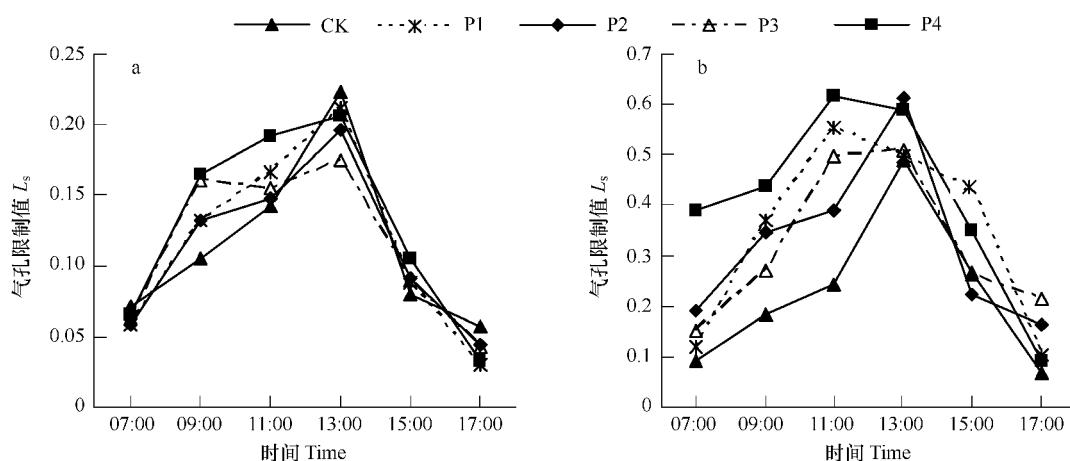


图 7 不同修枝处理冬小麦气孔限制值(a)及夏玉米气孔限制值(b)的日变化

Fig. 7 Diurnal variations of L_s of winter wheat (a) and summer maize (b) under different pruning intensity

2.4 修枝对小麦、玉米株高、地径、干物质积累的影响

由表 1 可以看出,灌浆期小麦的株高、茎叶干重、穗重及拔节、开花期玉米的株高、茎叶干重、地径均表现为 $P_4 > P_3 > P_2 > P_1 > CK$,且多数处理间差异显著,表明修枝能显著促进林下作物生长。差异显著性分析表明生育后期各处理间的差异大于生育前期,说明修枝对作物生长的促进作用越到后期越明显。拔节期小麦各处理间株高、干重无明显差异,表明修枝对拔节期的小麦生长促进作用不大。与不修枝相比,修枝后灌浆期小麦的株高、茎叶干重、穗重分别增加了 0.70% ~ 9.34%、5.99% ~ 67.07%、14.70% ~ 101.82%,表明与高生长相比,修枝更容易增加小麦干物质积累,且麦穗干重的增加值大于茎叶干重的增加值。相对小麦,修枝对玉米生长的促进作用更大,修枝后玉米株高、茎叶干重、地径分别增加了 3.57% ~ 64.50%、21.00% ~ 242.01%、6.17% ~ 50.62%,可以看出修枝后林下玉米增重幅度大于增高、增粗幅度。另外,不同生育期修枝对玉米株高、地径的影响程度也各不相同。在拔节期,与增高相比修枝更容易使玉米增粗,这对玉米抗倒伏有重要的意义,而在抽丝、开花期,与增粗相比,修枝更容易使玉米增高。

表1 修枝对冬小麦、夏玉米农艺性状的影响

Table 1 Effects of different pruning intensity on agronomic characters of winter wheat and summer maize

物候期 Phenophase	修枝强度 Pruning intensity	冬小麦 Winter wheat			夏玉米 Summer maize		
		株高 (cm) Height	茎叶干重(g) /单茎 Aboveground biomass	10 穗重 (g) 10 spike weight	株高 (cm) Height	茎叶干重(g) Aboveground biomass	地径 (cm) Ground diameter
拔节期 Jointing stage	CK	41.7 a	0.50 ab	—	81.6 aA	5.10 aA	0.61 aA
	P1	41.0 a	0.57 ab	—	86.1 bB	5.23 abA	0.67 bAB
	P2	41.3 a	0.48 a	—	87.3 bB	6.52 bA	0.70 bB
	P3	41.5 a	0.59 b	—	96.0 cC	11.50 cB	0.79 cC
	P4	43.1 b	0.49 a	—	97.7 cC	14.19 dC	0.85 dD
小麦灌浆期 Grain filling of wheat	CK	71.7 a	1.67 a	6.60 a	129.0 aA	11.95 aA	0.81 aA
	P1	72.2 a	1.77 ab	7.57 ab	133.6 bA	14.46 aA	0.86 bA
玉米开花期 Anthesis of maize	P2	74.3 ab	2.22 ab	10.40 bc	153.6 cB	25.20 bB	0.95 cB
	P3	75.8 bc	2.34 b	10.80 cd	192.1 dC	33.54 cC	1.10 dC
	P4	78.4 c	2.79 b	13.32 d	212.2 eD	40.87 dC	1.22 eD

表中小写、大写字母分别表示 0.05 和 0.01 的显著水平 The small and capital letters indicate significant at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively

2.5 修枝对小麦、玉米产量及其构成因子的影响

修枝能有效增加林下作物的产量。由表 2 可以看出,冬小麦、夏玉米的产量均为 $P_4 > P_3 > P_2 > P_1 > CK$,其中小麦增产 10.75% ~ 171.00%,玉米增产 46% ~ 399%,说明修枝对玉米的增产幅度大于小麦。分析产量构成因子可以看出,各产量因子均为 $P_4 > P_3 > P_2 > P_1 > CK$,表明修枝使作物增产是各产量因子增加的综合结果。修枝后作物各产量因子虽然都有所增加,但增加的程度不同。与不修枝相比,小麦的穗数、穗粒数、千粒重分别增加了 5.34% ~ 29.95%、5.86% ~ 36.49%、8.63% ~ 59.93%,玉米的穗数、单穗粒重、千粒重分别增加了 45.72% ~ 314.31%、0.12% ~ 23.79%、8.5% ~ 27.51%,表明修枝主要通过增加粒重、穗粒数增加小麦产量,通过增加穗数增加玉米产量。

表2 修枝对冬小麦、夏玉米产量及其构成因子的影响

Table 2 Effects of different pruning intensity on yield and yield component of winter wheat and summer maize

修枝强度 Pruning intensity	冬小麦 Winter wheat			
	穗数 ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$) Spike number	穗粒数 Kernel per spike	千粒重 (g) 1000-kernel weight	产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Yield
CK	187.3	22.2	23.76	898.6
P1	197.3	23.5	25.81	995.2
P2	203.0	24.2	28.52	1594.0
P3	228.5	30.3	34.43	2025.9
P4	243.4	28.1	38.00	2435.2
修枝强度 Pruning intensity	夏玉米 Summer maize			
	穗数 ($\times 10^2 \cdot \text{hm}^{-2}$) Spike number	单穗粒重 (g) Seed weight per spike	千粒重 (g) 1000-kernel weight	产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Yield
CK	58.36	32.49	216.25	189.6
P1	85.04	32.53	234.62	276.6
P2	98.38	38.54	236.47	379.1
P3	156.75	39.10	257.19	630.4
P4	241.79	40.22	275.75	945.4

3 结论与讨论

修枝主要是通过增加林下光照提高作物光合速率促进作物生长的,且这种促进作用主要表现在上午与中

午,这可能与下午作物缺水导致气孔导度减小有关(图3)。张劲松等通过对苹果-小麦复合系统研究发现,果树所消耗的土壤水分至少有50%以上来自作物区内^[13],可见林木与作物对水分竞争的激烈程度。另外,与小麦相比,修枝对玉米光合速率的提高幅度更大、增高增粗增重的幅度更大,这都表明修枝对玉米生长的促进作用更大。但这并非意味着玉米比小麦更适合农林间作。试验表明,即使修枝后玉米的增产幅度远大于小麦,与单作田相比,间作田玉米的减产幅度仍大于小麦,说明农林间作对玉米等强喜光作物影响更大,证实了C₃作物(冬小麦)较C₄作物(夏玉米)更适合农林复合系统^[14]。

复合农林系统中,间作作物的产量与林木种植的密度及生长的时间呈负相关^[15,16]。幼龄林与个别作物间作会增加作物产量^[14,17],多数报道表明农林间作会造成作物的减产甚至绝收。作物减产的原因主要分为地上遮荫和地下根系竞争两方面,而遮荫似乎更容易对作物造成减产^[6,7]。本研究表明修枝能使林下作物大幅提高产量,修枝程度越大,作物增产程度越大。

产量构成因子表明修枝后玉米与小麦的增产方式不同,修枝后玉米主要通过增加穗数增产,小麦则主要通过增加粒重、穗粒数增产。这是由于修枝能有效延缓弱光胁迫对玉米生育进程的推迟作用、缩短抽雄吐丝的日期间隔,从而降低空秆率增加单位面积的穗数;与玉米不同,修枝能增加小麦开花期和灌浆期截获的光量,从而增加穗粒数和粒重。有研究表明弱光胁迫会推迟玉米的生育进程,加大抽雄吐丝的日期间隔,导致雌雄穗花期不遇,造成减产^[18];单位面积小麦穗粒数和千粒重分别与开花期和灌浆期小麦截获的光量成正比^[3]。本研究表明修枝后穗数并没有显著增加,说明小麦穗数可能受林木根系竞争影响更大,所以应加强小麦分蘖期的水肥管理,促进小麦分蘖成穗增加产量。

从作物增产角度看,修枝作为优化复合农林系统的一种措施是可行的。为了保持农林复合系统的高效稳定,要充分考虑植物配置、种植密度以及包括修枝在内的抚育管理等因素。但目前对植物选择、种植的空间分布格局等缺乏系统、定量的研究,今后应当着重从这些方面做深入的研究,这样才能充分发挥复合农林系统的生态效益、经济效益与社会效益。

References:

- [1] Zhao X Z, Lu J B. Research progress in agroforestry systems. Chinese Journal of Ecology, 2004,23(2):127-132.
- [2] Yuan Y X, Pei B H, Wang J L, et al. A review to interaction between tree and crop in agroforestry system. World Forestry Research, 1999,12(6):13-17.
- [3] Li F D, Wang B P, Fu D L. Light distribution within the inter-cropping system of *Paulownia*-wheat and its influences on wheat yield. Journal of Beijing Forestry University, 1998,20(3):101-107.
- [4] Zhai J S, Wang M Z, Zhang B, et al. competition of water, fertilizer and light between *Choerospondias axillaries* trees and peanut in the low hilly land of red. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006,14(2):82-84.
- [5] Hang Y Q, Tu G X, Li F L. Study on root distribution and fractional structure of agroforestry systems in three gorges reservoir region, Forestry Science &Technology of Hubei,2006,(4):1-4.
- [6] Willey R W, Reddy M S. A field technique for separating above and below-ground interactions in intercropping:an experiment with pearl millet/groundnut. Exper. Agric,1981,17:257-264.
- [7] Zhao Y, Zhang B, Wang M Z. Assessment of competition for water, fertilizer and light between components in the alley cropping system. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(6):1792-1801.
- [8] Li F D, Fu D L, Wang B P. A study of the spectral variations of solar radiation inside and outside the inter-crop system of *Paulownia* trees and wheat crop. Acta Ecologica Sinica, 2000,20(1):109-117.
- [9] Wang X X, Zhang B, Wang M Z. Competition for light and crop productivity in agro-forestral systems in hilly red soil region. Chinese Journal of Ecology, 2002,21(4):1-5.
- [10] Pei B H, Yuan Y X, Wang Y. The effect of simulation tree shading to wheat growth and output. Journal of Agricultural University of Hebei,1998,21(1):1-5.
- [11] Shao J F, Wei B S. Techniques of Thinning and Pruning in Plantations of *Pinus ellottii*. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2005,29(5):69-72.

- [12] Peng Z P, Li C L, Men M X. Effects of P deficiency on photosynthetic characters and yield in two wheat cultivars with different spike types. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(8): 739—744.
- [13] Zhang J S, Meng P. Simulation on water ecological characteristics of agroforestry in the hilly area of Taihang Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1172—1177.
- [14] Dai X Q, Guo X Q, Li P, *et al.* Yield performance of winter wheat and summer maize intercropped with young poplar. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(12): 1515—1519.
- [15] Huang W. Influence of different *taxodium ascendens* stands on the open ranges and system performance in Jiangsu Province, China. *Agroforestry Systems*, 1997, 37(3): 241—252.
- [16] Yin R, He Q. The spatial and temporal effects of *Paulownia* intercropping: the case of northern China. *Agroforestry Systems*, 1997, 31(1): 91—109.
- [17] Yuan Y X, Pei B H, Wang W Q, *et al.* The influence of intercropping of poplar with crops on crop yielding. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 1996, 19(2): 24—30.
- [18] Li C H, Luan L M, Yin F. Effects of light stress at different stages on the growth and yield of different maize genotypes (*Zea mays* L.). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 824—830.

参考文献:

- [1] 赵兴征, 卢剑波. 农林系统研究进展. *生态学杂志*, 2004, 23(2): 127~132.
- [2] 袁玉欣, 裴保华, 王九龄, 等. 国外混农林系统中林木与农作物的相互关系研究进展. *世界林业研究*, 1999, 12(6): 13~17.
- [3] 李芳东, 王保平, 傅大立. 桐麦间作系统内光量分布及其对小麦产量的影响. *北京林业大学学报*, 1998, 20(3): 101~107.
- [4] 翟进升, 王明珠, 张斌, 等. 低丘红壤南酸枣与花生复合系统种间水肥光竞争的研究. *中国生态农业报*, 2006, 14(2): 82~84.
- [5] 黄闰泉, 涂光新, 李凤莲. 三峡库区农林复合系统根系分布及分形研究. *湖北林业科技*, 2006, (4): 1~4.
- [7] 赵英, 张斌, 王明珠. 农林复合系统中物种间水肥光竞争机理分析与评价. *生态学报*, 2006, 26(6): 1792~1801.
- [8] 李芳东, 傅大立, 王保平. 桐麦间作系统辐射光谱成分变化规律的研究. *生态学报*, 2000, 20(1): 109~117.
- [9] 王兴祥, 张斌, 王明珠, 等. 低丘红壤复合农林系统光能竞争与生产力. *生态学杂志*, 2002, 21(4): 1~5.
- [10] 裴保华, 袁玉欣, 王颖. 模拟林木遮光对小麦生育和产量的影响. *河北农业大学学报*, 1998, 21(1): 1~5.
- [11] 邵锦锋, 魏柏松. 湿地松林抚育间伐与修枝技术. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2005, 29(5): 69~72.
- [12] 彭正萍, 李春俭, 门明新. 缺磷对不同穗型小麦光合生理特性和产量的影响. *作物学报*, 2004, 30(8): 739~744.
- [13] 张劲松, 孟平. 农林复合系统水分生态特征的模拟研究. *生态学报*, 2004, 24(6): 1172~1177.
- [14] 戴晓琴, 郭兴强, 李鹏, 等. 平原农区幼龄杨树间作农作物的产量表现. *生态学杂志*, 2006, 25(12): 1515~1519.
- [17] 袁玉欣, 裴保华, 王文全, 等. 杨粮间作条件下的作物产量与生物量. *河北农业大学学报*, 1996, 19(2): 24~30.
- [18] 李潮海, 栾丽敏, 尹飞, 等. 弱光胁迫对不同基因型玉米生长发育和产量的影响. *生态学报*, 2005, 25(4): 824~830.