杨农间作光能利用的研究*

裴保华 袁玉欣 贾玉彬 王文全
(河北农业大学 保定 071000)

Josef Eitzinger
(Universität für Bodencultur Wien Insititut für Meteorologie und Phisik AUSTRIA)

摘 要: 根据实测光强,利用作物和树木光——光合曲线中的最大光合速率和表观量子效率以及各物候期的叶面积系数,叶幕消光系数等参数,估算了杨农间作与单一农作物(对照)的光能利用率。结果表明,三种杨农间作模式的总光能利用率都高于对照,约可提高 27.56 % ~ 48.64 %。间作田农作物的日累积光合量随日累积光量减少而降低,呈线性正相关。当相对光强 > 60 %时,间作田农作物的光能利用率稍高于对照田农作物;相对光强 < 50 %时,间作田农作物的光能利用率与对照田相似,这是因为弱光下,农作物呼吸并未减弱引起的。日累积光合量和农作物产量测定表明,间作田农作物的加权平均产量与对照田产量的比率与两者日累积光合量的比率相近,证明估算方法是可行的。

关键词: 农林复合系统,杨农间作,群体光合速率,群体光能利用率

A STUDY ON LIGHT UTILIZATION OF POPLAR-CROP INTERCROPPING SYSTEM

Pei Baohua Yuan Yuxin Jia Yubin Wang Wenquan
(*Hebei Agricultural University Baoding* 071000)

Josef Eitzinger
(*Universität für Bodencultur Wien Insititut für Meteorologie und Phisik AUSTRIA*)

Abstract: The light utilization coefficents (LUC) of poplar-crop intercropping system and pure crops (CK) were both simulated by measuring the actual parameters of crop or poplar, i.e. light intensity, maximum photosynthetic rate (PR) and quantum efficiency, leaf area index in different phenophases and light extinction coefficient of leaf curtains. The results demonstrated that, in intercropping system, the crop photosynthesis cuulating decreased with the daily light cumulating decreasing, which they were linear positive correlation. The crop PR in intercropping system was slightly higher than that in pure crop system when its relative light intensity (RLI) was more than 60 %, but they were similar when RLI was less than 50 %, bucause its respiration did not decrease under weak light intensity. The total LUC of three intercropping systems were higher than that of pure crop system by 27.56 % ~ 48.64 %. It showed that the ratio of weighted average yield of intercropping system and pure crop system was similar to their ratio of daily photosynthesis cumulating, which prove that the simulation method is practicable.

Key words: Agroforestry, Poplar-crop intercropping system, Population photosynthetic rate, Population light utilized coefficient

近年来我国利用世界银行贷款在黄淮海平原农区营造了大面积以林粮间作为主要模式的速生丰产林,据统计仅河北省在第 1、2 期项目中,已造林约 7×10^4 hm^2。这些林分多分布在沙荒地,风沙危害

收稿日期:1998-10-05。
基金项目:河北省首届自然科学基金资助项目(393033)。
* 林学本科 93 级许春合,梁 宏同学参加了观测、测定和部分统计工作,谨此致谢。

的次耕地,少数分布在重粘质土或轻盐渍土上。黄淮海平原长期受旱、涝、风沙、盐碱等不利自然因素危害,农业产量低而不稳。实行农林复合经营,是控制风沙,改善环境,充分利用自然资源的有效措施。

杨农间作,杨树处于立体种植的上层,它对农作物的遮荫,是农作物减产的重要原因之一。研究间作田作物冠层表面光强变化,及其与农作物光能利用率和产量的关系,是调节杨农间作结构,延长间作年限,减轻负效应,充分发挥立体种植优越性的重要依据。为此,研究了密植幼林杨农间作田的光能分布,作物和林木的日累积光合量和光能利用率;比较分析了间作与对照的总光能利用率和农作物产量。

1 研究方法

1.1 杨农间作田林木生长情况

试验地位于保定市郊区,供试树种为白杨派双杂交优良无性系 741 杨{[(*Populus alba* × *P. Davidiana*) + *P. simonii*] × *P. tomentosa*},林龄 3 ~ 4 年,南北行向,株行距 0.5 m × 5 m。这种密度只适用于杨树幼龄期的林粮间作。林木生长状况见表 1。

表 1 杨农间作试验林生长状况 (1993 年春定植)

Tab.1 Poplar growth in intercropping system (Planted in 1993)

调查时间 Investigated time	平均树高 Ave. *H* (m)	平均胸径 Ave. *DBH* (cm)	枝下高 Ave. *BH* (m)	东西冠幅 E-W CW (m)
1994-11	4.32 ±0.28	2.42 ±0.24	1.92	-
1995-11	5.13 ±0.63	3.79 ±0.40	2.11	3.20
1996-11	6.60 ±0.51	6.03 ±0.57	2.29	-

1.2 间作田内外光强的测定

1995 年 6 月 20 日用 LCA-3 光合测定系统测定间作田内外的光强(PAR)和光合速率;7 月 20 日、8 月 10 日和 1996 年 4 月 14 日、5 月 14 日和 6 月 2 日,用 ST-80C 数字式棒状照度计测定间作田内外的光强。间作田光强的测点分别设在树行以东和树行以西的两个林冠下(各距树行 80 cm),另一个点设在两树行的中央。测光传感器水平置于作物冠层表面以上 10 cm。对照田的测定与前者同步进行。全天从 6 ~ 18 时每隔 2 小时测定 1 次,每个测点每次重复测定 3 次。

1.3 作物物候期、叶面积和产量测定

作物出苗后选出 20 株进行物候观测,每日或隔日观测 1 次。出苗后每 15 天从田间挖取作物 10 ~ 20 株,洗净,分器官烘干,计算各时期不同器官的干重。叶面积测定是用打孔器切取叶圆片,烘干称重,测出比叶面积(cm^2/mg),再按叶干重计算植株的叶面积。作物成熟时按行收割,分别统计距林木不同距离的作物产量和生物量。

1.4 光-光合速率曲线的测定和拟合

在一定的物候期,分别从田间选取生长正常的小麦、大豆和玉米植株,在室内用 FQ-WCO$_2$ 分析仪,外接 056 型计录仪(HITACH),用开放气路落差法,测定 3 种作物功能叶在不同光强下的光合速率。用两支 500 W 的碘钨灯和调压变压器调节光强。所获数据用模型(1)拟合光 - 光合速率曲线(胡新生,1997;Bassman,1991)。利用模型(1)获得的大量光合速率和表观量子效率($\alpha = C_0 \times a$),结合实测光强、叶面积系数等参数,计算群体光合速率(王天铎,1987;门司正三,1980;龚垒 1989)。

$$P = P_{max}[1 - C_0 e^{-(aI/P_{max})}] \quad (1)$$

P 为光合速率($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$);P_{max}为最大光合速率($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$);C_0 为待定参数;a 为特定参数;I 为光照强度($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$)。

1.5 群体日累积净光合量和光能利用率的估算

1.5.1 群体各叶层表面光强的计算 根据各物候期测得的间作田各点冠层表面光强、作物(或林木)的叶面积系数、群体叶幕消光系数等参数,利用模型(2)计算出各叶层表面的光强(王天铎,1987;门司正三,1980;龚垒,1989)。

$$I = I_0 e^{-KF} \quad (2)$$

I 为群体某叶层下部的光强($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$);I_0 为群体某叶层表面的光强($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$);K 为群体消光系数;F 为群体叶面积系数。

1.5.2　群体各叶层光合速率的计算　根据各叶层表面的光强,作物的最大光合速率(P_{max})和表观量子效率(α),利用模型(3)计算群体各叶层的光合速率($\mu mol\ m^{-2}S^{-1}$),将其减去叶呼吸消耗,获得各叶层的净光合速率(4)。各叶层的净光合速率累加即为群体的净光合速率。参考有关文献(王天铎,1987;门司正三,1980;龚垒,1989;王永锐,1991),玉米、小麦的消光系数(K)分别为 0.50 和 0.60,大豆为 0.70,741 杨为 0.60。

$$P = P_{max} \times \alpha I/(P_{max} + \alpha I) \tag{3}$$

P 为某叶层的光合速率($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$);P_{max}为叶片的最大光合速率($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$);J 为群体某叶层表面的光强($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$);α 为作物或林木的表观量子效率。

$$P_n = P - R \tag{4}$$

P_n 为叶层的净光合速率($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$);R 为叶层的呼吸速率($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$)。

1.5.3　群体叶幕日累积光量和日累积净光合量的计算　根据颜景义提出的小麦日累积光合量估算方法(颜景义,1996),将其进行适当改进,提出计算群体日累积光量和日累积净光合量的模型(5);利用各时刻测得的光强和算得的群体净光合速率,分别计算单位面积土地日累积光量和日累积净光合量。

$$P_n(D) = 0.5\left|\sum_{i=1}^{n}(p_i + p_{i+1})t_i\right| + 0.5(ap_1 + bp_n) \tag{5}$$

$Pn(D)$为日累积净光合量($mol\ m^{-2}$);P_i 为第 i 次实测叶幕净光合速率($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$);P_{i+1}为第 $i+1$ 次实测叶幕净光合速率($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$);t_i 为第 i 次到第 $i+1$ 次观测的时间间隔(s);n 为观测次数;a 为从日出到 P_1 次测定的时间间隔(s);b 为从 P_n 次观测到日落的时间间隔(s)。

2　结果与分析

2.1　作物的物候期和叶面积系数

表 2 列举了不同作物的物候期和叶面积系数(LAI)的统计结果。可以看出,对照田作物的 LAI 一般都高于间作田,其叶片衰老较慢。

2.2　间作物光-光合速率反应模型的拟合

表 3 列举了不同作物光-光合速率反应模型的各项参数,其中的 $\alpha = C_0\ a$ 为表观量子效率,LCP 为光补偿点,LSP 为光饱和点。从模型看出,随生育期的进展最大净光合速率有逐渐提高的趋势。

2.3　群体光能利用率估算

2.3.1　群体叶幕光合速率的计算　根据各物侯期间作田和对照田光强(I)日变化,作物或林木的叶面积系数(F)、消光系数(K)、表 3 提供的 P_{max} 和表观量子效率(α),利用模型(3)、(4)计算出群体各时刻某叶层的净光合速率(P_n)。将其相加,获群体叶幕光合速率。3 个时期的计算结果列入表 4、5。

大豆和玉米间作田因受光强度过低和呼吸消耗的影响,叶幕净光合速率在早晚有时出现负值;小麦受光强度较高,没有出现这种现象。

2.3.2　群体日累积光量和叶幕日累积净光合量　根据 1995~1996 两年 6 个周日测定的光强日变化,利用模型(5)计算出各测定日田间不同部位日累积光量和叶幕日累积净光含量,结果列入表 6。日累积光量可划分为 6 月 20 日以前和以后两个阶段。可见,在同一间作田内,夏熟作物受林木的遮荫作用较轻;如从 4 月 14 日到 6 月 20 日,间作田日累积光量平均为对照田的 63.95%~67.05%。秋熟作物受林木的遮荫作用较重,如 7 月 20 日和 8 月 10 日间作田日累积光量平均为对照田的 50.96%,这是秋熟作物减产率高的重要原因。杨农间作田全年各季的遮荫程度不同,主要是受林木叶面积生长的影响。例如,春季 741 杨只有春梢生长,LAI 为 2.0~2.5,夏秋季随着二次生长,LAI 增加到 3.9,从而引起遮荫程度增加。

将两个林冠下的权重分别定为 0.25,行中的权重定为 0.50,算得间作田小麦日平均累积光量为对

表 2 不同作物的物候期和叶面积系数①

Tab.2 Phenophase and leaf area indexs of different crops

测定日期 Investigated date (month-date)	作物 Crop	物候期 Phenophase	对照田 CK	东林冠下 UEC	LAI 行中 AMR	西林冠下 UWC
04-14	小麦 *Tritium aestivum*	拔节期 S.s.	2.34	1.96	1.96	2.05
05-17	小麦 *T.a.*	灌浆期 F.s.	4.08	5.19	5.08	3.61
06-02	小麦 *T.a.*	乳熟期 M.s.	2.36	1.86	1.63	1.17
06-20	大豆 *Glycine hispida*	始荚期 E.p.s.	0.77	0.51	0.77	0.50
07-20	大豆 *G.h.*	始粒期 E.s.s.	7.10	3.74	7.11	5.34
08-10	大豆 *G.h.*	满粒期 F.s.s.	6.90	6.90	6.90	7.10
06-20	玉米 *Zea mays*	大喇叭口期 B.m.s.	0.51	0.41	0.51	0.29
07-20	玉米 *Z.m.*	开雄花期 M.s.	4.50	3.37	4.46	3.00
08-10	玉米 *Z.m.*	花丝干期 D.f.s.	5.00	4.25	4.96	4.17
04-20	741 杨 *Populus*	展叶期 L.e.s.	2.0			
05-20	741 杨 *Populus*	春梢停长期 S.s.s.	2.5			
08-10	741 杨 *Populus*	二次生长期 S.g.s.	3.9			

① CK: Control land(pure crop), UEC: Under tree east crown, ARM: At middle of tree rows, UWC: Under tree west crown, *Populus*:{[(*Populus alba* × *P. Davidiana*) + *P. simonii*] × *P. tomentosa*}, S.s.: Shooting stage, F.s.: filling stage, M.s.: Milk stage; E.p.: Early podstage, E.s.s.: Early shot stage, F.s.: Filed stage; B.m.s.: Bell mouth stage, M.s.: Male stage, D.f.s.: Dried filment stage; L.x.s.: Leaf expension stage, S.s.: Stop stage of spring shooting, S.g.s.: second growing stage.

表 3 不同作物功能叶光-光合速率模型的各项参数

Tab.3 Parameters of normal leaf light-photosynthetic rate models of different crops

测定日期 Inveatigated date (month-date)	作物 Crop	模型 Models	相关指数 R	量子效率 α	补偿点 LCP	饱和点 LSP
05-17	小麦 *T.aestivum*	$P=15.19(1-1.0476e^{-0.00516I})$	-0.9651	0.07920	9.0	817
07-11	大豆 *G.hispida*	$P=9.40(1-1.0309e^{-0.00454I})$	-0.9901	0.03885	6.7	808
07-25	大豆 *G.hispida*	$P=10.86(1-1.0533e^{-0.00493I})$	-0.9865	0.05156	10.5	815
08-10	大豆 *G.hispida*	$P=14.86(1-1.0692e^{-0.00534I})$	-0.9977	0.08005	12.5	718
07-11	玉米 *Z.mays*	$P=22.68(1-1.0910e^{-0.00316I})$	-0.9929	0.07602	27.6	1150
07-25	玉米 *Z.mays*	$P=26.72(1-1.0556e^{-0.00320I})$	-0.9864	0.08475	16.9	1077
08-10	玉米 *Z.mays*	$P=26.86(1-1.0412e^{-0.00263I})$	-0.9998	0.06988	15.3	1121
08-10	741 杨 *Populus*	$P=10.51(1-1.0012e^{-0.00431I})$	-0.9988	0.04276	0.3	920

表 4 小麦、大豆和玉米群体叶幕净光合速率(μmol $m^{-2}s^{-1}$)①

Tab.4 Leaf curtain net photosynthetic rates of wheat, soybeen and maize populations

作物 Crops	测定时刻 Investigated time	对照田 CK			东林冠下 UEC			行中 AMR			西林冠下 UWC		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
小麦 *T.aestivum*	6:00	11.6	11.4	29.2	8.1	7.2	10.9	8.0	7.2	7.3	7.4	7.2	6.6
	8:00	42.9	46.5	53.8	26.4	28.2	48.8	28.9	30.0	24.2	29.6	31.8	11.9
	10:00	50.8	56.3	57.7	47.7	56.4	51.9	34.6	38.4	51.9	35.8	39.2	34.0
	12:00	54.9	61.6	57.1	50.4	60.6	16.8	51.1	61.7	51.9	51.5	59.6	42.2
	14:00	51.5	57.1	50.1	32.5	34.9	36.6	48.4	57.5	24.9	48.9	55.9	35.4
	16:00	45.0	49.0	38.1	28.0	30.1	26.5	25.1	26.7	17.4	37.4	41.4	27.5
	18:00	18.1	18.4	9.7	8.9	8.1	6.4	10.3	9.7	6.2	11.5	11.5	7.3
大豆 *G.hispida*	6:30	6.3	-1.2	0.1	2.0	-1.3	-2.9	1.3	-3.4	-1.8	1.1	-2.1	-2.0
	8:30	10.7	19.1	22.0	8.4	8.9	6.1	5.5	7.1	12.8	2.4	17.7	12.6
	10:30	11.3	24.7	34.7	8.8	5.9	12.9	11.1	10.0	24.2	7.4	23.9	27.3
	12:30	11.1	27.6	37.6	3.2	18.7	22.3	11.1	27.3	29.9	8.7	17.7	23.5
	14:30	10.1	25.9	34.9	6.7	10.4	27.8	5.6	21.2	23.8	7.5	7.9	12.8
	16:30	8.1	20.1	23.8	5.0	17.1	15.8	3.8	7.5	13.3	5.9	3.7	6.9
	18:30	1.9	7.3	5.4	1.0	3.1	-5.0	1.0	-0.9	-5.2	1.3	-0.3	-5.5

续表 4

玉　米 *Z. mays*	6:00	22.3	5.6	1.1	8.3	-0.3	-2.1	5.9	0.2	-1.6	5.1	1.9	-0.6
	8:00	38.7	63.8	38.1	35.5	26.5	10.8	19.3	28.1	21.0	9.2	55.1	21.6
	10:00	40.8	81.4	64.2	37.4	18.1	22.0	40.2	36.3	42.5	27.3	73.1	53.2
	12:00	40.5	92.6	70.7	12.7	56.1	39.9	40.2	89.6	54.1	33.9	55.1	42.1
	14:00	36.7	85.3	64.7	27.4	30.8	50.2	19.9	70.2	41.6	28.5	27.4	22.0
	16:00	28.6	67.0	41.7	20.0	51.0	27.2	13.9	29.1	21.9	21.9	16.4	12.1
	18:00	7.7	28.6	8.8	5.0	10.7	-4.7	5.0	6.6	-5.9	5.6	6.1	-5.2

①1、2、3 分别为小麦 4 月 17 日、5 月 17 日和 6 月 2 日的群体叶幕净光合速率和大豆、玉米 6 月 20 日、7 月 20 日和 8 月 10 日的群体叶幕净光合速率。1、2、3 Represent wheat population leaf curtain net photosynthetic rates on the days of April 17, May 17 and June 2 and soybeen、maize population leaf curtain net photosynthetic rates on the days of June 20, July 20 and August 10, respectively.

表 5　741 杨群体叶幕净光合速率($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$)

Tab.5　Poplar population leaf curtain net photosynthetic rate

测定 Investigated date (month-date)	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
04-20	7.7	32.3	39.0	42.5	39.5	34.1	12.6
05-20	7.7	33.6	40.9	44.8	41.5	35.5	12.7
08-10	3.2	26.4	40.7	44.0	40.9	28.4	8.5

照的 65.2%,大豆和玉米日平均累积光量为对照的 51.52%;小麦日平均累积净光合量为 0.48 $mmol\ m^{-2}$,大豆和玉米分别为 0.24 $mmol\ m^{-2}$和 0.48 $mmol\ m^{-2}$;分别为对照田的 70.59%、51.06%和 52.75%。可见,日累积光量降低一半,日累积净光合量也约降低一半。从表 6 的材料看出,日累积光量与日累积净光合量呈简单的线性正相关。但不同作物其直线的斜率不同;小麦、大豆和玉米的斜率分别为 0.02391、0.02128 和 0.03973。斜率越大,表明该种作物对光强变化越敏感。

表 6　小麦、大豆和玉米间作田日累积光量($mmol\ m^{-2}$)和日累积净光合量($mmol\ m^{-2}$)

Tab.6　Daily light cumulant(LC) and daily net photosynthetic cumulant(PC) of wheat、soybean and maize under intercropping system

测定日期 Investigated date (年-月-日) (yy-mm-dd)	对照 CK 光量 LC	对照 CK 光合量 PC	东林冠下 UEC 光量 LC	东林冠下 UEC 光合量 PC	行中 AMR 光量 LC	行中 AMR 光合量 PC	西林冠下 UWC 光量 LC	西林冠下 UWC 光合量 PC	741 杨 Poplar 光合量 PC
小　麦 *Triticum aestivum*									
1996-04-14	21.45	0.57	14.25	0.40	14.87	0.41	15.57	0.45	0.31
1996-05-17	21.87	0.84	14.46	0.72	15.10	0.71	16.25	0.67	0.38
1995-06-02	26.35	0.64	15.85	0.40	15.22	0.33	14.90	0.26	0.40
平　均 Mean	23.22	0.68	14.85	0.51	15.06	0.48	15.57	0.46	0.36
大　豆 *Glycine hispida*									
1995-06-20	26.58	0.12	15.94	0.06	15.30	0.08	14.97	0.05	0.42
1995-07-20	25.98	0.57	8.95	0.26	14.44	0.33	11.66	0.28	0.56
1995-08-10	17.31	0.71	7.28	0.34	9.23	0.42	7.20	0.22	0.44
平　均 Mean	23.29	0.47	10.72	0.22	12.99	0.28	11.28	0.18	0.47
玉　米 *Zea mays*									
1995-06-20	26.58	0.22	15.94	0.13	15.30	0.14	14.97	0.09	0.42
1995-07-20	25.98	1.45	8.95	0.63	14.44	0.90	11.66	0.66	0.56
1995-08-10	17.31	1.05	7.28	0.48	9.23	0.62	7.20	0.47	0.44
平　均 Mean	23.29	0.91	10.72	0.41	12.99	0.55	11.28	0.41	0.47

2.3.3　群体光能利用率　根据表 6 提供的日平均累积光量和日平均累积净光合量,计算各处理的光能利用率(表 7)。将间作田各部位农作物的光能利用率加权平均,并与对照比较。可看出,小麦的光能利用率高于对照 10.89%,间作田的大豆和玉米未能提高光能利用率。这可能是因夏作物处于更弱的光照条件下,其光合速率降低,但叶片的呼吸消耗速率并未降低,导致弱光下未能提高光能利用率。

741 杨的东西冠幅只占行距的一半,故将其光能利用率折半并与间作物的光能利用率相加,则杨-

麦间作的总光能利用率为对照的 135.32 %,杨 - 大豆和杨 - 玉米间作的光能利用率分别为对照的 148.51 %和 127.62 %。

农作物产量的研究表明,小麦东、西两林冠下的平均产量为行中的 86.61 %;间作田加权平均产量为对照的 76.09 %。大豆东、西两林冠下的平均产量为行中的 51.37 %;间作田加权平均产量为对照的 64.19 %。玉米东、西两林冠下的平均产量为行中的 62.37 %,间作田加权平均产量为对照的 51.24 %。小麦减产率最低,玉米减产率最高。这与日累积光合量的测定结果相似。

表 7 杨农间作的光能利用率和农作物产量的比较

Tab.7 Comparison of LUC(%) and crop yield between intercropping system(IS) and pure crop system(PS)

作物种类 Corps	对 照 CK	东林冠下 UEC	行 中 AMR	西林冠下 UWC	加权平均 WA	741 杨 Poplar	间作/对照 IC/CK(%)
			光能利用率 LUC(%)				
小麦 *T. aestivum*	2.93	3.43	3.19	2.95	3.19	1.55	135.32
大豆 *G. hispida*	2.02	2.05	2.16	1.60	1.99	2.02	148.51
玉米 *Z. mays*	3.91	3.82	4.23	3.63	3.98	2.02	127.62
			农作物产量 Crop yield(g/m^2)				
小麦 *T. aestivum*	691.2	452.6	563.7	523.8	526.0	-	76.09
大豆 *G. hispida*	336.8	204.1	259.4	141.9	216.2	-	64.19
玉米 *Z. mays*	963.2	235.7	607.9	522.6	493.5	-	51.24

3 结论

1)杨农间作立体种植,冠层总叶幕系数增大;低叶量与高叶量时期互补;截获的光能比对照高,从而提高了总光能利用率。2)3 种间作物的测定结果表明,农林总光能利用率比对照提高 27.56 % ~ 48.64 %。某种作物在全日照下的光能利用率越低(如大豆),间作后总光能利用率比对照提高的幅度越大。3)杨农间作当作物冠层表面的日均光强大于 60 %时,间作物的光能利用率高于对照 10.89 %,说明弱光下光能利率可提高。但如果光强小于 50 %,则间作物的光能利用率与对照相近,即不能提高光能利用率。这种现象可能与弱光下光合速率降低,而呼吸消耗并未减少有关。4)杨农间作作物的日累积净光合量与日累积光量呈线性正相关,随作物喜光程度的增加,直线的斜率变大。

用上述方法估算的间作田与对照田农作物的日累积净光合量的比值与实测两者产量的比值基本相同,说明方法的可行性。

参 考 文 献

龚垒. 树木光合作用与物质生产. 树冠光合作用的数学模型(126 ~ 131),北京:北京科学技术出版社,1989

高学增,高新学. 不同玉米群体 CO_2 含量和光合作用的研究. 山东农业科学,88,(1):19 ~ 23

胡新生等. 四个杨树无性系在不同温度和相对湿度条件下净光合速率变化的比较研究. 林业科学,1997,33(2):107 ~ 116

李明启. 关于植物光能利用效率与作物产量问题. 光合作用研究进展,北京:科学出版社,1980:171 - 178

刘建栋,傅抱璞. 光胁地条件下油菜产量及其生产潜力的研究. 中国农业气象,1996,17,(2):22 ~ 25

孟 平,宋兆民,张劲松. 农林复合系统光能利用率的研究. 林业科学,1997,33(专刊 1):14 ~ 19

门司正三 左伯敏郎. 植物群体中光因素及其对植物生产的作用. 光合作用与作物生产译丛(2),北京:农业出版社,1980:1 ~ 24

裴保华,蒋湘宁,郑均宝等. I - 69 杨光能利用的研究. 林业科学研究,1990,3(3):201 ~ 206

王天铎. 光合作用生理生态若干问题. 植物生理学专题讲座 ——纪念罗宗洛教授,北京:科学出版社,1987:97 ~ 104

王永锐. 作物高产生理. 科学技术出版社,1991:33 ~ 48

颜景义,郑有飞,韩素芹. 小麦日累积光合量估算方法探讨. 中国农业气象,1996,17(5):23 ~ 27

杨敏生,林 青,邢秀岩. 741 杨光合性能的研究. 河北林学院学报,1991,6(3):161 ~ 165

张祝平,丁明懋. 鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林的生物量和光能利用效率. 生态学报,1996,16(5):525 ~ 534

Johon H. Bassman & John C. Zwier. Gas exchange characteristic of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoides* and *Populus trichocarpa* × *Populus deltoides* clone. Tree Physiology, 1991:8,145 ~ 159