

吾马尔·吾哈甫,史开奇,沙吉旦·尕依提,等. 不同派系引种杨树品种(系)光合-光响应曲线[J]. 江苏农业科学,2019,47(11):198-203.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.11.045

# 不同派系引种杨树品种(系)光合-光响应曲线

吾马尔·吾哈甫<sup>1</sup>,史开奇<sup>1</sup>,沙吉旦·尕依提<sup>1</sup>,夏黎<sup>1,2,3</sup>,夏诗书<sup>1,2,3</sup>,程平<sup>4</sup>,李宏<sup>4</sup>

(1. 新疆维吾尔自治区伊犁州林木良种繁育试验中心,新疆察布查尔 835311; 2. 新疆师范大学地理科学与旅游学院,新疆乌鲁木齐 830054;  
3. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室,新疆乌鲁木齐 830054; 4. 新疆林业科学院,新疆乌鲁木齐 830000)

**摘要:**采用直角双曲线修正模型对白杨派、黑杨派、青杨派杨树品种(系)的光合-光响应曲线进行了拟合。结果表明,84-1-101、银×新4#、银×新6#、银×新192、03-04-156、014、171、174、178-2-19、中至1#、1-262的最大光合能力强,最大净光合速率( $P_{\max}$ )均超过了  $35.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;参试杨树品种(系)表现量子效率(AQE)在  $0.053 \sim 0.066 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,处于中上水平;3个派系中,黑杨派品种(系)的光补偿点(LCP)低于其他2个派系;白杨派树种的暗呼吸速率( $R_d$ )整体上大于黑杨派和青杨派;LCP越高, $R_d$ 越大;白杨派杨树品种光能转化效率及生理活性优于黑杨派、青杨派杨树品种(系),黑杨派杨树品种(系)在弱光条件下的光能利用能力强。

**关键词:**引种杨树;光合-光响应曲线;直角双曲线修正模型

**中图分类号:** S722.7;S792.110.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)11-0198-06

杨树是杨柳科(Salicaceae)杨属(*Populus*)植物,分为白杨派(Leuce)、黑杨派(Aigeiros)、青杨派(Tacamahaca)、胡杨派(Turanga)、大叶杨派(Leucoides)5个派系<sup>[1]</sup>。对植物进行光合-光响应曲线的测定,根据拟合模型可计算出植物的光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)、最大净光合速率( $P_{\max}$ )、表观量子效率(AQE)、暗呼吸速率( $R_d$ )等参数,能够有效地了解植物对光反应过程的利用效率<sup>[2]</sup>。常用的光响应模型有非直角双曲线模型、直角双曲线模型、直角双曲线修正模型、指数模型<sup>[3-5]</sup>。目前,非直角双曲线模型和直角双曲线模型的使用最为广泛<sup>[6-9]</sup>,但是它们不存在极点,无法直接得出植物的光饱和点和最大净光合速率,且拟合出的最大净光合速率大于实测值,光饱和点小于实测值<sup>[10-11]</sup>,而指数模型假设0.99或0.90  $P_{\max}$ 所对应的光强为饱和光强,也无法得到光饱和点的解析解。直角双曲线修正模型恰好克服了这些不足,并有学者进行了论证<sup>[12-14]</sup>。因此,本研究使用直角双曲线修正模型对白杨派、黑杨派、青杨派引种杨树品种(系)的光合-光响应曲线进行了拟合,以阐明植物的光合生理特性,筛选出高光效的优良杨树品种(系)。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

研究区位于新疆察布查尔县境内的伊犁州林木良种繁育试验中心,地处天山西北部伊犁河南麓,地理位置  $43.86^\circ\text{N}$ 、 $81.23^\circ\text{E}$ ,地势平坦,海拔592 m,属于北温带大陆性半干旱气候,年平均气温  $6.7 \sim 9.9^\circ\text{C}$ ,年日照时数2 800 h,日照率

59%,年蒸发量1 425 mm,年均相对湿度60%,年平均风速  $2.5 \text{ m/s}$ 。试验地土壤类型为沙壤土和盐化潮土,pH值8.35,肥力中上等,土壤有机质含量为  $14.95 \text{ g/kg}$ ,全氮含量为  $1.25 \text{ g/kg}$ ,水解性氮含量为  $78.86 \text{ g/kg}$ ,有效磷含量为  $42.62 \text{ g/kg}$ ,全钾含量为  $12.58 \text{ g/kg}$ ,速效钾含量为  $150 \text{ g/kg}$ ,多年平均降水量368.5 mm。由于伊犁河支流横贯其中,使得平原林场水源充沛,地下水位较高,气候湿润,有利于多种树木的生长。

### 1.2 试验材料

研究对象为2016年从辽宁省杨树研究所引进的黑杨派、青杨派和玛纳斯平原林场引进的白杨派且能安全越冬、生长良好的30个杨树品种(系),具体见表1。2016年10月底采集种条,2017年4月,按照完全随机试验设计,每个品种(系)扦插100株,重复3次,成活率均在85%以上,待苗木生长至1.5 m以上时进行光合-光响应试验。

### 1.3 试验测定

光合-光响应曲线的测定使用配备的6400-02B Led光源的Li-6400XT便携式光合测定系统,选用Light-Curve Auto程序测定,流量设定  $500 \mu\text{mol/s}$ ,使用小钢瓶- $\text{CO}_2$ 注入系统设定  $\text{CO}_2$ 浓度为  $400 \mu\text{mol/mol}$ ,光合有效辐射值(PAR)依次设定为2 500、2 300、2 100、1 900、1 700、1 500、1 400、1 200、1 100、800、500、400、200、100、50、0  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 共16个梯度,每次记录等待时间为120~150 s,每个样株重复测定3次。测定时间为2017年8月10—25日,北京时间10:00—12:00。

光合-光响应曲线采用直角双曲线修正模型:

$$P_n = \text{AQE} \times (1 - \beta \text{PAR}) / (1 + \gamma \text{PAR}) \times \text{PAR} - R_d. \quad (1)$$

式中: $P_n$ 为净光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];PAR为光合有效辐射 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]; $P_{\max}$ 为最大净光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];AQE为表观量子效率; $\beta$ 、 $\gamma$ 为系数; $R_d$ 为暗呼吸速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]。

收稿日期:2018-02-14

基金项目:新疆维吾尔自治区林业发展补助资金项目(编号:新林科字[2017]26号)。

作者简介:吾马尔·吾哈甫(1972—),男,新疆伊犁人,林业工程师,研究方向为林木引种与繁育。E-mail:2649898728@qq.com。

通信作者:李宏,研究员,博士生导师,主要从事森林培育研究工作。E-mail:hong1962@126.com。

表 1 30 个杨树品种(系)

品种(系)	派系	品种(系)	派系	品种(系)	派系
36-514	白杨派	银×新中东杨	白杨派	197	黑杨派
84-1-101	白杨派	03-04-156	黑杨派	3016	黑杨派
林场银×新	白杨派	014	黑杨派	渤海 1#	黑杨派
银×新 4#	白杨派	111	黑杨派	沙兰杨(辽宁)	黑杨派
银×新 6#	白杨派	171	黑杨派	中至 1#	黑杨派
银×新 8#	白杨派	174	黑杨派	C23	青杨派
银×新 10#	白杨派	177	黑杨派	I-262	青杨派
银×新 12#	白杨派	178-2-19	黑杨派	阜蒙小青	青杨派
银×新 192	白杨派	178-2-122	黑杨派	小青 2#	青杨派
银×新天杂	白杨派	178-2-145	黑杨派	拟小青	青杨派

对弱光条件下 [ $PAR \leq 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] 的光响应曲线进行直线回归,利用所得方程计算表观量子效率(AQE)、光补偿点(LCP)、暗呼吸速率( $R_d$ ),回归方程为

$$P_n = -R_d + AQE \times PAR. \quad (2)$$

#### 1.4 数据处理

使用“光合计算 4.1”软件(叶子飘,井冈山大学)<sup>[15]</sup>进行光合-光响应曲线拟合,Excel 2016 绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 白杨派光合-光响应曲线

结合图 1 和表 2 可知,白杨派杨树品种光合-光响应曲线变化趋势一致。光合有效辐射在  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  以下时,  $P_n$  随  $PAR$  的升高迅速增大,当  $PAR$  达到  $1\ 100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,增长速率逐渐缓慢。不同杨树品种(系)  $P_{\text{max}}$  以银×新 4# 最大,为  $37.65 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,光合潜力大,银×新 6# 次之,为  $36.45 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,银×新 10# 最小,仅为  $26.73 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

11 个白杨派杨树品种的表现量子效率(AQE)在  $0.055 \sim 0.066 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,由大到小依次为银×新 8# > 银×新 12# > 银×新 6# > 林场银×新 > 银×新天杂 > 银×新 192 > 36-514 > 银×新 4# > 84-1-101 > 银×新 10# > 银×新中东杨,极差为  $0.011 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,说明白杨派树种的表观量子效率相差不大。

光补偿点(LCP)是植物  $P_n$  为 0 时所对应的光照强度,由表 2 可知,银×新 10# LCP 为  $101.28 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,明显高于其他品种(系),在弱光条件下光合能力较低,其余品种(系) LCP 在  $34.76 \sim 79.14 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,以银×新 6# LCP 最低,银×新天杂次之。暗呼吸速率( $R_d$ )又称为呼吸速率,银×新 10#  $R_d$  为  $5.74 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,位居首列,银×新 6# 最小,有机物的代谢效率最高。

### 2.2 黑杨派光合-光响应曲线

黑杨派杨树品种(系)光合-光响应曲线如图 2 所示,变化趋势与白杨派杨树品种一致。在  $PAR\ 0 \sim 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  条件下,14 个参试品种(系)  $P_n$  均在  $11.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  以下,但上升速率较快,至  $PAR$  达到  $1\ 100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,  $P_n$  上升速率逐渐减慢。不同杨树品种(系)  $P_{\text{max}}$  以 178-2-19 最大,  $P_{\text{max}}$  高达  $42.65 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,而 177 最小,  $P_{\text{max}}$  仅为  $28.92 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

根据对弱光条件下的光响应曲线进行直线回归,计算出黑杨派杨树品种(系)表观量子效率(AQE)在  $0.054 \sim 0.064 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,不同杨树品种(系) AQE 以 014 最大,177 最小。其中,3016、178-2-19、178-2-145 3 个品种(系) AQE 值相当;03-04-156、171、178-2-122、197、渤海 #、沙兰杨(辽宁)6 个品种(系) AQE 值相当;111、174、中至 1# 3 个品种(系) AQE 值相当。

LCP 是表征植物对弱光的利用能力的重要指标,按照由大到小的顺序排列可知,黑杨派杨树品种(系) LCP 大小为  $178-2-19 > 111 > 197 > 3016 > 178-2-122 > 沙兰杨(辽宁) > 174 > 中至 1# > 渤海 1# > 171 > 014 > 178-2-145 > 177 > 03-04-156 >$ ,其中 178-2-19 的 LCP 为  $78.94 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,而暗呼吸速率( $R_d$ )为  $4.90 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,明显高于其他品种(系),177 的 LCP 为  $16.38 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $R_d$  仅为  $0.94 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

### 2.3 青杨派光合-光响应曲线

在光合有效辐射  $0 \sim 800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  内,5 个青杨派杨树品种(系)  $P_n$  上升幅度较大,随着光合有效辐射的逐渐增大,  $P_n$  上升速率逐渐减慢,整体看来,光合-光响应曲线变化趋势与白杨派、黑杨派一致(图 3)。由表 2 可知,  $P_{\text{max}}$  在  $25.80 \sim 38.37 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,以 I-262 最大,小青 2# 最小。

青杨派杨树品种(系)的 AQE 维持在一个相对稳定的水平,I-262、拟小青均为  $0.061 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,C23、阜蒙小青、小青 2# 在  $0.053 \sim 0.055 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。I-262 的 LCP 高达  $78.01 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,明显高于其他品种(系),C23 的 LCP 最小,为  $26.48 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。暗呼吸速率( $R_d$ )仍以 I-262 最大,C23 最小,二者相差  $3.34 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,阜蒙小青、拟小青、小青 2# 的  $R_d$  水平相当。

## 3 讨论与结论

在自然条件下,  $P_{\text{max}}$  反映了植物叶片具有的最大光合潜力<sup>[16]</sup>。由直角双曲线修正模型拟合光合-光响应曲线得到的白杨派  $P_{\text{max}}$  在  $26.73 \sim 37.65 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,黑杨派  $P_{\text{max}}$  在  $28.92 \sim 42.65 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,青杨派  $P_{\text{max}}$  在  $25.80 \sim 38.37 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,均接近于实测值。白杨派的银×新 4#、银×新 6#、银×新 192 的  $P_{\text{max}}$  较大;黑杨派的 03-04-156、178-2-19、174 的  $P_{\text{max}}$  较大;青杨派的 I-262 的  $P_{\text{max}}$  最大,综合来看,  $P_{\text{max}}$  大于  $35 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的品种(系)有白杨派为 84-1-101、银×新 4#、银×新 6#、银×新 192,黑杨派为

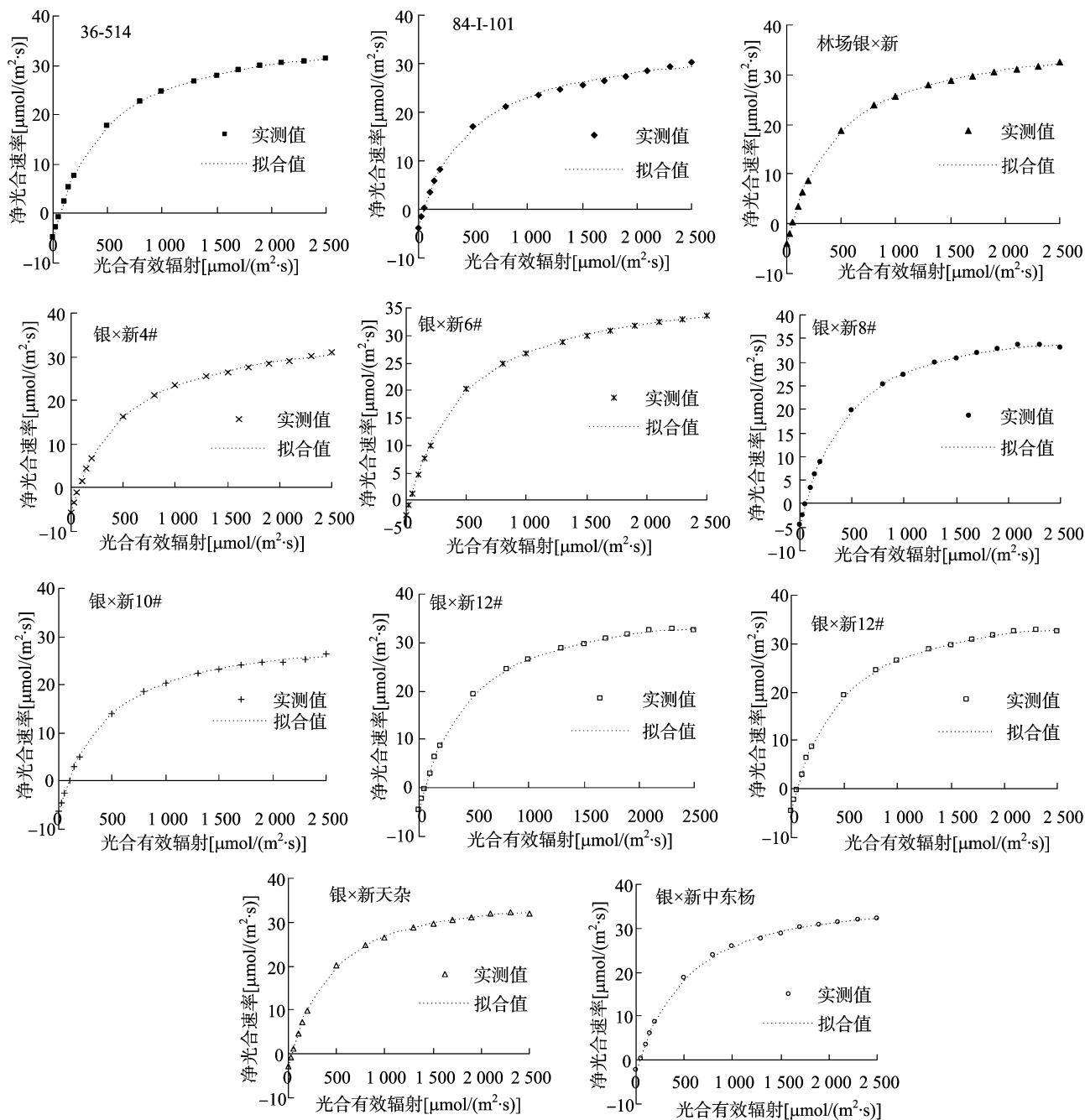


图1 白杨派杨树品种光合-光响应曲线

03-04-156、014、171、174、178-2-19、中至1#,青杨派为I-262,说明这些品种(系)的光合潜力较大,利用光能的能力强;白杨派的银×新10#,黑杨派的178-2-122,青杨派的阜蒙小青、小青2#的 $P_{\max}$ 均低于 $30.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,较其他树种而言,它们的最大光合能力较弱,而引种地伊犁地区属于高光强地带<sup>[17]</sup>,这些品种(系)能否适应该地区的光热资源有待进一步研究。

表观量子效率(AQE)指植物每吸收1个光子所同化的 $\text{CO}_2$ 或释放的 $\text{O}_2$ 的分子数目,反映了植物光合机构功能变化<sup>[18]</sup>,以及利用弱光的能力<sup>[13]</sup>,AQE值越大,表明植物在弱光条件下,转化光能的效率越高<sup>[19]</sup>。在自然条件下,一般植物的AQE在 $0.03 \sim 0.07$ <sup>[20]</sup>。试验结果表明,参试杨树品

种(系)AQE在 $0.053 \sim 0.066 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,处于中上水平,说明参试品种(系)在弱光条件下,仍具有较高的光能转化效率。从各派系来看,AQE $\geq 0.060 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的品种(系)共计14个,其中白杨派8个,黑杨派4个,青杨派2个,以银×新4#最大,其次为银×新6#、014、银×新192、84-I-101。综合看来,白杨派杨树品种的AQE平均值略高于其他2个派系,说明白杨派杨树品种光能转化效率稍优于黑杨派、青杨派杨树品种(系)。

根据实测数据可知,在设定的PAR范围内,参试品种(系)饱和光强过高,与段爱国等的研究结果<sup>[21]</sup>一致,因此,本研究对光饱和点不做具体分析。植物叶片的光补偿点(LCP)反映了植物利用弱光的能力,光补偿点越低,利用弱光

表 2 不同派系引种杨树品种(系)光合-光响应参数

派系	品种(系)	$P_{nmax}$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	表观量子效率	LCP [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	$R_d$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	$\alpha$
白杨派	36-514	32.68	0.062	67.97	4.20	0.089
	84-I-101	35.56	0.056	50.45	2.95	0.082
	林场银×新	34.15	0.063	52.45	3.32	0.093
	银×新4#	37.65	0.060	79.14	4.76	0.085
	银×新6#	36.45	0.064	34.76	2.22	0.095
	银×新8#	33.81	0.066	59.28	3.91	0.091
	银×新10#	26.73	0.057	101.28	5.74	0.082
	银×新12#	33.53	0.065	59.30	3.87	0.092
	银×新192	35.74	0.062	66.82	4.16	0.090
	银×新天杂	32.64	0.063	35.76	2.26	0.090
	银×新中东杨	32.87	0.055	40.56	2.22	0.076
黑杨派	03-04-156	39.22	0.059	16.38	0.97	0.080
	014	35.45	0.064	24.13	1.55	0.095
	111	33.04	0.056	61.63	3.47	0.080
	171	36.86	0.059	25.36	1.50	0.084
	174	37.82	0.057	49.04	2.77	0.079
	177	28.92	0.054	17.57	0.94	0.078
	178-2-19	42.65	0.062	78.94	4.90	0.084
	178-2-122	29.03	0.058	55.72	3.25	0.089
	178-2-145	32.64	0.062	20.34	1.25	0.088
	197	32.62	0.059	61.55	3.66	0.088
	3016	33.56	0.062	59.84	3.73	0.070
	渤丰1#	34.77	0.059	30.10	1.76	0.086
	沙兰杨(辽宁)	34.96	0.059	55.18	3.26	0.087
	中至1#	37.35	0.056	42.41	2.38	0.078
青杨派	C23	31.42	0.053	26.48	1.39	0.076
	I-262	38.37	0.061	78.01	4.73	0.085
	阜蒙小青	32.22	0.054	68.52	3.72	0.070
	拟小青	29.29	0.061	54.59	3.31	0.084
	小青2#	25.80	0.055	57.75	3.15	0.086

的能力越强<sup>[22]</sup>。根据拟合模型计算的 LCP 可知,白杨派的银×新6#、银×新天杂、银×新中东杨的 LCP 较低,对弱光的利用能力强于其他树种;黑杨派树种的 LCP 在 16.38 ~ 78.94  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,差别较大。青杨派的 C23 的 LCP 较低,其余均在 54.59  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  及以上。综合来看,3 个派系中,黑杨派品种(系)的 LCP 低于其他 2 个派系,说明黑杨派杨树品种(系)在弱光条件下的光能利用能力强。在自然条件下,一般植物的 LCP 在 30 ~ 70  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ <sup>[23]</sup>。本研究,部分品种(系) LCP 低于 30  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,例如 171、014、178-2-145、177、03-04-156、银×新4#、银×新10#、178-2-19、I-262 的 LCP 则高于 70  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,是植物自身的生理特性还是试验过程中产生了误差,具体原因有待进一步研究论证。

暗呼吸速率( $R_d$ )又称呼吸强度,指植物在无光条件下的呼吸速率,是反映植物消耗光合产物速率的参数,与生理活性有关<sup>[24]</sup>。白杨派杨树品种  $R_d$  由大到小依次为银×新10# > 银×新4# > 36-514 > 银×新192 > 银×新12# > 银×新8# > 林场银×新 > 84-I-101 > 银×新中东杨 > 银×新天杂 > 银×新6#;黑杨派杨树品种(系)  $R_d$  由大到小依次为 178-

2-19 > 3016 > 197 > 111 > 沙兰杨(辽宁) > 178-2-122 > 174 > 中至1# > 渤丰1# > 014 > 171 > 178-2-145 > 03-04-156 > 177;青杨派杨树品种(系)  $R_d$  由大到小依次为 I-262 > 阜蒙小青 > 拟小青 > 小青2# > C23,说明白杨派的银×新10#、黑杨派的 178-2-19、青杨派的 I-262 在无光条件下的呼吸速率高,生理活性活跃。综合看来,所有参试树种  $R_d$  以银×新10#最大,178-2-19 次之,且白杨派树种的  $R_d$  整体上大于黑杨派和青杨派,说明白杨派树种的生理活性优于其他 2 个派系。研究还发现 LCP 越高,  $R_d$  越大。

综上所述,84-I-101、银×新4#、银×新6#、银×新192、03-04-156、014、171、174、178-2-19、中至1#、I-262 的最大光合能力强,  $P_{nmax}$  均超过了 35.00  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,白杨派杨树品种光能转化效率及生理活性优于黑杨派、青杨派杨树品种(系),黑杨派杨树品种(系)在弱光条件下的光能利用能力强。在实际的生产中,应注意有些品种(系)虽然光合潜力大,但是 LCP 较高,对弱光的转化能力较差,同时生理活性又较为活跃。因此,可结合其他生理参数、生长特性等进行进一步的研究。

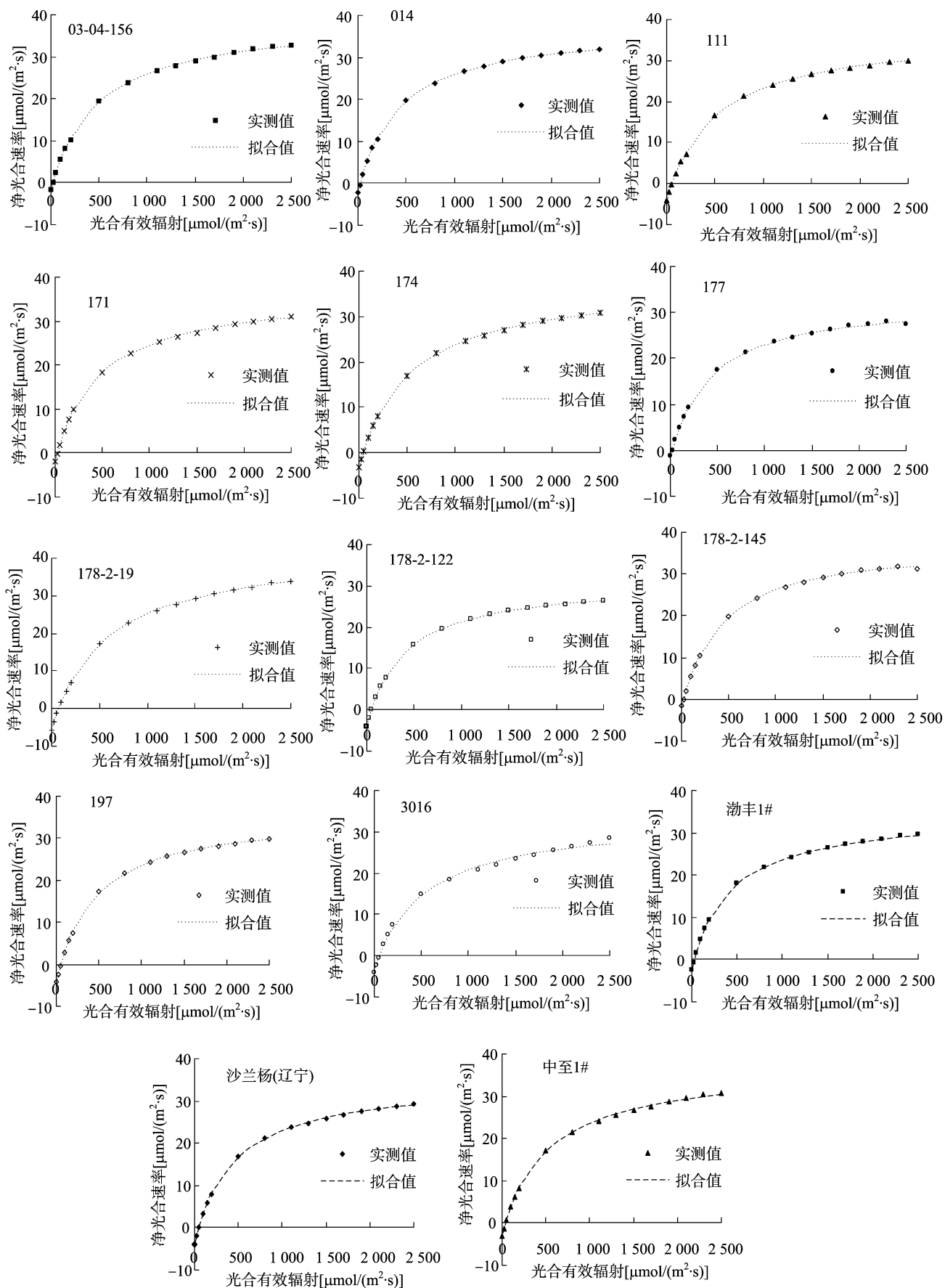


图2 黑杨派杨树品种(系)光合-光响应曲线

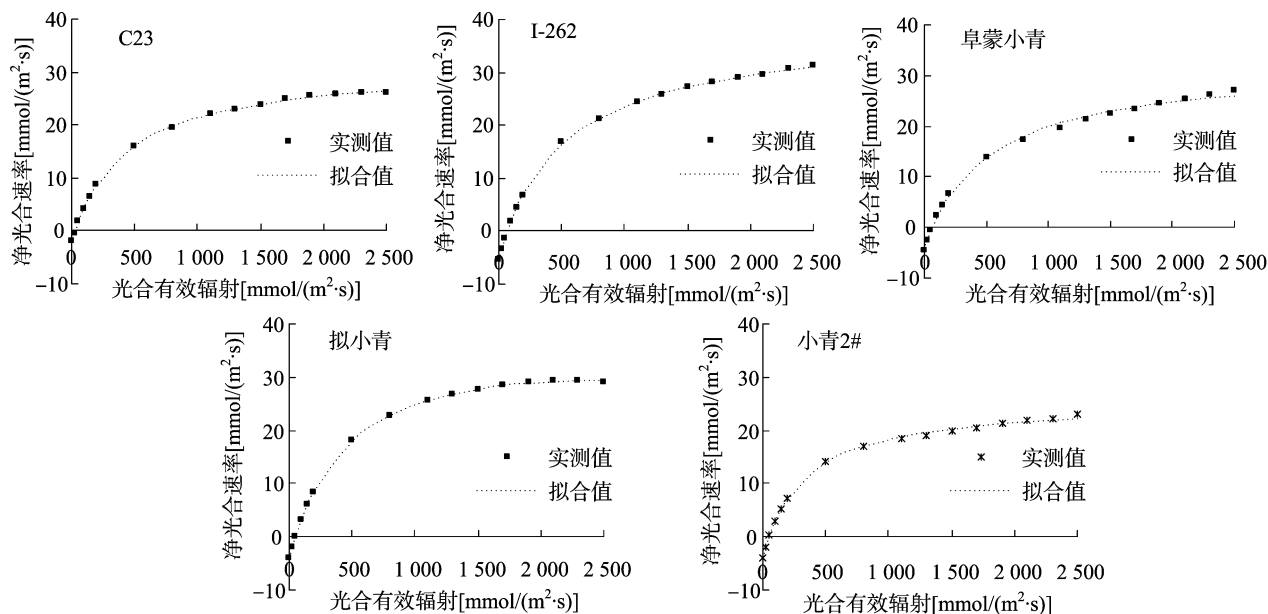


图3 青杨派杨树品种(系)光合-光响应曲线

## 参考文献:

- [1] 李树春, 夏辉, 严冬, 等. 不同派别杨树无性系 SSR 遗传距离及聚类分析[J]. 植物研究, 2015, 35(1): 68-76.
- [2] Robert E S, Mark A, John S B. Kok effect and the quantum yield of photosynthesis[J]. Plant Physiology, 1984, 75(1): 95-101.
- [3] Thornley J M. Mathematical models in plant physiology [M]. London: Academic Press, 1976: 86-110.
- [4] Bassman J, Zwier J C. Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoids* and *Populus trichocarpa* × *P. deltoids* clone[J]. Tree Physiology, 1991, 8(2): 145-159.
- [5] Ye Z P, Yu Q. A coupled model of stomatal conductance and photosynthesis for winter wheat [J]. Photosynthetica, 2008, 46(4): 637-640.
- [6] 张弥, 吴家兵, 关德新, 等. 长白山阔叶红松林主要树种光合作用的光响应曲线[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1575-1578.
- [7] 卜令铎, 张仁和, 常宇, 等. 苗期玉米叶片光合特性对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1184-1191.
- [8] 韩刚, 赵忠. 不同土壤水分下 4 种沙生灌木的光合光响应特性[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4019-4026.
- [9] 张玲玲. 5 种植物光响应曲线最拟合模型筛选[J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(1): 20-25.
- [10] 闫小红, 尹建华, 段世华, 等. 4 种水稻品种的光合光响应曲线及其模型拟合[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 604-610.
- [11] 廖小锋, 刘济明, 张东凯, 等. 野生小蓬竹的光合光响应曲线及其模型拟合[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(3): 124-128.
- [12] 谭晓红, 彭祚登, 贾忠奎, 等. 不同刺槐品种光合光响应曲线的温度效应研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 64-68.
- [13] 李雅善, 李华, 王华, 等. 赤霞珠葡萄光合-光响应曲线拟合模型的比较分析[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(2): 20-25.
- [14] 蒋冬月, 钱永强, 费英杰, 等. 柳属植物光合-光响应曲线模型拟合[J]. 核农学报, 2015, 29(1): 169-177.
- [15] 胡楚琦, 刘金珂, 王天弘, 等. 3 种盐胁迫对互花米草和芦苇光合作用的影响[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 92-103.
- [16] 何应会, 马锦林, 梁文汇, 等. 6 个油茶优良无性系光响应曲线分析[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(7): 1577-1580.
- [17] 尤鑫, 龚吉蕊, 张新时, 等. 伊犁地区 5 个欧美杨引进品系的苗期适应性研究[J]. 西部林业科学, 2009, 38(2): 17-23.
- [18] Guill E P, Maria V L, Pablo L P. Photosynthetic plasticity of *Nothofagus pumilio* seedlings to light intensity and soil moisture[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 243(2/3): 274-282.
- [19] 董志新, 韩清芳, 贾志宽, 等. 不同苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 品种光合速率对光和 CO<sub>2</sub> 浓度的响应特征[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2272-2278.
- [20] 许大全. 叶片表观量子效率的测定[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 88-94.
- [21] 段爱国, 张建国. 光合作用光响应曲线模型选择及低光强属性界定[J]. 林业科学研究, 2009, 22(6): 765-771.
- [22] 王遥. 不同油茶无性系苗期光合特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [23] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 88.
- [24] Jones M D, Hutchinson T C. Nickel toxicity in mycorrhizal birch seedling infected with *Lactarius rufus* or *Sclerotinia flavidum*. I. effects on growth, photosynthesis, respiration and transpiration[J]. New Phytologist, 1988, 108(4): 451-459.